

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

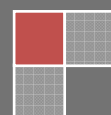
WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

2011

Modelado de Fuentes Generadoras de Incendios Eléctricos por Termoconducción

Tesis Doctoral

Un nuevo enfoque en la investigación de incendios eléctricos



1 de febrero de 2011

**[MODELADO DE FUENTES GENERADORAS DE INCENDIOS
ELÉCTRICOS POR TERMOCONDUCCIÓN]**

Dorindo Elam Cárdenas Estrada
Ingeniería Atlántico, S.A.
Universidad Tecnológica de Panamá
NFPA, CFPS.
e-mails: dcardenas@i-atlantico.com
de.cardenas@hotmail.com



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENTO DE PROYECTOS DE INGENIERIA

TESIS DOCTORAL

**Modelado de Fuentes Generadoras de
Incendios Eléctricos por Termoconducción**

por

DORINDO ELAM CÁRDENAS ESTRADA

**Doctorado en Ingeniería de Proyectos,
Medio Ambiente, Seguridad,
Calidad y Comunicación**

DIRECTOR:

Dr. Federico Fernández Díez

CO-DIRECTORES

Dr. Santos Gracia

Dr. Roberto Alvarez

FEBRERO, 2011



“El principio de la Sabiduría es el Temor de Yahveh” Rey Salomón.

Dedicatoria



**A el excelso Dios, Yahveh
A mi maravillosa madre, Ermita
A mi gran amor, Rosy
A mi familia y amigos.
A la humanidad.**



Agradecimientos



A Dios, quien me sostuvo en alto y no me permitió caer; a mi madre, quien ha sido el más grande apoyo que alguien pueda tener en éste mundo; a mi familia, que me quiere y que desean lo mejor para mi; al Ing. Rafael Watson, quien me obsequió la oportunidad de aprender y aplicar lo aprendido en sus empresas, al Dr. Roberto Alvarez quien me ayudó en el proceso formativo, al Dr. Santos Gracia que me aconsejó sabiamente en todo momento, al Dr. Luis Dzul por sus oportunas observaciones de publicación y el Dr. Federico Fernández Diez por su dedicada revisión de mi trabajo.

A todos ellos

Mil Gracias

RESUMEN

Es bastante común leer o escuchar por los medios de información cuando se dan noticias de incendios, que la causa primaria del mismo fue “un corto circuito”, o “un panel eléctrico en mal estado” o “una conexión eléctrica mal hecha” o algún afín que al final de cuentas recae en el hecho de que la fuente primaria de energía para el incendio es la electricidad.

En ocasiones esto nos pone a pensar “¿cual es el precio que tenemos que pagar realmente por el progreso?”; pues en todo el mundo las conexiones y equipos eléctricos inadecuados están a la orden del día y son a todas luces los elementos de ignición preferidos en la mayor parte de nuestros casos de incendios, y aunque no dudamos que las Oficinas de Seguridad y Revisión de Planos de los diferentes estamentos gubernamentales en el mundo entero, definitivamente se esfuerzan en la revisión de planos y proyectos, no ha sido suficiente para cambiar esta tendencia por parte de los elementos eléctricos.

En Estados Unidos; país fundador de la asociación de seguridad y protección contra incendios mas grande del mundo, la NFPA (National Fire Protection Association), se tienen cientos de estudios, y análisis estadísticos desde muchos puntos de vista, para tratar de entender el porque de esta situación; pues confrontan los mismos problemas que nosotros, con incendios en buenos porcentajes por causas de la electricidad.

Por ejemplo, en los últimos estudios publicados por NFPA que incluyen la recapitulación de causas líderes en incendios domésticos (en hogares); entre 1999 y 2002; los equipos de distribución eléctrica e iluminación se posicionan en el tercer lugar con el 9% de las causas, luego de los equipos identificados de cocina con el 20% y los equipos identificados de calefacción con el 11%. Sin embargo nótese que una gran parte de estos equipos de calefacción son también “equipos eléctricos” (aquellos que trabajan por resistencias eléctricas), y su falla y producción de calor en caso de un incendio, podría computarse también a la electricidad, lo que no ha sido hecho de esta forma.

En el caso de incendios estructurales en otras locaciones fuera de hogares para el mismo periodo (civiles, comerciales, industriales), la causa líder fue el incendio intencionado (18%), seguido por equipos de cocina con (14%) y luego por equipos de distribución eléctrica y alumbrado (9%). En este caso los equipos de climatización sumaron un 8% de los incendios, y sucede igualmente que si se contara por separado el

porcentaje de equipos eléctricos de climatización, seguramente la causa de incendio eléctrico pasaría a una posición superior.

Independientemente de la posición que ocupe, lo importante es que tanto en nuestro país como en Estados Unidos, como en toda Europa y en otras partes del mundo, el desarrollo tecnológico ha traído consigo la utilización cada día mayor de diversos equipos eléctricos, tanto en el área de suministro, como de distribución, como en áreas de aplicaciones específicas; como lo son la climatización, motores, controles, aparatos electrónicos y digitales, sistemas de comunicación, etc. todos tienen en común, utilizan la electricidad como fuente de energía y por ello se convierten en fuentes potenciales de un incendio de causa eléctrica.

Definitivamente, no por esto podemos oponernos al avance y al desarrollo tecnológico, muy por el contrario, conociendo que todo cambio trae consigo repercusiones secundarias, nuestra labor como profesionales dedicados a la ingeniería de protección contra incendios es hacer que la investigación y las tecnologías avancen de la mano, de forma que se puedan obtener soluciones para los incrementos de riesgo, por medio de investigación y aplicación de nuevas tecnologías en el área de protección contra incendios sin perjuicio del avance tecnológico general de los sistemas, artefactos y elementos eléctricos y electrónicos.

Lo fundamental aquí es comprender los hechos físicos. Un incendio eléctrico no escapa del esquema general de ignición ni del esquema general de incendio; y lo menciono de esta forma porque muchas personas confunden los términos y al mencionar cualquiera de ellos se piensa en lo mismo; en algo que se quema y punto, sin embargo aunque se habla de eventos relacionados, cada uno de ellos tiene sus condiciones y características propias.

Cuando hablamos de “ignición”, nos referimos al estado inicial de la generación del incendio (estado transitorio inicial); y cuando hablamos de incendio, es el estado desarrollado del evento, el cual en ocasiones es modelado como “estado estable”, pero en el caso de un fuego de incendio (no controlado), muy difícilmente se llega a una condición que pueda ser representada dignamente por un modelo de estado estable.

En teoría de incendios, las representaciones de estos estados se dan por medio de lo que se conoce como triángulo y tetraedro del fuego.

En palabras sencillas el triángulo está constituido por 1.) Un combustible, 2.) Una fuente de calor o temperatura suficiente; y 3.) Oxígeno. Las literaturas que han incluido un cuarto elemento principal en esta descripción de elementos fundamentales para el fuego, han considerado 4.) Una reacción en cadena desinhibida, por medio de la cual se mantiene

la combustión; sin embargo este cuarto punto solo es tomado en cuenta realmente como una necesidad para mantener el incendio vivo una vez ha comenzado (o sea cuando está en su ideológico “estado estable”).

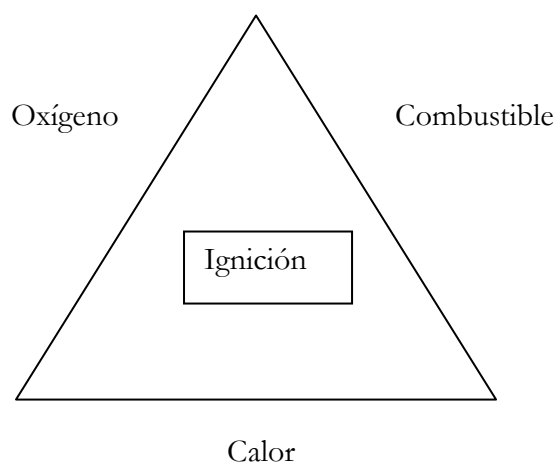


Imagen 1 Representación gráfica del “Triángulo del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para llevar a cabo la ignición.

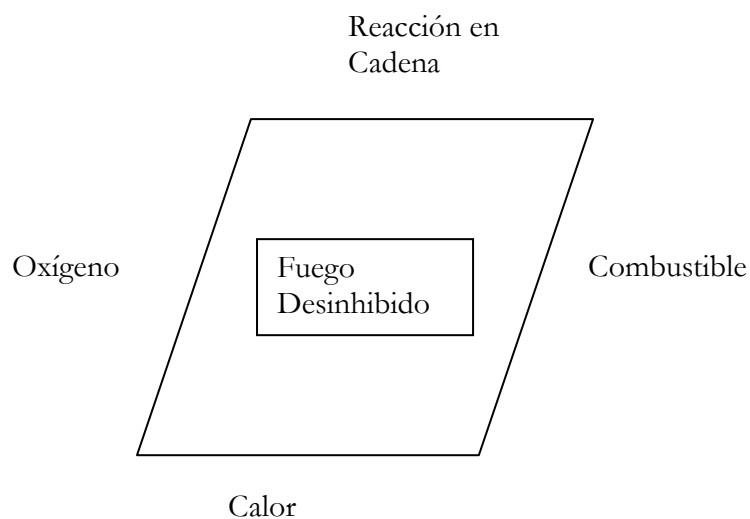


Imagen 2. Representación gráfica del “Tetraedro del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para tener un fuego mantenido.

Como se aprecia en las imágenes anteriores, el triángulo del fuego trata de representar la combinación adecuada de necesidades requeridas para dar inicio a un

incendio, o sea para provocar una “chispa”. No solo es necesario tener combustible, oxígeno y calor, sino que hace falta combinarlos en las cantidades adecuadas con las cuales se satisfacen las condiciones apropiadas para que el calor, combustible y oxígeno, entren en un proceso químico llamado reacción exotérmica de combustión, por medio del cual se transforman materiales combustibles en productos al reaccionar químicamente con el oxígeno, librando una gran cantidad de calor.

Esta “ignición” o “encendido” es un proceso transitorio, en muchos casos muy inestable, que puede terminar muy pronto (a veces fracciones de segundos), con lo que solo se obtiene “un chispazo”, en caso de fluidos y sólidos a este estado se le llama punto de inflamación (flashpoint). En otras ocasiones, el fuego puede mantenerse por si solo, sin apagarse por largo tiempo, es entonces cuando se considera que ha salido de la simple inflamación y ha llegado al punto de fuego (firepoint) dentro del proceso de ignición y luego de que esto se de, si se mantiene vivo ha de convertirse en un incendio, y el mismo podrá mantenerse vivo o en estado estable hasta que se rompa alguno de los eslabones del tetraedro del fuego. La razón por la cual no se extingue inmediatamente en este caso es porque se dieron las condiciones necesarias para que la reacción química inicial se vuelva una “reacción en cadena desinhibida”, con lo que aparecen llamas y se libera mucho más calor. Al suceder esto, el oxígeno y los combustibles se encuentran con mas facilidad pues las llamas propician condiciones de presión y temperaturas ambientales necesarias para esto (lo cual se vera mas adelante), lo cual sigue repitiéndose, generando mas calor y propiciando la extensión de la reacción en cadena una y otra vez.

En el caso específico de los incendios eléctricos; físicamente se dan dos caminos básicos para llegar a una ignición. La primera opción es que la fuente de calor sea un arco eléctrico formado; y la segunda opción es que la fuente de calor sea un elemento o dispositivo eléctrico caliente por termoconducción.

Para la primera opción se puede dar el caso en el que un incremento súbito del voltaje entre 2 o mas conductores, o un decremento de la impedancia entre los mismos, rompe la barrera dieléctrica entre ellos por efectos del incremento del campo electromagnético entre ellos, propiciando la creación de un arco eléctrico que funcionará como fuente pura de calor en el triángulo del fuego. Mientras el arco no alcance un combustible que pueda reaccionar por medio de combustión al oxidarse, no pasará del estado de fuente de calor o energía, al estado de incendio. Igualmente tenemos enormes arcos en los cielos cada vez que hay tormentas eléctricas; y solo tenemos incendios cuando

estos arcos alcanzan un combustible (generalmente en tierra) capaz de ignitarse al reaccionar con el oxígeno.

Utilizando modelos basados en la teoría electromagnética, se ha conseguido simular este tipo de eventos, lo cual en la actualidad ha sido objeto de amplios estudios, y se han obtenido muchos productos de protección contra este tipo de eventos, que son en general dispositivos contra que actúan en dos situaciones; contra sobrecorriente y contra sobrecarga. Ejemplos de estos dispositivos son interruptores automáticos tipo “breaker”, tecnologías anteriores tipo fusible, y nuevas tecnologías que incluyen elementos de digitales y de estado sólido con sistemas de control de lazos mucho más precisos, como lo son los breakers inteligentes con controladores electrónicos programables, en los cuales es posible programar y modificar las curvas de operación en el tiempo y la coordinación entre todas las protecciones de un sistema eléctrico; es posible lograr comunicación entre ellas, y estudiar los casos de fallos.

Los dispositivos sensores especializados como interruptores por falla a tierra (GFCI: Ground Fault Circuit Interrupters), se listan como un avance tecnológico que ha sido muy bien aceptado por su gran aplicabilidad en áreas donde las fallas a tierra están a la orden del día, como cocinas y baños.

Otros avances relacionados con sensores, también han sido desarrollados en aplicaciones específicas, tal como los interruptores por falla de arco (AFCI: Arc Fault Circuit Interrupters), con lo que se intenta sensar características de corriente y voltaje típicas de los arcos eléctricos e interrumpir de esta forma la corriente, extinguiendo así el arco; también los interruptores por escape de corriente (LCDI: Leakage Current Detection and Interruption), que son dispositivos de última tecnología similares a los AFCI, pero diseñados para sensar características propias de cualquier daño en los conductores que suplen la corriente por donde la corriente pueda comenzar a tener un escape aunque sea mínimo, y de esta forma interrumpir el suministro. Esta última es una aplicación muy especializada y de muy alta sensibilidad, con la cual el elemento electrónico de control puede interrumpir el suministro en menos de 25 milisegundos, o sea mucho más rápido que un pestañeo.

La segunda opción se da cuando algún dispositivo que utilice energía eléctrica se calienta, convirtiéndose en una fuente generadora de calor por medios de conducción, convección y radiación, hacia los materiales que lo rodean. Este caso no ha sido tan estudiado como el anterior, y hacer un modelo del mismo incluiría un análisis tanto de la fuente generadora (el elemento eléctrico), como del medio ambiente que rodea la fuente

para poder estipular como se transmite el calor desde la fuente hasta alcanzar un material que tenga un punto de ignición lo suficientemente bajo para entrar en el triángulo del fuego, y luego si tiene las condiciones apropiadas pasará al tetraedro del fuego convirtiéndose en un incendio propiamente dicho. En ésta tesis nos ocuparemos de generar el modelo de la fuente generadora de potencia en forma de calor, pues el modelo de difusión de calor ya ha sido desarrollado y se llama ecuación general de conducción de calor con generación interna; y en los casos que se ha probado funciona muy bien. En el caso eléctrico le hace falta un modelo matemático que se ajuste bien a la fuente generadora o sea el conductor.

Cuando la fuente puede ser considerada puntual con respecto al medio, el análisis de la fuente puede ser hecho por medio de un modelo determinista de amontonamiento de masas (el cual no considera variantes internas, sino características constantes en todo el volumen de la fuente), para facilitar la matemática del modelo general; sin embargo el análisis del medio debe ser por medio de un modelo determinista de campo (el cual considera variables continuas a lo largo del volumen del medio analizado); pues de lo contrario no será lo suficientemente aproximado, como para representar el fenómeno que se intenta describir. De forma general, el nivel de aproximación del modelo dependerá de que tantas variables decida cada investigador incluir en su modelo; y realmente, en cualquier modelo de ignición son tantas que siempre hay que detenerse antes de comenzar, a analizar simplemente las variables, y a veces esto que debe ser simple, se vuelve complicado, y aún no se comienza.

Uno de los casos mas sencillos de este tipo de generación de incendios es la generación de calor de un conductor eléctrico, en cantidades y condiciones suficientes para que el mismo se transmita hasta un combustible que pueda reaccionar por medio de combustión. En este caso por ejemplo, el conductor eléctrico en si puede ser analizado por medio de la teoría de campos electromagnéticos, sin embargo la energía calórica producida y transmitida por conducción de calor al aislante o dieléctrico que generalmente lo cubre deberá analizarse por medio de las teorías de transferencia de calor; con lo que se vuelve un buen consejo, como ya mencionamos antes, utilizar la ecuación diferencial de difusión de calor con generación interna, como complemento al modelo de la fuente generadora; y la fuente generadora o “fuente de calor” que es el conductor visto como el ente generador del calor inicial del incendio, tendrá un modelo que depende de muchas variables, como lo son la forma del mismo o los mismos, resistividad de los medios, temperaturas de los mismos, temperaturas del ambiente que los rodean, variables de éstas

temperaturas por causa de corrientes convectivas, radiaciones u otras situaciones, interacciones electromagnéticas de las corrientes y sus formas (inductivas por ejemplo), y muchas otras variables que pueden o no ser consideradas dentro del modelo, dependiendo del balance entre la exactitud y maniobrabilidad matemática que se le quiera dar al mismo.

La combinación de condiciones también es una opción, hasta ahora no se conoce de estudios en los cuales se haya experimentado y recopilado datos de este tipo de eventos, pero no es difícil imaginar que si el primer elemento que pierde sus propiedades ante la termoconducción en un recalentamiento eléctrico es el aislante del conductor, es muy posible que se de la ruptura del mismo, formando un arco eléctrico, el cual produce calor mucho mas rápidamente que la termoconducción del conductor eléctrico hacia el combustible, por lo tanto será mucho mas probable llegar a la temperatura de ignición del combustible por la generación de calor del arco que por la generación de calor del conductor.

En otros casos mucho mas complejos, el almacenamiento de calor es el factor determinante; pues ciertas estructuras pueden ir almacenando calor en un tiempo muy elongado, y una pequeña generación interna de calor como un conductor (aparentemente en buen estado, sin necesidad de estar sobrecalentado) puede ser fuente suficiente de calor para alimentar este almacenamiento por tiempo suficiente para que en algún momento se de la ignición del combustible que alcance su temperatura de ignición por almacenamiento de calor. En estos casos, la mayor parte del tiempo se habla de autoignición, pues no hay una fuente aparente de ignición, y el combustible se ignita prácticamente solo; sin embargo, es necesaria una fuente que alimente el almacenamiento de calor, y esta bien puede ser también un conductor eléctrico por medio de la termoconducción. La presente tesis presenta un análisis profundo de esta condición.

De todo lo que he expuesto el punto más importante a considerar es que todo elemento eléctrico por pequeño que sea representa una fuente de energía, y potencialmente en un análisis de riesgo de incendio, representa un factor más en la posibilidad de la ignición. Es muy difícil en el momento de los diseños considerar todas las situaciones posibles; sin embargo mientras mas se consideren, menos elementos de riesgo habrán una vez desarrollados los proyectos. La seguridad es primero, y cuando se habla de vidas humanas, primero, segundo y tercero.



Orden de Indices

Índice	xv
Relación tablas	xxiii
Relación figuras	xxiv
Simbología	xxix
Glosario de Términos (Siglas)	xxxii



INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 0. Introducción, Justificación y Planteamientos Preliminares de la Investigación.	1
0.1 Introducción	3
0.2 Objetivos	5
0.2.1 Objetivo General	5
0.2.2 Objetivos Específicos	5
0.3 Justificación	6
0.3.1 Identificación de las principales responsabilidades	6
0.3.2 Importancia del modelo	7
0.4 Descripción de la situación teórica del ámbito de investigación (Planteamiento del Problema Teórico General)	9
0.5 Objeto de Estudio	9
0.6 Cuestiones a responder mediante la investigación	10
0.7 Metodología utilizada en la investigación	10
CAPITULO I. Formulación de la Hipótesis	13
1.1 Análisis del Estado Actual de las Cosas	14
1.2 Análisis del Estado Crítico de las Cosas	15
1.3 Análisis de Otras Situaciones Posibles	16
1.4 Exposición de una Posible Solución	17
1.5 Formulación de la Hipótesis	18
CAPITULO II. Actualidad de los Sistemas de Protección Contra Incendios en Edificaciones (La Situación Actual de las Cosas).	21
2.1 Estado Actual del Campo de la Investigación de Protección Contra Incendios	22
2.2 Ejemplos Seleccionados de Casos Documentados con Investigaciones Anteriores a Nivel Mundial.	25
2.2.1 Incendio a Gran Altura (High Rise Building) en Rockefeller Center	25

2.2.2	Incendio de Hotel en MGM Grand Las Vegas	32
2.2.3	Incendio de Central Telefónica de Los Angeles	38
2.2.4	Incendio de Fábrica Industrial Kader Industrial Co LTD	40
2.2.5	Incendio en Paxton Hotel	43
2.3	Resumen y Conclusiones Generales de la Situación Actual de las Cosas	44
2.4	Bibliografía Relacionada del Capítulo II	45

CAPITULO III. Teorías, Modelos y Definiciones de utilidad actualmente. (El Estado del Arte de la Ciencia del Fuego) 47

3.1	Las teorías actuales	50
3.1.1	El triángulo y el tetraedro del fuego	50
3.1.2	Otras definiciones teóricas básicas importantes en la ciencia del fuego	52
3.1.2.1	Atomo	52
3.1.2.2	Arco eléctrico	52
3.1.2.3	Calor	52
3.1.2.4	Calor de reacción	53
3.1.2.5	Campo electromagnético	53
3.1.2.6	Chispa eléctrica	53
3.1.2.7	Combustible	54
3.1.2.8	Combustión	54
3.1.2.9	Conducción (de Calor)	54
3.1.2.10	Convección	54
3.1.2.11	Corriente eléctrica	55
3.1.2.12	Elemento químico	55
3.1.2.13	Encendido	55
3.1.2.14	Energía	55
3.1.2.15	Escalar (física-matemática)	56
3.1.2.16	Estequiométrico	57
3.1.2.17	Evaporación	57
3.1.2.18	Fasor (electricidad-matemática)	57
3.1.2.19	Flama o Llama	57
3.1.2.20	Fórmula química	57
3.1.2.21	Función matemática	57

3.1.2.22	Fusión	57
3.1.2.23	Ignición	58
3.1.2.24	Impedancia eléctrica	58
3.1.2.25	Isótopo	58
3.1.2.26	Modelo	58
3.1.2.27	Mole	59
3.1.2.28	Molécula	59
3.1.2.29	Pirolisis	59
3.1.2.30	Plano complejo	59
3.1.2.31	Potencia eléctrica	60
3.1.2.32	Radiación	60
3.1.2.33	Rata de Liberación de Calor (HRR)	60
3.1.2.34	Reacción química	61
3.1.2.35	Sublimación	61
3.1.2.36	Temperatura	61
3.1.2.37	Tensor (física-matemática)	61
3.1.2.38	Transferencia de Calor	62
3.1.2.39	Vector (física-matemática)	62
3.1.2.40	Voltaje	63
3.1.3.	Teoría de la Extinción del Fuego	63
3.1.4.	Clasificación de los tipos de Incendio	64
3.2.	Los Modelos Actuales	65
3.2.1.	Tipos de Modelos	67
3.2.1.1.	Modelos Físicos	69
3.2.1.1.1.	Modelos A Escala	69
3.2.1.1.1.1.	Modelos a Escala Completa	71
3.2.1.1.2.	Modelos Fuera de Escala	71
3.2.1.2.	Modelos Matemáticos	72
3.2.1.2.1.	Modelos Deterministas	72
3.2.1.2.1.1.	Modelos de Amontonamiento de Masas (Lumped-Mass Models)	74
3.2.1.2.1.2.	Modelos de Campo	74
3.2.1.2.2.	Modelos Probabilistas	75
3.2.1.2.2.1.	Modelos de red	75
3.2.1.2.2.2.	Modelos Estadísticos	76

3.2.1.2.2.3.	Simulaciones Probabilistas	76
3.3.	Ejemplos de Aplicaciones Actuales de la Teoría y Modelado en la Ciencia del Fuego	77
3.3.1.	Predicción de Riesgos	77
3.3.2.	Análisis de Sensitividad	77
3.3.3.	Reconstrucción de Incendios	78
3.3.4.	Modelado por Computador para Diseño Basado en Desempeño (Performance-based design)	79
3.4.	Resumen y Conclusiones del Estado del Arte de la Ciencia del Fuego	79
3.5.	Bibliografía Relacionada del Capítulo III	80
CAPITULO IV. Tecnologías de utilidad en la época actual. (El Estado del Arte de la Tecnología)		81
4.1.	Las tecnologías que se aplican actualmente	83
4.2.	Tecnologías de Información y Software	84
4.3.	Tecnologías de Materiales	85
4.4.	Tecnologías de Medios de Egreso	87
4.5.	Tecnologías de Almacenamiento, Orden e Higiene	91
4.6.	Tecnologías de Procesos, Instalaciones y Equipamientos Especializados	93
4.7.	Tecnologías de Seguridad de Detección y Alarmas	96
4.7.1.	Tipos de Señales	96
4.7.2.	Componentes Básicos del Sistema de Alarmas de Incendio	97
4.7.2.1.	Unidad de Control del Sistema	97
4.7.2.2.	Fuente de Poder Primaria o Principal	97
4.7.2.3.	Fuente de Poder Secundaria o de “Stand By”	97
4.7.2.4.	Circuitos y Dispositivos	98
4.7.2.4.1.	Circuitos con dispositivos iniciadores (IDC)	98
4.7.2.4.2.	Circuitos con aplicaciones de notificación (NAC)	99
4.7.2.4.3.	Circuitos de línea señalada (SLC)	99
4.7.3.	Tipos de Sistemas	99
4.7.3.1.	Sistemas de Protección de Locales	99
4.7.3.2.	Sistemas de comunicación de emergencia de voceo y alarma	100
4.7.3.3.	Sistema de Estación Central de Alarma de Incendios	100
4.7.3.4.	Sistema Propietario	101

4.7.3.5.	Sistema de Estación Remota	102
4.7.3.6.	Sistema Auxiliar	102
4.8.	Tecnologías de Supresión de Incendios a Base de Agua	103
4.8.1.	Sistemas de Extinción con Mangueras de Incendio	103
4.8.2.	Sistemas Automáticos de Rociadores Contra Incendio	106
4.8.3.	Otras tecnologías de supresión de incendios a base de agua	110
4.8.3.1.	Sistemas de Rocío de Agua de Ultra Alta Velocidad (Ultra-High Speed)	110
4.8.3.2.	Sistemas de Supresión de Incendios por Niebla de Agua (Water Mist)	111
4.8.3.3.	Sistemas de Rocío de Agua por Válvulas de Diluvio y Boquillas Abiertas (Water Spray)	112
4.8.3.4.	Sistemas de combinación de agua y otros agentes	113
4.8.4.	Fuentes de Suministro de Agua	114
4.9.	Tecnologías de Supresión de Incendios con Otros Agentes	115
4.9.1.	El Dióxido de Carbono	116
4.9.2.	Halones y Agentes Limpios Gaseosos	116
4.9.3.	Sistemas a base de Espuma o Foam	116
4.9.4.	Agentes Químicos	118
4.9.5.	Extinguidores	119
4.9.6.	Protección Contra Explosiones	120
4.10.	Tecnologías de Protección Pasiva	124
4.11.	Tecnologías de Confinamiento del Fuego y Locaciones Defensoras (Defend-in-Places)	125
4.12.	Tecnologías de climatización, ventilación, presurización e implicaciones relacionadas	126
4.13.	Tecnologías de equipos con vapor y combustibles para servicios estáticos.	127
4.14.	Tecnologías Eléctricas y Electrónicas	128
4.14.1.	Conductores Eléctricos	129
4.14.2.	Equipos de distribución eléctrica	130
4.14.3.	Dispositivos de protección por interrupción automática	130
4.14.4.	Dispositivos para locaciones de alto riesgo (Hazardous Locations)	133
4.14.5.	Otras tecnologías de protección eléctrica	133
4.15.	Tecnologías de Transportación	134
4.16.	Bibliografía Relacionada del Capítulo IV	135

CAPITULO V. Fundamento Teórico de un Modelo de Incendio de tipo Termo-Conductivo. (Bases Físico-Matemáticas comprobables basadas en modelos anteriores)	139
5.1. Bases técnicas de un modelo termo-conductivo	140
5.2. Modelos matemáticos actuales que soportan el modelo termo-conductivo	141
5.2.1. Modelos de Ignición	141
5.2.1.1. Ignición de Mezclas Inflamables de Aire/Vapor	143
5.2.1.2. Ignición de Líquidos	166
5.2.1.2.1. Clasificación de Líquidos Inflamables y Líquidos Combustibles	178
5.2.1.2.1.1. Clasificación según la NFPA	179
5.2.1.2.1.2. Clasificación según la norma Británica	179
5.2.1.3. Ignición de Sólidos	180
5.2.1.3.1. La ecuación general de difusión de calor	182
5.3. Bibliografía Relacionada del Capítulo V	191
CAPITULO VI. Deducción de un Modelo Matemático para una Fuente Generadora de Incendios Eléctricos por Termo-conducción	193
6.1 Consideraciones introductorias a la deducción del modelo.	194
6.2 Deducción de un modelo que relacione el Voltaje y la Corriente en un Conductor, cuando el mismo se encuentra fuera de su rango normal de operación.	196
6.2.1 La composición de la materia y su relación con la energía	196
6.2.2 El movimiento de cargas y la materia.	200
6.2.3 Formación de la Corriente en un Conductor.	204
6.2.4 Continuidad de la Corriente en un Conductor.	210
6.2.5 Un punto de vista simple acerca de la cinemática de las cargas.	215
6.2.6 Buscando la forma general de la Ley de Ohm a partir de la forma puntual.	227
6.2.7 Corrección de la Ley General de Ohm; su dependencia con la temperatura.	233
6.2.8 Encontrando un modelo que reemplace a la Ley de Ohm y que tome en cuenta funciones variables con la temperatura sin necesidad de aproximarlas a constantes.	241
6.2.9 Análisis físico y geométrico de un conductor lineal.	246

6.2.10	Encontrando un modelo que reemplace a la Ley de Ohm, que tome en cuenta funciones variables con la temperatura y que considere el análisis físico y geométrico del conductor.	250
6.3	Relación entre la Energía Eléctrica y el Calor Disipado, adaptada a nuestro modelo.	251
6.3.1	La ley de Joule aplicada.	251
6.3.2	El modelo de la fuente generadora de potencia eléctrica en forma de calor.	255
6.4	Bibliografía Relacionada del Capítulo VI.	257
CAPITULO VII. Pruebas Experimentales de Fuentes Eléctricas Generadoras de Incendios por Termoconducción.		259
7.1	Listado de Materiales básicos a utilizar en las pruebas experimentales.	260
7.1.1	Cámara termográfica FLIR i60.	260
7.1.2	Medidor de Voltajes, Corrientes y Ohmiaje de alta precisión.	261
7.1.3	Voltímetro-Ohmímetro y Amper Clamp de alta precisión.	261
7.1.4	Resistores de alta potencia.	262
7.1.5	Potenciómetro de alta potencia.	263
7.1.6	Fuente de energía de Corriente Directa (DC) de alto amperaje.	264
7.1.7	Cables eléctricos de fabricación y calibres comerciales AWG.	264
7.1.7.1	Tablas de conversión para alambres y cables de calibres comerciales AWG.	265
7.2	El Circuito de Pruebas.	271
7.3	La construcción del circuito.	272
7.4	El Método de Pruebas	275
CAPITULO VIII. Análisis de Resultados Experimentales y el Modelo		277
8.1.	Resultados Experimentales	278
8.2.	Termografías	282
8.2.1.	Cable 14 AWG, recubierto CBX	282
8.2.2.	Cable 16 AWG, recubierto HWY	282
8.2.3.	Cable 18 AWG, recubierto CBX	283
8.2.4.	Cable 20 AWG, recubierto HWY	284
8.2.5.	Cable 24 AWG, recubierto HWY	284
8.3.	Análisis Gráfico	288

8.4.	Aproximación de los valores reales al modelo	294
8.4.1.	Exactitud del modelo lineal	294
8.4.2.	Exactitud del modelo integral	298
CAPITULO IX. Conclusiones, Aportaciones y Recomendaciones		305
9.1	Conclusiones	306
9.2	Aportaciones	309
9.3	Recomendaciones	310
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS		311
ANEXOS		321
Anexo 1-	Cálculo de la Fiabilidad de algunos elementos del Sistema de Supresión Automática Contra Incendios (datos del Anexo 2)	322
Anexo 2-	Ejemplo de Cálculo de Fiabilidad Global de un Sistema de Protección Contra Incendios y Repercusiones de los Cambios y Consideraciones de Diseño	328
Anexo 3-	Tabla de grosores AWG (American Wire Gauge)	339
Anexo 4-	(Artículo “in press” en revista científica indexada) “Propuesta de un modelo matemático para calcular el calentamiento de conductores eléctricos”	341
Anexo 5-	(Artículo en revisión por revista científica indexada) “El recalentamiento eléctrico termoconductor en las edificaciones”	354

RELACIÓN DE TABLAS

N° Tabla	Título	Apartado	Pág.
4.8.2.1.	Clasificación simple de los rociadores de acuerdo a su temperatura de activación y colores para su identificación visual	4.8.2.	109
4.9.6.1.	Cadena general de eventos de las explosiones	4.9.6.	123
5.2.1.1.1.	Resumen de ecuaciones según el modelo de Frank-Kamenetskii aplicadas a las condiciones geométricas mas comunes	5.2.1.1.	165
5.2.1.2.1.1.1.	Resumen de la clasificación de líquidos inflamables y combustibles de la NFPA	5.2.1.2.1.1.	179
6.2.1.1.	Organización de las tres generaciones de partículas elementales (Fermions) contempladas en el Modelo Standard	6.2.1.	199
6.2.7.1.	Valores estándar de resistividad inicial (Ω .metro), para los materiales mas comunes	6.2.7.	236
7.1.7.1.1.	Tabla de propiedades de conductores comerciales estandarizados AWG	7.2.7.1.	270
7.4.1.	Presenta las variables controladas (para experimentación)	7.4.	276
8.1.1.a.	Tabla de resultados de pruebas	8.1.	279
8.1.1.b.	Tabla de resultados de pruebas	8.1.	279
8.1.1.c.	Tabla de resultados de pruebas	8.1.	280
8.1.1.d.	Tabla de resultados de pruebas	8.1.	280
8.1.1.e.	Tabla de resultados de pruebas	8.1.	281
8.4.1.1.	Resultados del modelo lineal	8.4.1.	297
8.4.2.1.	Resultados del modelo integral	8.4.2.	303

RELACIÓN DE IMÁGENES

Nº Imagen	Título	Apartado	Pág.
1	Representación gráfica del Triángulo del Fuego para describir la combinación de elementos necesarios para llevar a cabo la ignición	Resumen	ix
2	Representación gráfica del Tetraedro del Fuego para describir la combinación de elementos necesarios para tener un fuego mantenido	Resumen	ix
2.2.1.1.	Muestra la vecindad del switchgear en el 5to piso del Rockefeller Center, donde se determina el comienzo del incendio.	2.2.1.	27
2.2.1.2.	Cableado puesto sobre “soportes abiertos” sobre el switchgear en el 5to piso del Rockefeller Center, causa crítica del incendio.	2.2.1.	28
2.2.1.3.	Se muestra como el cableado que se había ido agregando con el tiempo iba siendo comprimido entre los soportes y la viga I...	2.2.1.	29
2.2.1.4.	Se muestra el agujero abierto en un muro resistivo contra fuego para dar paso a los cables eléctricos.	2.2.1.	32
2.2.2.1.	Se muestra la fase del incendio donde aún la mayor parte de la afección esta en los pisos bajos y comienza a tomar la torre.	2.2.2.	33
2.2.2.2.	Se muestra el plano del restaurante DELI donde tuvo origen el incendio por causas eléctricas.	2.2.2.	35
2.2.2.3.	Se muestra la máquina de servicio y conexiones eléctricas que dieron origen al incendio.	2.2.2.	36
2.2.2.4(a)	Se muestran los detalles de conexión de la máquina de servicio y conexiones eléctricas que dieron origen al incendio	2.2.2.	36
2.2.2.4(b)	Se muestran los detalles de conexión de la máquina de servicio y conexiones eléctricas que dieron origen al incendio	2.2.2.	36
2.2.2.5.	Se muestra como los gases tóxicos tomaron todo el hotel haciéndolo una chimenea de gases por las aberturas desprotegidas	2.2.2.	37
2.2.4.1.	Se muestra la distribución y afecciones de la planta Kader Industrial en Tailandia por el incendio de 1993	2.2.4.	42
2.2.5.1.	Se muestra la distribución y afecciones del hotel Paxton al momento de llegada de los bomberos en el incendio de 1993.	2.2.5.	44
3.1.1.1.	Representación gráfica del Triángulo del Fuego para describir la combinación de elementos necesarios para llevar a cabo la ignición	3.1.1.	51
3.1.1.2	Representación gráfica del Tetraedro del Fuego para describir la combinación de elementos necesarios para tener un fuego mantenido	3.1.1.	51

3.2.1.1.	Organigrama de la clasificación del modelado en Ingeniería de Protección contra Incendios	3.2.1.	68
3.2.1.1.2.1.	Gráfica de la prueba ASTM E119 realizada con Horno Vertical de Escala Pequeña (Small Scale Vertical Furnace)	3.2.1.1.2.	72
4.3.1.	Muestra la Prueba de la Píldora de Methiamine	4.3.	86
4.4.1.	Triángulo de la Percepción de Pierce	4.4.	88
4.4.2.	Interpretación gráfica del Triángulo de la Percepción de Pierce	4.4.	89
4.5.1.	La imagen muestra el apilamiento de materiales sin ningún orden específico dentro de una galera...	4.5.	93
4.8.1.1.	Conexión siamesa típica utilizada por el cuerpo de bomberos para alimentar los sistemas de supresión de incendios en edificaciones.	4.8.1.	106
4.8.2.1.	Esquema de la activación de un rociador automático de accionamiento tipo fusible.	4.8.2.	107
4.8.2.2.	Se muestra la activación de un rociador en el momento de una prueba para el sistema de un edificio de gran altura.	4.8.2.	108
4.8.3.3.1.	Verificación del sistema de Water Spray de transformadores de potencia eléctrica de una planta generadora.	4.8.3.3.	113
4.8.4.1.	Inspección por parte de la Oficina de Seguridad del Cuerpo de Bomberos de un sistema de bombeo para incendios impulsado eléctricamente	4.8.4.	115
4.9.3.1.	Equipo de foam descargando sobre la superficie de un combustible	4.3.9.	117
4.9.3.2.	Incendio de un tanque de combustible líquido	4.3.9.	118
4.14.1.1.	Se muestran gráficamente la cantidad de conductores requeridos para transportar 2000 amperios en 3 fases con neutro y hasta 600 voltios.	4.14.1.	130
4.14.3.1.	Se muestran dos breakers programables con cerebro electrónico Microversatrip fabricados por General Electric ...	4.14.3.	132
4.14.5.1.	Se muestra un panel aislado trifásico fabricado por Square D	4.14.5.	134
5.2.1.1.1.	Se han dibujado los comportamientos esquemáticos de la Rata de Liberación de Calor de un volumen de reacción, junto a la Rata de Pérdida de Calor hacia el medio que rodea el volumen de reacción.	5.2.1.1.	145
5.2.1.1.2.	Se representa el perfil de temperatura entre el volumen reaccionante y el medio, propuesto por Semenov en su modelo.	5.2.1.1.	149
5.2.1.1.3.	Representación gráfica del modelo de Semenov aplicable a la ignición espontánea.	5.2.1.1.	150
5.2.1.1.4.	Se representa el perfil de temperatura entre el volumen reaccionante y el medio, propuesto por Frank-Kamenteskii en su modelo.	5.2.1.1.	164
5.2.1.2.1.	Se muestra la distribución típica de concentración de	5.2.1.2.	167

	vapores combustibles sobre la superficie del líquido que los libera con respecto a la distancia en altura...		
5..2.1.2.2.	Muestra gráficamente la forma como se comportan los fenómenos de ignición de líquidos combustibles...	5.2.1.2.	174
5.2.1.2.3.	Muestra gráficamente una condición de comportamiento de los fenómenos de ignición de líquidos combustibles...	5.2.1.2.	177
5.2.1.3.1.1.	Barra unidimensional donde se muestra un pequeño elemento de longitud para análisis de difusión de calor en un instante.	5.2.1.3.1.	183
5.2.1.3.1.2.	Barra unidimensional donde se muestra un pequeño elemento de longitud para análisis de difusión de calor y se representa el dominio del análisis en un lapso de tiempo.	5.2.1.3.1.	185
6.2.2.1.	Representación gráfica de la estructura atómica de un átomo de uranio...	6.2.2.	202
6.2.3.1.	Representación gráfica de un flujo de cargas uniformes, a través de un elemento diferencial de superficie.	6.2.3.	205
6.2.4.1.	Representación gráfica de una densidad de corriente fluyendo a través de un volumen cualquiera.	6.2.4.	210
6.2.4.2.	Representación de una vista de perfil de los valores de corriente en un punto y corriente sobre toda el área transversal del cuerpo.	6.2.4.	213
6.2.5.1.	Representación gráfica sencilla de un espacio con 3 portadores de carga y 4 posibles choques entre ellos...	6.2.5.	219
6.2.7.1.	Representación gráfica de la función de resistividad linealizada	6.2.7.	234
6.2.7.2.	Representación gráfica de una función de resistividad linealizada y corregida para una temperatura inicial diferente de cero.	6.2.7.	235
6.2.9.1.	Representación gráfica de un conductor lineal cualquiera	6.2.9.	246
7.1.1.1.	Cámara termográfica FLIR Systems, modelo i60	7.1.1.	261
7.1.3.1.	Kid de mediciones eléctricas industriales de alta precisión de EXTECH INSTRUMENTS, modelo KT430-IR	7.1.3.	262
7.1.4.1.	Resistores de alta potencia (especiales para trabajo con altas ampacidades)	7.1.4.	263
7.1.5.1.	Potenciómetro de alta potencia para realizar ajustes finos en la ampacidad del circuito	7.1.5.	263
7.1.6.1.	Fuente de energía D.C. fabricada por Autocraft, modelo 27CHD-MF	7.1.6.	264
7.1.7.1.1.	Cables que serán probados en éste experimento...	7.1.7.1.	270
7.2.1.	Representación gráfica del circuito de pruebas experimentales.	7.2.	271
7.3.1.	Terminal de conexión a la fuente de energía fabricado con alambre sólido # 12 AWG	7.3.	272

7.3.2.	Conexión inicial al resistor de alta potencia.	7.3.	273
7.3.3.	Resistor de alta potencia con sus terminales aseguradas con soldadura por termofusión de estaño.	7.3.	274
7.3.4.	Circuito de pruebas listo para entrar en funcionamiento solo al conectar el terminal positivo de la fuente de energía.	7.3.	275
8.2.1.1(a)	Termografía de conductor calibre 14 AWG	8.2.1.	282
8.2.1.1(b)	Termografía de conductor calibre 14 AWG	8.2.1.	282
8.2.2.1.	Termografía del conductor 16 AWG portando 3.61 amperios de corriente.	8.2.2.	283
8.2.3.1.	Termografía del conductor 18 AWG portando 5.17 amperios de corriente.	8.2.3.	284
8.2.4.1.	Termografía del conductor 20 AWG portando 5.27 amperios de corriente.	8.2.4.	284
8.2.5.1.	Termografía del circuito completo con el conductor 24 AWG sin carga.	8.2.5.	285
8.2.5.2.	Termografía del conductor 24 AWG portando poco mas de 1 amperio.	8.2.5.	285
8.2.5.3.	Termografía del conductor 24 AWG portando cerca de 2 amperios.	8.2.5.	286
8.2.5.4.	Termografía del conductor 24 AWG portando mas de 2.5 amperios.	8.2.5.	286
8.2.5.5.	Termografía del conductor 24 AWG portando 3.4 amperios.	8.2.5.	286
8.2.5.6.	Termografía del conductor 24 AWG portando 4.89 amperios.	8.2.5.	287
8.2.5.7.	Termografía del conductor 24 AWG portando cerca de 8.4 amperios.	8.2.5.	287
8.2.5.8.	Termografía del conductor 24 AWG portando unos 13 amperios.	8.2.5.	287
8.3.1.	Gráfico de Temperatura vs Corriente en cable 18 AWG.	8.3.	288
8.3.2.	Gráfico de Temperatura vs Corriente en cable 20 AWG	8.3.	289
8.3.3.	Gráfico de Temperatura vs Corriente en cable 24 AWG, con pruebas fuera del rango de operación	8.3.	290
8.3.4.	Gráfico de Resistencia vs Corriente en cable 24 AWG, con pruebas fuera del rango de operación.	8.3.	291
8.3.5.	Grafico de Resistencia vs Temperatura cuando fluye también Corriente en cable 24 AWG, con pruebas fuera del rango de operación.	8.3.	292
8.3.6.	Cable 24 AWG en el momento que derrite su aislante a 150°C con aproximadamente 13 amperios de corriente.	8.3.	293
8.3.7.	Se muestra una zona del cable 24 AWG que perdió todo su aislante; en caso de encontrarse cerca de otro conductor, el incendio se hubiese vuelto termoconductor y por corto circuito.	8.3.	293

8.4.1.1.	Muestra la comparación entre las potencias medidas y calculadas según el modelo lineal con función de incremento térmico constante.	8.4.	298
8.4.1.2.	Muestra la comparación entre las potencias medidas y calculadas según el modelo integral.	8.4.	304
9.1.1.	Vista de un elemento conductor eléctrico tipo electrobarra que ha pasado por un fallo por sobrecalentamiento que debilitó el aislante propiciando la formación de arcos entre las 3 fases vivas y tierra	9.1.	308

SIMBOLOGÍA

Los símbolos matemáticos se estipulan en su orden de aparición en la tesis.

D	diámetro o escala física.
Q	liberación de calor HRR
V	velocidad del medio; volumen; voltaje.
HRR	Rata de Liberación de Calor
L	Altura promedio de la llama; longitud.
E_A	Energía de Activación
R	Constante universal de los gases
T	Temperatura
A	Factor pre-exponencial
ΔH_c	Calor de combustión
L_n	Rata de pérdida de calor hacia el medio
Bi	Número de Biot
k_b	Conductividad térmica del cuerpo (para Biot)
L_c	Longitud característica del cuerpo (para Biot)
h	Coefficiente de transferencia de calor del medio.
S	Area superficial del volumen de reacción.
ΔT	diferencia térmica, o diferencial térmico.
\dot{q}	energía por unidad de tiempo generada por unidad de volumen.
α	difusividad térmica del material; función de incremento térmico del conductor.
C	Calor específico; constante no determinada.
∇	Operador diferencial Nabla.
∇^2	Operador diferencial Laplaciano.
R	Radio
UFL	Límite superior de inflamabilidad
LFL	Límite inferior de inflamabilidad
C_p	Calor específico a presión constante.
ρ	densidad de masa; densidad de carga.

g	Generación interna de energía por unidad de volumen.
m_i	masa de i
\vec{E}	Campo eléctrico
q_i	carga eléctrica i
\vec{F}	Fuerza
\vec{J}	Densidad de Corriente Eléctrica
I	Corriente Eléctrica
\vec{v}	Velocidad
σ_c	Conductividad
V_{AB}	Diferencia de potencial eléctrico o voltaje entre los puntos A y B.
W	Trabajo o energía.
ρ_c	Resistividad
Z	Impedancia compleja
X	Reactancia
G	Conductancia
B	Susceptancia



GLOSARIO DE TERMINOS (SIGLAS)

- ALAS.** *Asociación Latinoamericana de Seguridad.*
- ANSI.** *American National Standards Institute.*
- ASCE.** *American Society of Civil Engineers.*
- ASHRAE.** *American Society of Heating Refrigerating, and Air Conditioning Engineers.*
- ASME.** *American Society of Mechanical Engineers*
- ASQC.** *American Society for Quality Control.*
- ASTM.** *American Society for Testing and Materials*
- AWWA.** *American Water Works Association.*
- BLEVE.** *Boiling liquid expanding vapor explosion.*
- BSCW.** *Basic Support for Cooperative Working.*
- BS.** *British Standard.*
- BSI.** *(British Estándar Institute).* *Institución de Normalización Británica.*
- CE.** *Comunidad Europea.*
- CEN.** *European Committee for Standarization.*
- CEPREVEN.** *Centro Nacional de Prevención de Daños y Pérdidas.*
- CFD.** *Computational Fluid Dynamics (modelado por ordenador).*
- CFPS.** *Certified Fire Protection Specialist.*
- EOQC.** *European Organization for Quality Control.*
- ESFR.** *Early Supression Fast Response (Sprinklers).*
- FM.** *Factory Mutual (Research Corporation).*
- HRR.** *Heat Release Rate.*
- ICC.** *International Code Council.*
- IEC.** *International Electrotechnical Commission.*
- ISO.** *International Standar Organization.*
- LFL.** *Lower Flammable Limit.*
- NFPA.** *National Fire Protection Association.*
- SFPE.** *Society of Fire Protection Engineers.*
- UBC.** *Uniform Building Code.*
- UE.** *Unión Europea*



UL. *Underwriters Laboratories, Inc.*

ULC. *Canadian - Underwriters Laboratories*

UFL. *Upper Flammable Limit.*

CAPÍTULO II

Introducción, Justificación y Planteamientos Preliminares de la Investigación

EN ESTE CAPÍTULO:

- 0.1 Introducción
- 0.2 Objetivos
 - 0.2.1 Objetivo General
 - 0.2.2 Objetivos Específicos
- 0.3 Justificación
 - 0.3.1 Identificación de las principales responsabilidades
 - 0.3.2 Importancia del modelo
- 0.4 Descripción de la situación teórica del ámbito de investigación (Planteamiento del Problema Teórico General)
- 0.5 Objeto de Estudio
- 0.6 Cuestiones a responder mediante la investigación
- 0.7 Metodología utilizada en la investigación

CAPITULO 0

Introducción, Justificación y Planteamientos Preliminares de la Investigación

NUESTRO TEMA:

Con el tema presentado se intentará encontrar un modelo matemático que pueda representar con precisión una fuente de calor generado eléctricamente y conducido térmicamente a través de un elemento. Se investigarán los estados actuales de la ciencia y la tecnología y se aplicará investigación y deducción propias para producir el modelo deseado.

Básicamente se intenta definir por medio del desarrollo de éste proyecto, un método de cálculo para aproximar variables que ponen en riesgo la seguridad en el proyecto; incrementando las posibilidades de generación de un incendio de tipo eléctrico que ha sido muy poco estudiado; aquel que tiene su principio generador en la termoconducción de los materiales eléctricos y aquellos materiales que lo rodean, los cuales pueden llegar a un punto de ignición; y no en la chispa eléctrica propiamente dicha.

En las páginas siguientes expondré capitularmente de forma detallada, el contexto de mi investigación; a forma que puedan ser entendidos los porqués de la misma; se estipularán los objetivos, las justificaciones, la importancia, las definiciones del área de estudio, el objeto de estudio; se expondrá la hipótesis, las consideraciones del estado actual y el estado crítico de las cosas, se expondrá el estado del arte del tema investigado, el desarrollo del modelo en si, las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, glosarios, y anexos relacionados con la investigación.

Si bien es cierto, hay mucho material adelantado en investigación acerca del área de protección de incendios; los puntos de vista son de igual manera diversificados en un enorme número, ya que cada quien ha tenido a bien hacer sus observaciones en base a las variables que le interesan; en nuestro caso, tenemos mucha información para ser utilizada, pero generaremos por medio de investigación propia, mucha mas; la cual compararemos con la ya recopilada, para conducir a los modelos mas ajustados y precisos posibles en lo que se refiere a termoconducción de un elemento eléctrico.

0.1. Introducción

Los campos de Seguridad y Medio Ambiente en Ingeniería, han logrado en los últimos tiempos captar grandemente la atención de los investigadores, debido a hechos y situaciones que hemos manejado desde siempre, pero que por magnitudes de capacidad, tamaño y calidad constructiva de los proyectos no representaban sino hasta hace algunos años en el desarrollo evolutivo de la ingeniería, factores determinantes para la conclusión de un proyecto, y variables extremadamente complejas, con fluctuaciones que de no ser previstas sacan de todo control a cualquier proyecto de ingeniería, llevándolo al fracaso.

Aunque la ingeniería existía, habían muy pocos casos de proyectos en donde se hablara de decenas de miles de personas requeridas para su desarrollo y/o ocupación, y aquellos proyectos eran hitos en la historia de la ingeniería; hoy en día, son cosa de todos los días, ya todos los desarrollistas desean sacar el máximo provecho de su inversión, haciendo que año tras año la línea de costo beneficio incremente su altura y pendiente, concibiendo proyectos mas ambiciosos, pero ésta misma ambición representa también mayores dificultades.

Una de estas dificultades es la seguridad del proyecto, definitivamente hay muchos aspectos que tienen que ver con la misma, uno de estos es la confiabilidad del proyecto en lo que respecta a su seguridad contra incendios, lo cual arroja una infinidad de variables posibles que se potencian con el tamaño, las capacidades y la ambición general del proyecto.

Dentro del marco de la seguridad contra incendios del proyecto hay mucho de que hablar; los investigadores y desarrolladores de esta ingeniería han reunido y clasificado hasta ahora a los incendios en muchas maneras dependiendo de la región del mundo en que se encuentren, pero en general las clasificaciones dependen de la agresividad, tipo de reacción e intensidad del material combustible, y materiales constructivos del proyecto que contiene los materiales, con lo que determinan también de forma teórica, como controlarlo.

Independientemente del área o zona regional donde se encuentre, siempre hay un lugar especial para aquel componente producto de la ingeniería, que es el principal causante de incendios en el mundo entero; hablamos de la electricidad artificial. En Europa y Asia, hay 6 clasificaciones (A, B, C, D, E, F), de los cuales el riesgo de electrocución se encuentra en

la clase E, en América por lo general se citan sólo 4 (A, B, C, D) y el riesgo de electrocución se encuentra en la clase C. Siempre hay otras múltiples formas de clasificación aparte de estas, que son las más aceptadas.

No es el objetivo de mi investigación, presentar una nueva clasificación que pretenda ser mejor que las anteriores, pues al ingresar algo nuevo a este tema, sólo lograría ingresar “un nombre mas” a un hecho físico que ocurre de igual forma en cualquier parte del mundo, el incendio; mas que esto, pretendo presentar un estudio que incluye una investigación y análisis lógico, filosófico y matemático adecuados, a una forma puntual de incendio que es el incendio de fuente eléctrica, y específicamente aquel incendio de causa eléctrica que no se da directamente por causa de una “chispa de corriente” o lo que comúnmente conocemos como un “arco”, lo cual ha sido extensamente estudiado en ingeniería eléctrica; sino enfocarme en la parte térmica del proceso, que sucede cuando los conductores de electricidad simplemente se calientan, si puede ésta situación en algún momento representar un peligro de ignición de algún material cercano, o del propio conductor por calentamiento, y si es fuese así, que tanto.

Definitivamente que cuando hablamos de incendios, hablamos primeramente de seguridad pero también hablamos de ambiente, e incluso, aunque no queramos, hablamos de calidad. Con el advenimiento de las ya conocidas familias de normas ISO 9,000 acerca de calidad, ISO 14,000 acerca de medio ambiente, y OSHAS 18,000 acerca de seguridad y salud ocupacional, es totalmente imposible en el día actual hablar de uno de los temas, sin relacionar a los otros dos; sin embargo, dirigiremos nuestra investigación al enfoque del proceso, antes que al enfoque de la normativa existente, de tal forma que los resultados que produzcan puedan tener un carácter puramente físico y global, tanto dentro como fuera de la normativa y que sean resultados aplicables bajo cualquier condición y en cualquier parte del mundo. Con esto pretendo hacer un aporte que alguien mas pueda complementar de forma fácil, ya que será accesible y adaptable a cualquier esquema, igual que los números.

0.2. Objetivos

0.2.1. Objetivo General

Nuestro objetivo principal es conseguir un modelo que pueda llevarnos a la comprensión teórica, hipotética de la forma como puede darse un incendio debido al calor excesivo generado por un conductor eléctrico en un proyecto, dependiendo de las condiciones que encuentre a su alrededor. A éste tipo de conducción de calor la llamaremos termoconducción.

La hipótesis que nos lleva a esto es el hecho de que el calor generado por la corriente eléctrica puede producir ignición espontánea en algún material que a cierta temperatura pueda ser combustible, debilitar el aislamiento y/o derretirlo y dar inicio al incendio.

La duda de la que partimos es que pensamos que no todos los incendios eléctricos requieren de un “arco” para consagrarse como incendio; consideramos que el simple sobrecalentamiento del conductor sin necesidad de llegar propiamente a un gran “arco” puede ser fuente generadora del incendio, y aunque no se forme un arco sino algún otro tipo de incendio, el mismo será de causa eléctrica, y si se forma incendio de arco por debilitamiento del aislante, igualmente la causa primaria será la termoconducción y no un sobrevoltaje.

0.2.2. Objetivos Específicos

- a. Demostrar una relación de tipo determinista, lo suficientemente exacta para que pueda ser utilizada para modelar matemáticamente a un conductor eléctrico cualquiera como una fuente generadora de calor, que pueda causar incendios eléctricos por termoconducción.
- b. Dar suficiente maniobrabilidad al modelo matemático, para que el mismo pueda ser cambiado variando funciones o constantes que puedan ser introducidas de forma simple.
- c. Proporcionar un análisis por medio del cual pueda determinarse en que detalles puede facilitarse o complicarse el modelo presentado, ante una situación específica, en la cual el mismo puede ser aplicado para simular matemáticamente.
- d. Proporcionar una base teórica y práctica del estado del arte de la ciencia y la tecnología en el momento actual, en el campo de la ingeniería de seguridad contra

incendios, sobre la cual el nuevo modelo a presentar en ésta investigación podría tener aplicaciones importantes, y sugerir algunas de ellas.

0.3. Justificación

La presente investigación ha sido realizada para ayudar a conseguir un modelo por medio del cual puedan ser estudiados los casos de incendios que son originados por conductores eléctricos, que sea comprensible a los campos de la ingeniería eléctrica y mecánica; y que este basado en variables de control de ingeniería, antes que en variables estadísticas.

La inmensa cantidad de incendios generados por causas eléctricas, que cobran miles de vidas en el mundo entero cada año, son la base de la fuerza que me impulsó a desarrollar ésta investigación.

0.3.1. Identificación de las Principales Responsabilidades

El objetivo principal de este proyecto es conseguir un modelo que pueda llevarnos a la comprensión teórica, hipotética de la forma como puede darse un incendio debido al calor excesivo generado por un conductor eléctrico; teniendo esto presente podemos identificar nuestras responsabilidades principales dentro del desarrollo del mismo, las cuales consisten primariamente en el desarrollo a conciencia de una forma viable para aproximar a priori las resultantes de calentamiento de un conductor eléctrico, conocidas las características físicas que tiene el mismo, y las condiciones de operación y del medio ambiente circulante.

Las responsabilidades principales puede ser definida desde este punto de vista; y declaradas como:

- a. Llevar a cabo un trabajo de observación detallada de los hechos: Lo cual involucra investigar varios casos de incendios eléctricos reales que puedan ajustarse a las características expuestas de causas por termoconducción, y llevarlos a observación de hechos.
- b. Realizar un trabajo inicial de ponderación de variables: Lo que implica definir cuales de las variables detectadas durante la observación tienen realmente preponderancia para modelar el suceso.

- c. Realizar un trabajo de comparación de hechos y variables: Lo que implica definir por medio de comparación, si realmente las variables definidas como preponderantes, son usuales en todos los eventos investigados.
- d. Investigar las tecnologías actuales y explicaciones científicas que puedan explicar o tratar de explicar los hechos observados: Lo cual implica ponerse al tanto del estado del arte de la ciencia del fuego, y la tecnología relacionada a ella, sobre todo en el caso de incendios eléctricos.
- e. Crear un modelo cuantitativo que utilice de forma eficiente la información recopilada, y que se ajuste o pueda representar de una forma precisa los eventos observados. Esta es la responsabilidad primaria, la cual consiste en crear el modelo matemático por medio del cual puedan modelarse los hechos. El mismo debe ser preciso sin ser exageradamente complicado; debe representar los hechos con precisión aceptable y debe tener variables que puedan ser modificadas para que sea global para diferentes tipos de conductores, materiales, corrientes, formas, etc.

Cumplir con estas cinco responsabilidades, básicamente nos lleva al cumplimiento de los objetivos de nuestro trabajo.

0.3.2. Importancia del modelo

El cumplimiento de las responsabilidades y desarrollo de los objetivos de este proyecto; llevará a la consecución de un modelo matemático que ayudará a predecir condiciones de peligro en sistemas eléctricos en funcionamiento y en aquellos que se estén diseñando. Actualmente no existe ningún modelo conocido por medio del cual puedan calcularse condiciones térmicas inadecuadas para diseños eléctricos en nuevas instalaciones; este modelo puede ocupar esta posición, siempre y cuando los diseñadores ajusten los parámetros que del mismo, a cada uno de sus diseños específicos; por lo cual el modelo debe tener parámetros ajustables.

Para aquellos sistemas existentes, existen medios tecnológicos como termografías que ayudan a determinar malos funcionamientos del sistema; sin embargo son medios que determinan malos funcionamientos independientemente de la causa; pues solamente

indican resultados de puntos calientes y secciones con exceso de liberación de calor; sin determinar causas de una forma directa.

Por medio de un modelo como el propuesto podría determinarse en base de cálculo, la causa mas probable del calentamiento; sin necesidad de inmiscuirse en cambios costosos del sistema para efectos de investigación; y los cambios que se hagan ya serán menos y mas directamente identificados, que aquellos que se hacen para “probar lo que sucede si se cambia una u otra condición”. El modelo permitirá en pocas palabras, predecir que sucedería si se cambian condiciones físicas, sin necesidad de llevarlas a cabo, permitiendo de esta forma, analizar varias situaciones, con lo cual se pueden tomar mejores decisiones.

De aquí la alta importancia que encuentro en desarrollar éste modelo, pues en el estado del arte de las ciencias relacionadas al campo de la ingeniería eléctrica, o de la ingeniería de protección contra incendios; no hay aún algo similar.

El aporte al campo de la Seguridad en el Proyecto, comenzaría desde el diseño del mismo; incluyendo un nuevo método de cálculo para incrementar la seguridad eléctrica del mismo; y continuaría incluso hasta luego de terminado, por su capacidad de aplicación a proyectos existentes.

El Medio Ambiente también se verá beneficiado en el desarrollo del proyecto; pues aparte de su utilidad en la determinación de posibles incendios; por ser un modelo energético, podrán verificarse pérdidas energéticas en los sistemas eléctricos (que son las que se convierten en el calor causante de incendios); y las mismas podrán ser reducidas.

Con lo anterior expuesto, no quedad duda que mas allá de cumplir la normativa existente para cada proyecto, se sobrepasan las mismas, incrementando también la Calidad en el Proyecto; y el trabajo de comunicación será desarrollado, exponiendo desde el punto de vista técnico los beneficios de un proyecto donde se reduce en un porcentaje el riesgo de incendios, se incrementa la calidad y se ayuda al medio ambiente.

Básicamente y en resumen, la inexistencia de un modelo que pueda generar todos estos cambios dentro del proyecto, lo hacen sumamente importante.

0.4. Descripción de la situación teórica del ámbito de investigación (Planteamiento del Problema Teórico General)

La mayor parte de las investigaciones realizadas en el campo de la ingeniería de seguridad contra incendios para proyectos son modelos matemáticos de macro-incendios (incineraciones de proyectos completos) y simulaciones de procesos estocásticos que incluyen una extensa cantidad de variables complejas y con múltiples respuestas, que no han generado hasta ahora aproximaciones que podamos describir como “exactas” en el campo de los incendios eléctricos.

En lo personal considero que el estudio del proceso físico desde lo macro a lo micro como estamos acostumbrados a hacer en ingeniería, en este caso, no ha trabajado como esperamos, por lo que mi propuesta en este caso es comenzar por estudiar un proceso puntual que pueda ser modelado de una manera un poco mas simple, debido a la restricción de las variables, y que de allí se puedan ir tomando referencias para ampliar el modelo hacia lo macro y hacia lo complejo.

Por otra parte las personas que se han interesado en estudiar procesos puntuales, específicamente en la parte de incendios eléctricos, siempre se han enfocado en el arco eléctrico como elemento primario generador del incendio, a mi parecer, el arco ya puede ser definido como un incendio generado, con lo que pretendo ir un poco mas atrás, a buscar un ámbito teórico de generación anterior al arco, que es básicamente el objetivo primario o general de ésta investigación, buscar las condiciones por medio de las cuales puede darse suficiente generación de calor para propiciar un arco, por la vía de la termoconducción y no por la vía del análisis de sobrevoltajes y rupturas instantáneas de resistividad eléctrica de los aislantes como hasta ahora se ha visto.

Propondré un modelo nuevo que pueda ser corroborado con aquellos existentes que sean más aproximados o parcialmente aplicables en cada una de las fases y con hechos reales que han sido documentados.

0.5. Objeto de Estudio

Nuestro objeto de estudio es el incendio eléctrico en su etapa pre-incidentaria, o sea justo antes de su ignición, es decir desde la formación de las condiciones, hasta el momento en que se da la ignición.

0.6. Cuestiones a responder mediante la investigación

Con el desarrollo de éste trabajo se dará una respuesta a la necesidad actual de un modelo para simular condiciones de peligro de incendios por conductores eléctricos y su calentamiento. El mismo modelo podrá ser una solución a la necesidad de un modelo preciso para determinar temperaturas adecuadas dentro de los sistemas eléctricos complejos en el momento de su diseño, ya que el modelo podrá integrarse con ecuaciones de transferencia de calor con el medio que rodea a los conductores.

Podrá darse una respuesta de cálculo para modelado a preguntas como ¿qué sucedería si cambio la densidad de corriente del conductor, o si cambio la forma como se comporta la temperatura ambiental a lo largo del día (o del tiempo de simulación y/o modelado)?.

Podrá calcularse la cantidad de pérdidas energéticas de los conductores de una forma mucho mas precisa, con lo que se aporta grandemente al campo del diseño eléctrico no solo desde el punto de vista de seguridad lo cual es primordial, sino desde el punto de vista medio ambiental, y de calidad.

Se responderán interrogantes puntuales acerca de situaciones reales que se han dado con elementos ya desarrollados y que forman parte del estado del arte de la tecnología, sin embargo han fallado de alguna manera y no ha podido dar explicación a la falla por medio del estado del arte de la ciencia.

Se dará respuesta a ciertas formas cualitativas generales de comportamiento físico, con base a la forma matemática del modelo final.

0.7. Metodología utilizada en la investigación

El enfoque primario de la investigación es la consecución del modelo que buscamos de un incendio eléctrico por causas de sobrecalentamiento y termoconducción. De allí partimos y complementaremos en los momentos que sea propicio, con normativa existente, aportes de investigaciones de otros autores, ecuaciones relacionadas de otros campos de la ingeniería, los cuales pretendemos unificar, por ejemplo el campo de la ingeniería eléctrica, la ingeniería termodinámica y la ingeniería de seguridad.

Los datos serán recabados de informes acerca de hechos acontecidos, varios de los cuales han sido en inspecciones e investigación propia en la que hemos tenido oportunidad de

participar, otros han sido recabados por otros investigadores, y los utilizaremos, y en algún caso, usaremos simulación en pequeña escala en laboratorio.

Los métodos de cálculo que utilizaremos serán matemáticas analíticas, álgebra vectorial, cálculo integral y diferencial; matemática de campos tensoriales, ecuaciones diferenciales parciales y ordinarias, muchas de las cuales posiblemente solo pueden ser resueltas con métodos de soluciones iterativas para ecuaciones analíticas y diferenciales como diferenciación finita, y análisis de elementos finitos, como herramientas principales de cálculo. También incluiremos algo de cálculos estocásticos, de fiabilidad, equilibrio dinámico, trayectoria dinámica de estados y pérdida de estabilidad.

Los pasos a seguir serán en forma muy general:

- a. Formulación de la Hipótesis
- b. Presentación de Hechos
- c. Investigación y resultados analíticos
- d. Utilización de Modelos Matemáticos Aislados por disciplina.
- e. Integración del Modelo
- f. Pruebas del Modelo (primarias)
- g. Análisis de los Resultados
- h. Conclusiones del Modelo



CAPÍTULO I

Formulación de la Hipótesis

EN ESTE CAPÍTULO:

- 1.1 Análisis del Estado Actual de las Cosas
- 1.2 Análisis del Estado Crítico de las Cosas
- 1.3 Análisis de Otras Situaciones Posibles
- 1.4 Exposición de una Posible Solución
- 1.5 Formulación de la Hipótesis

CAPITULO I

Formulación de la Hipótesis

Es un hecho indiscutible, que muchos de los incendios que enfrentamos diariamente a nivel mundial, tienen su inicio en un sistema eléctrico que por una u otra razón, ya sea deterioro, humedad excesiva, encerramiento, etc., logra transformar de alguna forma, la suficiente energía eléctrica en calor, para llegar a la ignición de algún material.

Hasta el día de hoy, mucho se ha discutido acerca de lo que realmente sucede cuando un sistema eléctrico ocasiona un incendio, opiniones encontradas se dan día tras día, y con cada nuevo amanecer una nueva explicación surge apoyando una u otra teoría de ignición por causa de un sistema eléctrico, sin llegar necesariamente a un consenso, una teoría, explicación, o ecuación con la que todos los especialistas estén totalmente de acuerdo acerca del modelado de este tipo de situaciones.

Con el pasar de los años, muchas teorías han sido formuladas, muchas ecuaciones han sido escritas y aproximadas sucesivamente, corrigiendo factores y agregando valor para una mejor aproximación hacia cierta clase de modelos, sin embargo por la inmensa diversidad de variables, al acercarse a un modelo de incendio, se alejan de otro, ganando proximidad para algunos y perdiéndola para otros.

1.1. Análisis del Estado Actual de las Cosas.

Diversas organizaciones de carácter mundial, dedicadas a la investigación y prevención de incendios, realizan grandes esfuerzos por descubrir las causas de los incendios, como se generan, porqué, y cuales son las condiciones primarias necesarias para que se den, y de esa manera poder inhibir dichas condiciones, para prevenir el incendio.

Sin embargo la gran diversidad y aleatoriedad de cada uno de los casos, hace que el análisis estocástico de la generación de un incendio sea tan complicado de modelar, que se convierte antes que en un problema mecánico, en un problema de muy alto grado estadístico, y realmente se han conseguido mejores aproximaciones, siguiendo los modelos estadísticos basados en modelado por ecuaciones de fiabilidad, que los modelos mecánicos basados en ecuaciones de ingeniería controlada, para transferencia de calor y movimiento de masas.

Particularmente, siempre he considerado que este fenómeno se debe a que los modelos mecánicos consideran pocas variables y una aleatoriedad limitada, por el simple hecho de trabajar con un “volumen de control” donde fuera de él, nada es considerado y dentro de él, en la mayor parte de las ocasiones, todo es modelado por ecuaciones continuas, poniendo de esta forma la mirada en un punto del hecho (o en pocos puntos) y no en todo el hecho, investigando y modelando con mucha precisión solamente lo que esta enfocado, pero olvidando que lo que esta enfocado es solo una pequeña parte del hecho completo, que incluye muchas variables que no están dentro del “volumen de control” modelado mecánicamente.

Por otro lado las aproximaciones estadísticas, no saben realmente que sucedió dentro del “volumen de control” pero han visto el resultado desde afuera, como un todo, y lo han visto una cantidad adecuada de ocasiones, como para intentar establecer una tendencia; la cual tiene mucha imprecisión, por la poca información que se puede recabar, pero es una forma mas científica de decir “lo vi, lo hice una vez y si lo hago nuevamente lo mas seguro es que sucederá de igual forma”, lo cual es un hecho basado en la *experiencia* y por lo tanto puede ser calificado como *empírico*.

De hecho mi intención no esta basada en quitar mérito a las formulaciones dadas por análisis estocástico o estadístico, las cuales como ya he mencionado, han dado hasta ahora mejores aproximaciones, sino mas bien en mejorar las ecuaciones científicas de modelado para apoyar el análisis estocástico.

1.2. Análisis del Estado Crítico de las Cosas.

Si bien es cierto, se ha conseguido mejorar los niveles de prevención de incendios utilizando los modelos generados bajo la luz del estado actual de las cosas; no deja de ser cierto que aunque de forma general (viendo los siniestros como un todo) han llegado a tener cierta confiabilidad; de forma puntual (evento por evento dentro del siniestro), su infiabilidad es muy alta y los niveles de precisión y exactitud de las predicciones son muy bajos y alejados de la realidad.

Sería muy difícil por ejemplo predecir la condición ambiental de un cuarto eléctrico, bajo la cual un conductor de calibre # 12 AWG con aislamiento THWN, llega a la ignición o al derretimiento de su aislante, o en que momento se llega a la ignición de un cartucho de papel que haya sido dejado por alguien en la cercanía de este conductor, utilizando solo los modelos actuales que son mas enfocados al estado general y estadístico de los conatos.

No hay mucha publicación conocida de la forma en la cual se pueda aproximar el modelado puntual de hechos como el ejemplo expuesto en el párrafo anterior, que presente modelos relacionados a los hechos físicos en lugar de analizar estadísticamente la solución de alguno de estos casos, solución que por ser de carácter estadístico, guardará poca o ninguna relación con las condiciones físicas necesarias, mas bien guardará relación con la probabilidad de que suceda el hecho independientemente de la forma como suceda.

Realmente si afinamos la punta del lápiz, veremos que lo crítico no es el siniestro en sí, sino que suceda el hecho de la ignición, y aunque esto ha sido analizado de alguna manera en trabajos anteriores de otros autores; no se ha llegado aún a la generación de un modelo suficientemente aproximado para generar confianza en la predicción, y tampoco se ha logrado integrar de forma adecuada estos modelos de hechos puntuales a los análisis estocásticos generales que modelan los eventos como un todo.

1.3. Análisis de Otras Situaciones Posibles.

En la ciencia de los incendios, casi cualquier situación es posible, solo en el caso de incendios generados por sistemas eléctricos, el enfoque que se ha dado hasta los tiempos actuales es atacar el análisis por partida de lo que llaman el “arco eléctrico” o la “chispa”, de lo cual se hablará un poco mas en las siguientes líneas.

La exposición que traigo a colación con este trabajo es atacar el mismo hecho por partida de la generación de calor propia de los conductores eléctricos y la transmisión de este calor a materiales que puedan llegar a la ignición con la medida suficiente de calor.

Sin embargo, las posibilidades están abiertas y son casi infinitas, aunque todas las demás situaciones se han considerado como poco probables por reunir condiciones y características que se encuentran en grados muy bajos de probabilidad para encontrarse con sistemas eléctricos no dejan de ser nulas.

Ejemplo de estas diversas situaciones son:

- Generación de un arco por conductores mojados donde el agua sirve como medio de comunicación y transmisor del arco.
- Generación de una chispa por apagar el interruptor de una maquinaria eléctrica en un momento donde es altamente inductiva, con lo cual tiende a mantenerse la corriente aún después de abierto el interruptor.

- Generación de corrientes por fenómenos inductivos en materiales fuera de los conductores pero que están desprotegidos dieléctricamente por lo tanto con riesgo de generar arcos.
- Movimiento de elementos mecánicos por fenómenos magnéticos causados por la corriente en un conductor, los cuales puedan en algún momento golpear causando una chispa mecánica (por fricción) y de esa manera genera un incendio.

Al igual que los anteriores ejemplos, otras posibles e impensables situaciones pueden darse, sin embargo, la mayor parte se concentra en el hecho de que el propio conductor portador de energía es quien genera directamente el incendio, lo cual es lógico y totalmente claro al ver que habrá mas posibilidades de encender algo, mientras mas cerca se encuentre de la fuente de energía.

1.4. Exposición de una Posible Solución.

Ante lo expuesto en los párrafos anteriores, no es difícil llegar a una conclusión preliminar, cayendo en el hecho de que para encontrar una solución a lo que requerimos en éste momento de modelar con mayor precisión el punto o las condiciones de inicio de un incendio causado por un conductor eléctrico, necesitamos desarrollar un modelo que se ajuste mas a las condiciones físicas que consideramos con mayor peso o ponderación dentro de las variables consideradas como importantes.

Sería conveniente que aparte de esto, el modelo pudiera ajustarse a los modelos estadísticos, a forma de aportar valor de aproximación a la predicción de conatos de incendios por causas eléctricas, sería como integrar el modelo físico determinista, al modelado estocástico.

Como el análisis estocástico incluye innumerables variables que “no tienen control alguno”, habría que modelarlas todas e incluirlas en el mismo, para mejorar la aproximación del análisis completo, lo cual es un trabajo grande y muy laborioso. Para el documento que lee, me he propuesto únicamente conseguir un modelo mas aproximado de ecuaciones para modelar la generación de un incendio solo por causa de un conductor eléctrico; y

específicamente basándome en el calentamiento generado por la energía que fluye dentro de ese conductor.

La hipótesis que mantengo se basa en que considero que el calor generado por el flujo de energía eléctrica tiene probabilidad similar (por lo menos en orden de magnitud) de dar inicio a un incendio a la probabilidad que existe de que se de el incendio por un “arco” en el conductor.

1.5. Formulación de la Hipótesis.

Formularemos nuestra hipótesis de la siguiente manera:

“Si fluye una cantidad de corriente suficiente en un conductor eléctrico, éste se calentará y con el paso del tiempo se debilitará el aislante del conductor; si la corriente no se detiene, se llegará al encendido del aislante, o al encendido de algún material cercano al conductor, sin la necesidad de un arco de corto circuito”

Es un hecho bien corroborado, que ante la existencia de un potencial eléctrico (voltaje), entre 2 cuerpos, lo suficientemente elevado para romper la barrera dieléctrica (o resistividad dieléctrica) del material que los separa (ya sea aire o algún aislante); las cargas van a saltar de un cuerpo al otro, formando una corriente a través del dieléctrico que conocemos en electricidad como “arco eléctrico”.

En muchas ocasiones este arco tiene muy pocos segundos de duración porque al formarse el mismo, una vez establecido y rota la barrera dieléctrica, deja pasar tanta energía de un cuerpo a otro que al llegar a las fronteras de ambos cuerpos (saliendo y entrando), se da una transformación en calor, que derrite los cuerpos haciendo que el espacio entre los mismos se abra más, por lo tanto dejando mas dieléctrico entre ellos y aumentando el potencial de la barrera dieléctrica.

Cuando el espacio es suficientemente grande, el arco se extingue nuevamente; y en ocasiones es tan rápido que solo se deja ver un arco de muy corto tiempo reconocido vulgarmente como “chispazo”.

En ocasiones los fenómenos inductivos no permiten que el arco deje de fluir desde el cuerpo que aporta las cargas, pero como el cuerpo que las recibe se aleja

considerablemente, este arco busca otro cuerpo que pueda recibirlas, desviando el arco hacia cualquier otro material cercano.

En vista de éste fenómeno, se ha modelado ampliamente a los incendios eléctricos por medio de la Teoría Electromagnética específicamente enfocándose en formación de arcos, para tratar de explicar el inicio de los incendios causados por conductores eléctricos.

Si bien es cierto, considero que algún número de incendios eléctricos es originado de esta forma, considero también que no son la mayor parte, ya que en la mayoría de los eventos, el incendio es dado en locaciones donde se manejan voltajes bajos (menos de 600 Volts), con lo que las condiciones de ionización y humedad ambientales son bastante difíciles de conseguir para que se logre la generación de un arco eléctrico.

Sacamos de esta lista a las locaciones industriales de plantas que tienen su propia subestación eléctrica, donde si se manejan altos voltajes (varias decenas de miles de voltios) y donde los arcos eléctricos son bastante comunes entre partes electrizadas a estos altos potenciales. Nos referimos con la hipótesis presentada principalmente a las locaciones residenciales, comerciales, institucionales, mercantiles, e industriales que manejan los voltajes comunes que utilizamos en nuestros hogares todos los días, y otros voltajes mas elevados pero inferiores a 600 Volts, que son considerados como sistemas de bajo voltaje, los cuales son la gran mayoría de los sistemas de voltaje donde existe presencia humana.

De esta forma, a la luz de la hipótesis presentada, se intentará de aquí en adelante dar cumplimiento al objetivo primordial de este trabajo, el cual ya ha sido presentado, que es conseguir un modelo que pueda llevarnos a la comprensión teórica, hipotética de la forma como puede darse un incendio debido al calor excesivo generado por un conductor eléctrico en un proyecto, dependiendo de las condiciones que encuentre a su alrededor.



CAPÍTULO II

Actualidad de los Sistemas de Protección Contra Incendios (La Situación Actual de las Cosas)

EN ESTE CAPÍTULO:

- 2.1 Estado Actual del Campo de la Investigación de Protección Contra Incendios
- 2.1 Ejemplos Seleccionados de Casos Documentados con Investigaciones Anteriores a Nivel Mundial.
 - 2.2.1 Incendio a Gran Altura (High Rise Building) en Rockefeller Center
 - 2.2.2 Incendio de Hotel en MGM Grand Las Vegas
 - 2.2.3 Incendio de Central Telefónica de Los Angeles
 - 2.2.4 Incendio de Fábrica Industrial Kader Industrial Co LTD
 - 2.2.5 Incendio en Paxton Hotel
- 2.3 Resumen y Conclusiones Generales de la Situación Actual de las Cosas
- 2.4 Bibliografía Relacionada del Capítulo II

CAPITULO II

Actualidad de los Sistemas de Protección Contra Incendios en Edificaciones (La Situación Actual de las Cosas)

2.1 Estado Actual del Campo de la Investigación de Protección Contra Incendios

En el campo de la Ingeniería de Protección Contra Incendios, si bien es cierto hay mucho trabajo realizado, el porcentaje de concordancia entre unos y otros trabajos no es tan elevado como podría esperarse. Una gran cantidad de teorías envuelven el tema, cada una dando explicaciones desde su punto de vista, cada una con grandes aportaciones y puntos de vital importancia. Los experimentos, ensayos y pruebas de cada una de las hipótesis, resultan siempre muy costosas, ya que muchas de ellas involucran pruebas destructivas que requieren de generación de incendios que deben ser controlados y medidos muy cuidadosamente por equipo muy sofisticado.

Aunque el presupuesto de investigación en Protección Contra Incendios se hace siempre elevado, la esperanza de obtener buenos resultados que ayuden a salvar vidas y bienes de mucho mas valor es lo que impulsa su continuo desarrollo.

Específicamente en la parte eléctrica que es la que nos toca, el intenso esfuerzo en investigación ha dado como resultados la inclusión de mucha información acerca de protección contra incendios causados por la electricidad en nuestras bibliotecas; entre ellos importantes códigos y normativas que ya son extensamente aceptadas a nivel de América y el Mundo, tales como las normativas de la NFPA, cuyos códigos eléctricos principales son NFPA 70, Código Eléctrico Nacional; NFPA 70B Prácticas Recomendadas para Mantenimiento de Equipos Eléctricos; NFPA 70E, Estándares de Requerimientos de Seguridad Eléctrica para Lugares de Trabajo de los Empleados; NFPA 72, Código Nacional de Alarmas Contra Incendio; NFPA 73, Código de Inspección Eléctrica para Viviendas Existentes; NFPA 75, Estándar para la protección de Equipo Electrónico de Procesamiento de Data/Computo; NFPA 76, Prácticas Recomendadas para la Protección de Facilidades de Telecomunicaciones; NFPA 77, Prácticas Recomendadas en Electricidad Estática; NFPA 79, Estándar Eléctrico para Maquinaria Industrial; NFPA 110, Estándar para Sistemas de Potencia de Emergencia y de Apoyo; NFPA 111, Estándares de Energía Eléctrica Almacenada y Sistemas de Potencia de Apoyo; NFPA 115, Prácticas Recomendadas en Protección de Fuego por Laser; NFPA 780, Estándar para la Instalación

de Sistemas de Protección de Iluminación; NFPA 804, Estándar para la Protección contra Incendios de Plantas Avanzadas de Generación Eléctrica con Reactores de Agua Ligera; NFPA 805, Estándar basado en Funcionamiento para la Protección contra Incendios de Plantas Avanzadas de Generación Eléctrica con Reactores de Agua Ligera; NFPA 850, Prácticas Recomendadas para la Protección Contra Incendios de Plantas Generadoras Eléctricas y Estaciones Conversoras de Alto Voltaje de Corriente Directa; NFPA 851, Prácticas Recomendadas para la Protección Contra Incendios de Plantas Generadoras Hidroeléctricas; NFPA 853, Estándar para la Instalación de Plantas de Potencia Estacionarias por Celdas de Combustible.

Los anteriores códigos y normas han adquirido en los últimos años una gran relevancia en muchos países del mundo que los han adoptado como propios de alguna u otra forma, ya sea adoptando el mismo código, transcribiéndolo y cambiando el nombre a un nombre propio del lugar o región, o tomando gran cantidad de ideas y resultados de los mismos, para incluirlos en códigos locales, ya que es bien conocido que son el producto de mucha inversión en investigación de avanzada y varias décadas de pruebas, con las que se han ido ajustando a las últimas versiones de cada cual.

Intensa investigación ha sido realizada también por otras organizaciones de carácter mundial como lo son la Factory Mutual (FM Global) quien tiene un extenso campus dedicado a la investigación y continuamente está editando reportes de los resultados de las pruebas que se llevan a cabo en este campo.

FM Global es una compañía de seguros con base en EE UU, con oficinas por todo el mundo, que se especializan en servicios de prevención de pérdidas, principalmente a corporaciones grandes en todo el mundo en el “Riesgo Sumamente Protegido” (HPR) el seguro de propiedades del sector de mercados. " FM Global " es el nombre comunicativo de la empresa, mientras que el nombre legal es " Factory Mutual Insurance Company ". FM Global ha sido catalogado " el Mejor Asegurador de Propiedades en el Mundo " por la Revista de Eurodinero. Toda esta investigación que realiza, le ha servido para generar métodos, técnicas, modelos y normativas que se han convertido en ejemplos a seguir no solo por otras compañías aseguradoras, sino por entidades gubernamentales, entidades públicas y privadas, dedicadas a la Ingeniería de Protección Contra Incendios en muchos países, al igual que para establecer estándares de seguridad en Mega-Corporaciones de carácter mundial, normativas de calidad de productos que llevan el sello de calidad “FM”, para el cual aplican y pasan pruebas de alta calidad, que asegura que cumplen con los

estándares dados por la FM Global, específicamente en el servicio para el cual ha sido diseñado el producto.

El ambicioso laboratorio de Pruebas de FM Global con un costo de varias decenas de millones de dólares tiene 1600 acres de extensión y está localizado en West Glocester, RI, Estados Unidos; y es en sí una prueba de aplicación de cada una de las normativas y recomendaciones de construcción de FM-Global en su propia estructura.

Los 1,600 acres de laboratorios de FM Global (648 ha), Campus de Investigación de West Glocester, R.I., sirven para hacer pruebas de conductas en el fuego y peligros de explosión, riesgos, detección y tecnología de protección, catástrofes (inundaciones, daños por vientos, etc.), peligros eléctricos, y rociadores automáticos contra incendios. Estas pruebas van desde atestiguar la diferencia en cómo los productos se queman hasta cómo los componentes de construcción funcionan en condiciones de huracán.

En el 2004, FM Global entró en un Acuerdo Cooperativo De investigación y desarrollo (CRADA) con el Sandia National Laboratory (EE.UU.). El propósito de CRADA es desarrollar el diagnóstico avanzado y el modelado de fuegos catastróficos.

FM Global es una compañía de seguro de propiedad, e ingeniería de prevención de pérdidas internacional con US\$4.3 billones de activos "primium" vigentes (FY2006), US\$5.2 billones en el exceso de los asegurados (FY2006), con clientes en más de 100 países.

Al igual que FM Global, otras asociaciones como la SFPE (Society of Fire Protection Engineers), UL (Underwriters Laboratories Inc.), ALAS (Asociación Latinoamericana de Seguridad), CEPREVEN (Centro Nacional de Prevención de Daños y Pérdidas), ASFP (Association for Specialist Fire Protection), EAPFP (European Association for Passive Fire Protection), CFPA-Europe (The Confederation of Fire Protection Association Europe), CFPA-I (Confederation of Fire Protection Association International) y muchas otras organizaciones internacionales han realizado intensos esfuerzos en investigación, generando gran cantidad de publicaciones que han ayudado a desarrollar la concepción de la protección contra incendios que manejamos hoy en día.

La SFPE tiene entre sus publicaciones, uno de los documentos más científicos que existe hasta la actualidad en el tema de Protección contra Incendios, hablamos de "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", desarrollado por diversos Doctores e Ingenieros Profesionales de las más prestigiosas universidades de Estados Unidos, documento donde se pueden encontrar desarrollos logísticos, modelados matemáticos de

dinámica del fuego, modelados para el cálculo de riesgos, y análisis de riesgos; presentado de una forma teórica-científica, con aplicación práctica.

La NFPA por su parte ha desarrollado también un “Manual de Protección Contra Incendios” que ya va por su 20ª edición; que si bien es cierto no tiene un nivel científico tan intenso como el manual de la SFPE, tiene en si aplicaciones mucho mas prácticas que llevan a formar a sus lectores en un ámbito de especialista de protección contra incendios mas aplicado a temas cotidianos y prácticas comunes adquiridas por la investigación y la experiencia en el Campo de la Protección Contra Incendios.

Los laboratorios UL por su parte han dedicado intensos esfuerzos en certificar productos y crear numerosas publicaciones de estándares de calidad en productos para asegurar sus buenas características en caso de incendio.

Mucha de la publicación de estas organizaciones ya no es en papel, sino directamente en sus páginas de internet, donde alguna de esta información es gratuita y otra es pagadera por medio de tarjetas de crédito.

Sería imposible mencionar cada una de las investigaciones realizadas por organizaciones, pues son muy numerosas, pero hasta aquí se han presentado las más relevantes en base a su impacto y aceptación a nivel mundial. Si bien es cierto autores aislados han realizado también esfuerzos en investigación y documentación de estos temas, son aún mas numerosos que las organizaciones. El caso particular de Douglas Drysdale es un ejemplo, cuyo libro “An Introduction to Fire Dynamics” es casi por norma un libro de texto para el estudio de Dinámica del Fuego en las universidades americanas.

2.2 Ejemplos seleccionados de Casos Documentados con Investigaciones Anteriores a Nivel Mundial.

Si bien es cierto, no podemos intentar incluir la documentación existente acerca de la inmensa cantidad de casos que hay cada año de conatos de incendio, y que son documentados por diversas compañías, instituciones y autoridades competentes; si podemos dar ciertos ejemplos que consideramos bastante académicos.

2.2.1. Incendio a Gran Altura (High Rise Building) en el Rockefeller Center

Lugar: Rockefeller Center, Ciudad de Nueva York

Fecha: 10 de octubre de 1996.

Investigado por: NFPA

Este es uno de los incendios más puramente ligados al enfoque de nuestro trabajo, hacia el desarrollo de un modelo para el entendimiento de los incendios eléctricos. Aquí presento ciertas líneas a forma de resumen de la investigación exhaustiva realizada por la NFPA acerca de éste incendio, el reporte completo está reservado a ser accesado solamente por miembros en buena estima de la NFPA, sin embargo se nos da autorización de presentar la información para fines académicos.

Aproximadamente a las 4:00 a.m. del jueves 10 de octubre de 1996, ocurrió un incendio eléctrico en el Rockefeller Plaza 30 en la ciudad de Nueva York. Varios incendios estallaron en 5 ubicaciones remotas, llenando de humo muchas áreas del edificio. Todo el edificio fue evacuado, las transmisiones en vivo de una importante cadena de televisión fueron interrumpidas y el movimiento del tráfico se vio afectado varias cuadras alrededor del edificio.

Afortunadamente, como el fuego ocurrió temprano en la mañana, había relativamente pocas personas en el edificio. Todas las personas pudieron evacuar con éxito. El Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Nueva York recibió información telefónica sobre el incendio y despachó una primera misión completa de alarma.

Cuando los bomberos llegaron, pudieron observar humo saliendo de uno de los pisos superiores del edificio. Sin embargo, de acuerdo con el primer oficial de comando que llegó, el personal de seguridad en el edificio no se había dado cuenta de que había fuego dentro del mismo, ni tampoco había ninguna indicación de alarma en el sistema de alarmas de incendio.

Los bomberos que entraron al edificio estaban recibiendo informes sobre un incendio en los pisos 7 a 10 de parte de la población civil. Más tarde, se determinó que había incendios en cinco cuartos de electricidad separados.

Finalmente el departamento de bomberos transmitió cinco alarmas, las cuales hicieron que llegaran 300 bomberos a la escena. A pesar de la gran cantidad de recursos de supresión de incendios comprometidos, les tomó a los bomberos aproximadamente cuatro horas extinguir el incendio.

El fuego estaba profundamente arraigado en el sistema de cableado eléctrico en cinco cuartos de electricidad separados en varios pisos. Cinco civiles y 12 bomberos resultaron heridos durante este incendio.

Según el Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Nueva York, la causa del incendio fue eléctrica. El área de origen fue un cuarto de electricidad en el quinto piso donde el servicio eléctrico entraba al edificio y luego era distribuido a las otras ubicaciones dentro de la estructura. El cableado dentro de esta habitación se incendió generando grandes cantidades de humo.

Otros cuatro cuartos de electricidad fueron luego atrapados por el fuego, generando también grandes cantidades de humo. En el cuarto donde ocurrió el incendio inicial, el cableado estaba dentro de soportes para cable abiertos. A través de los años, se iba añadiendo cableado adicional, el cual era apretado dentro de estos soportes para cables, de tal forma, que ya no había ningún espacio entre los cables, o entre éstos y la viga I, debajo de la cual pasaban los cables.

Según palabras directas del Fire Marshall de New York, *“un problema eléctrico sobrecalentó los conductores, dando como resultado un deterioro en el aislamiento del conductor. Esto consecuentemente, causó cortos circuitos acrecentando el problema.”*

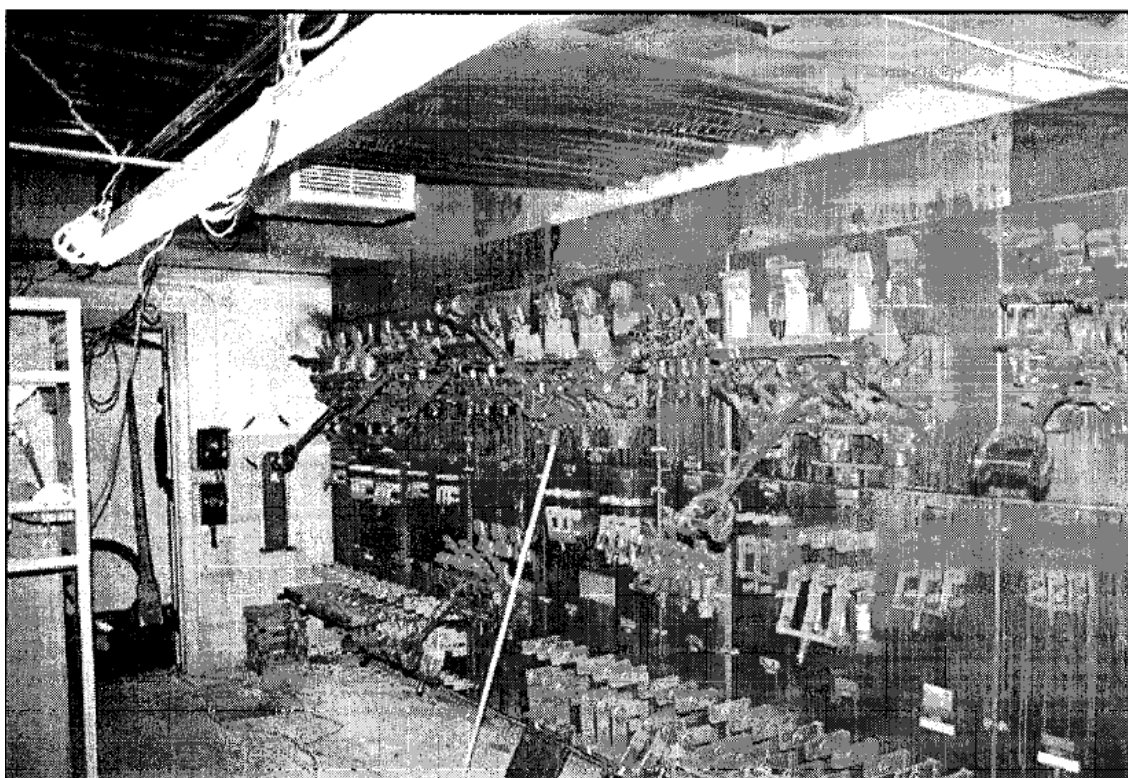


Imagen 2.2.1.1 Muestra la Vecindad del Switchgear en el 5to piso del Rockefeller Center, donde se determina el comienzo del incendio. Tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, ROCKEFELLER CENTER, FIRE INVESTIGATION REPORT.

Aunque los investigadores de la NFPA no pudieron determinar la naturaleza real de la falla eléctrica original, se cree que en algún punto estos cables, que se estaban quemando, perdieron la protección brindada por su aislamiento y quedaron conectados al soporte estructural. Esto ocasionó que ocurriera un gran flujo de corriente a lo largo de esta gran masa de cables. El cableado en otros cuatro cuartos de electricidad separados en dos pisos utilizados para distribuir la electricidad hacia varios pisos también fue atrapado por el fuego.

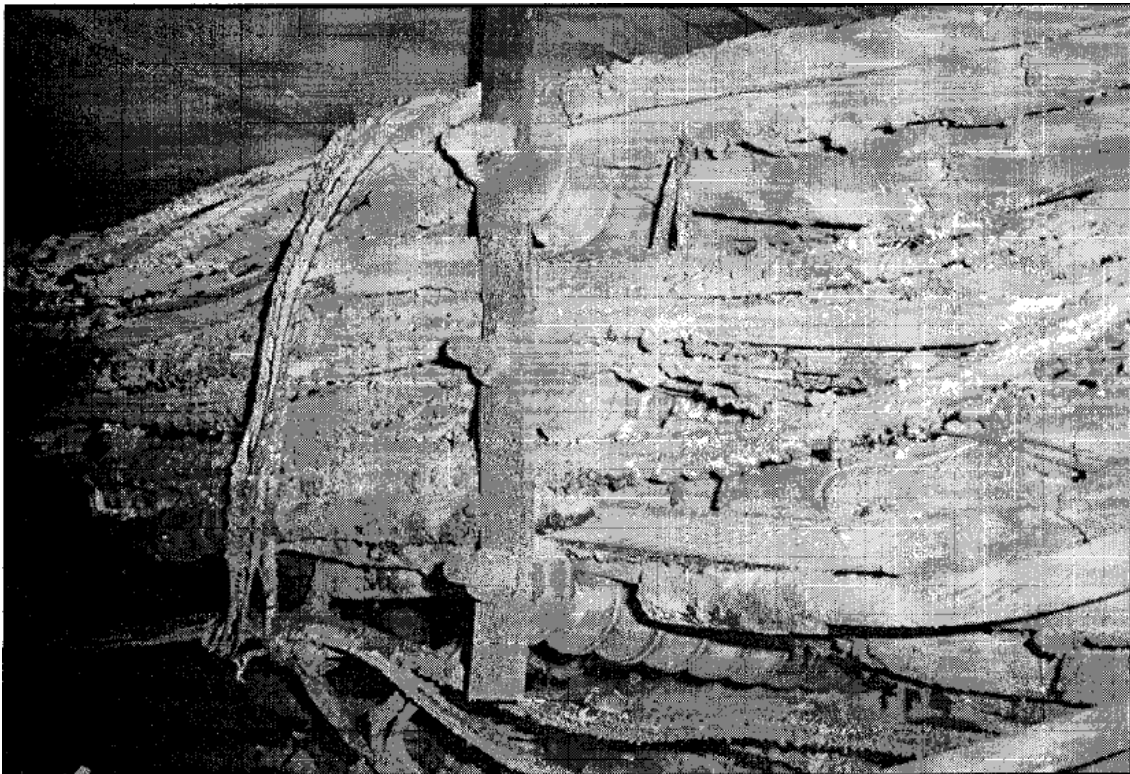


Imagen 2.2.1.2. Cableado puesto sobre “soportes abiertos” sobre el Switchgear en el 5to piso del Rockefeller Center, causa crítica del incendio. Tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, ROCKEFELLER CENTER, FIRE INVESTIGATION REPORT.

Los incendios presentaron un reto para el Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Nueva York debido a las variadas ubicaciones de los incendios simultáneos y a la confusa disposición del edificio. Cuando los bomberos entraron al edificio a buscar el incendio en el décimo piso, las condiciones de humo eran muy densas. El fuego y el humo se propagaron más allá de los cuartos involucrados debido a un número de aberturas horizontales y verticales no protegidas.

El Centro Rockefeller es un complejo de edificios que están interconectados. El edificio más alto en el complejo es de 70 pisos. La edificación donde ocurrió el incendio tenía 11 pisos de altura y estaba ocupado por un número diferente de inquilinos. De acuerdo con el uso de este edificio, según el código NFPA 101□, *el Código de Seguridad Humana*, este edificio estaría clasificado como una ocupación comercial existente. El edificio estaba equipado con un sistema de alarmas de incendio que incluía detectores de humo (techo y conductos), estaciones manuales de alarma e interruptores de flujo. Estaba monitoreado por personal de seguridad del lugar. La planta baja y los niveles inferiores tenían rociadores, aunque ninguno de los pisos superiores en el edificio tenía rociadores. Las tuberías verticales de incendios estaban localizadas en las escaleras y dentro de los pisos.



Imagen 2.2.1.3. Se muestra como el cableado que se había ido agregando con el tiempo iba siendo comprimido entre los soportes y la viga I, reduciendo el área perpendicular de aislamiento; al fallar se dieron arcos entre los conductores y entre los conductores y la viga. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, ROCKEFELLER CENTER, FIRE INVESTIGATION REPORT.

Este incidente fue analizado, utilizando documentos actuales de la NFPA. Estos incluyen los siguientes, entre otros:

□□ NFPA 101, *Código de Prevención de Incendios*

- NFPA 13, *Norma para la Instalación de Sistemas de Rociadores*
- NFPA 70, *Código Nacional Eléctrico*
- NFPA 101, *Código de Seguridad Humana*

De acuerdo con la investigación de la NFPA y el análisis de este incendio, los siguientes son considerados factores importantes que contribuyeron a la pérdida de propiedad de este incidente:

- Protección inadecuada del circuito:* Flujos altos de corriente dentro del sistema eléctrico permitieron la ignición del cableado en cinco cuartos separados.
- Falta de espacio adecuado para que los conductores eléctricos disiparan el calor de manera segura:* Esta falta de espacio permitió la acumulación de calor lo cual afectó a otros conductores y degeneró el aislamiento sobre los conductores.
- Penetraciones horizontales y verticales sin protección:* Estas aberturas permitieron que el humo se propagara más allá de los cuartos eléctricos y dentro de las áreas ocupadas de los pisos.
- Ausencia de protección con rociadores en las áreas de los incendios:* Los rociadores tienen un registro de recorrido probado en todas las ocupaciones para controlar de manera segura un incendio en sus etapas iniciales.
- Ausencia de detección de humo en las áreas de los incendios:* Si los incendios se hubieran detectado más temprano, probablemente estos habrían sido más fáciles de extinguir.
- Falla del sistema de alarmas de incendio del edificio para transmitir la alarma:* Esta falla del sistema de alarmas pudo ser un factor extremadamente importante si el incendio hubiera ocurrido durante el día cuando el edificio tenía un gran número de ocupantes.
- Distribución confusa del edificio:* Los bomberos tuvieron dificultades para localizar los incendios debido a la disposición de los pisos, lo que demoró la extinción de los mismos.
- Múltiples puntos de origen:* Esto creó la necesidad de contar con un gran número de recursos en la escena para suprimir los incendios separados. No muchas ciudades tendrían la habilidad de movilizar rápidamente tal cantidad de personal y equipo.

Aunque no fue un factor significativo que contribuyó a iniciar los incendios y a la posterior propagación del fuego, existe cierta preocupación con respecto a las acciones tomadas a continuación del incendio. Como parte del esfuerzo para restaurar la energía eléctrica, lo más rápidamente posible, por todo el edificio y permitir a los ocupantes continuar con las operaciones, se siguieron los siguientes pasos, los cuales pudieron potencialmente haber conducido a complicaciones posteriores:

Numerosas puertas de las escaleras fueron mantenidas abiertas para permitir la ventilación ya que el sistema HVAC no estaba funcionando. Se hizo un recorrido de cableado para energía temporal en todo el edificio a través de puertas abiertas y de huecos en las paredes y pisos, muchos de los cuales eran resistentes al fuego y al abrir los agujeros cualquier incendio puede pasar a través del mismo. Estas aberturas no estaban protegidas.



Imagen 2.2.1.4. Se muestra el agujero abierto en un muro resistente contra fuego para dar paso a los cables eléctricos. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, ROCKEFELLER CENTER, FIRE INVESTIGATION REPORT.

Durante las etapas de restauración los pisos estaban ocupados por personal de la cadena de televisión. Sin embargo, las rutas de egreso en algunos de estos pisos estaban obstruidas por grandes carretes de alambre que habían sido llevados para restablecer el servicio.

Como en muchas áreas había suministro de energía limitado, no había iluminación normal disponible y se utilizaron métodos alternativos como velas para iluminar algunas áreas.

Este es otro incendio en una larga línea de incendios en edificios de gran altura, donde la ausencia de un sistema de rociadores automáticos en el edificio es un factor significativo que contribuye a las pérdidas. A través de los años ha ocurrido un número

importante de incendios en edificios de gran altura, que no estaban equipados con sistemas de rociadores, por lo que el resultado habría sido significativamente diferente si hubieran tenido instalado uno de estos sistemas.

Los incendios en edificios de gran altura son un gran reto para combatir. Deben realizarse todos los esfuerzos para asegurar que la seguridad humana de los ocupantes y la de aquellos que responden al incendio debe estar protegida con el uso de tecnología, códigos actualizados, una sólida prevención contra incendios, y programas de inspección.

2.2.2. Incendio de Hotel MGM Grand Las Vegas

Lugar: MGM Grand, Ciudad de Las Vegas, Nevada

Fecha: 21 de noviembre de 1980.

Investigado por: NFPA

El 21 de noviembre de 1980, fue un día siniestro para la industria hotelera en Estados Unidos, con el amanecer del día vino también un incendio que ocurrió en el MGM Grand Hotel & Casino (ahora conocido como Bally's Las Vegas) en Las Vegas, Nevada, EE.UU., matando a 85 personas, la mayoría por inhalaciones de humo. Hasta el momento es el peor desastre en la historia de Nevada, y el segundo peor incendio de hotel en la historia moderna de Estados Unidos, después del gran incendio en el hotel Wincoff que mató a 119 personas.



Imagen 2.2.2.1. Se muestra la fase del incendio donde aún la mayor parte de la afección está en los pisos bajos y comienza a tomar la torre. Foto tomada de reviewjournal.com.

Durante el incendio, aproximadamente 5,000 personas estuvieron dentro del lujoso el hotel y casino de 26 pisos con más de 2,000 habitaciones. Justo después de las 7:00 de la mañana del 21 de noviembre de 1980, un incendio se desató en el restaurante Deli. El humo y el fuego se propaga por todo el edificio, matando a 85 personas e hiriendo a 650, incluyendo a huéspedes, empleados y 14 bomberos. Aunque el fuego dañó gravemente la segunda planta del casino y los restaurantes adyacentes, la mayoría de las personas murieron por causas de inhalación de humo en los últimos pisos del hotel. Las aberturas verticales (de elevadores y escaleras) produjeron que humo se esparciera por todo el edificio como una chimenea.

Los factores que contribuyeron mayoritariamente a la pérdida de vidas fueron:

- a. El rápido desarrollo de fuego y humo debido a la disposición de combustibles y la falta de barreras contra fuego en el edificio.
- b. La falta de extinción en el estado incipiente del incendio.

- c. Aberturas verticales sin protección que contribuyeron a la dispersión de humos hacia la torre.
- d. Encerramientos fuera de los estándares en las escaleras y pasajes de salida que contribuyeron a que los medios de egreso se dificultaran.
- e. La distribución del humo a través de los sistemas de acondicionamiento de aire y calefacción.
- f. La distribución del humo a través de los fosos de los elevadores.

Causas

El incendio fue causado por un fallo eléctrico dentro de un plafón. El cableado dentro de la pared era usado para la refrigeración de las neveras y mantenedores de comida del restaurante Deli. La vibración de la máquina causó que los cables se rompieran, provocando una fricción entre los cables que desató un incendio, que fue detectado horas después por los empleados del hotel. El incendio también se propago por todo el lobby, el fuego se propagó muy rápido debido al papel tapiz, tubos de PVC, pega, y espejos de plásticos. El material incinerado creó unos gases tóxicos y humo, lo que causó la mayoría de las muertes.

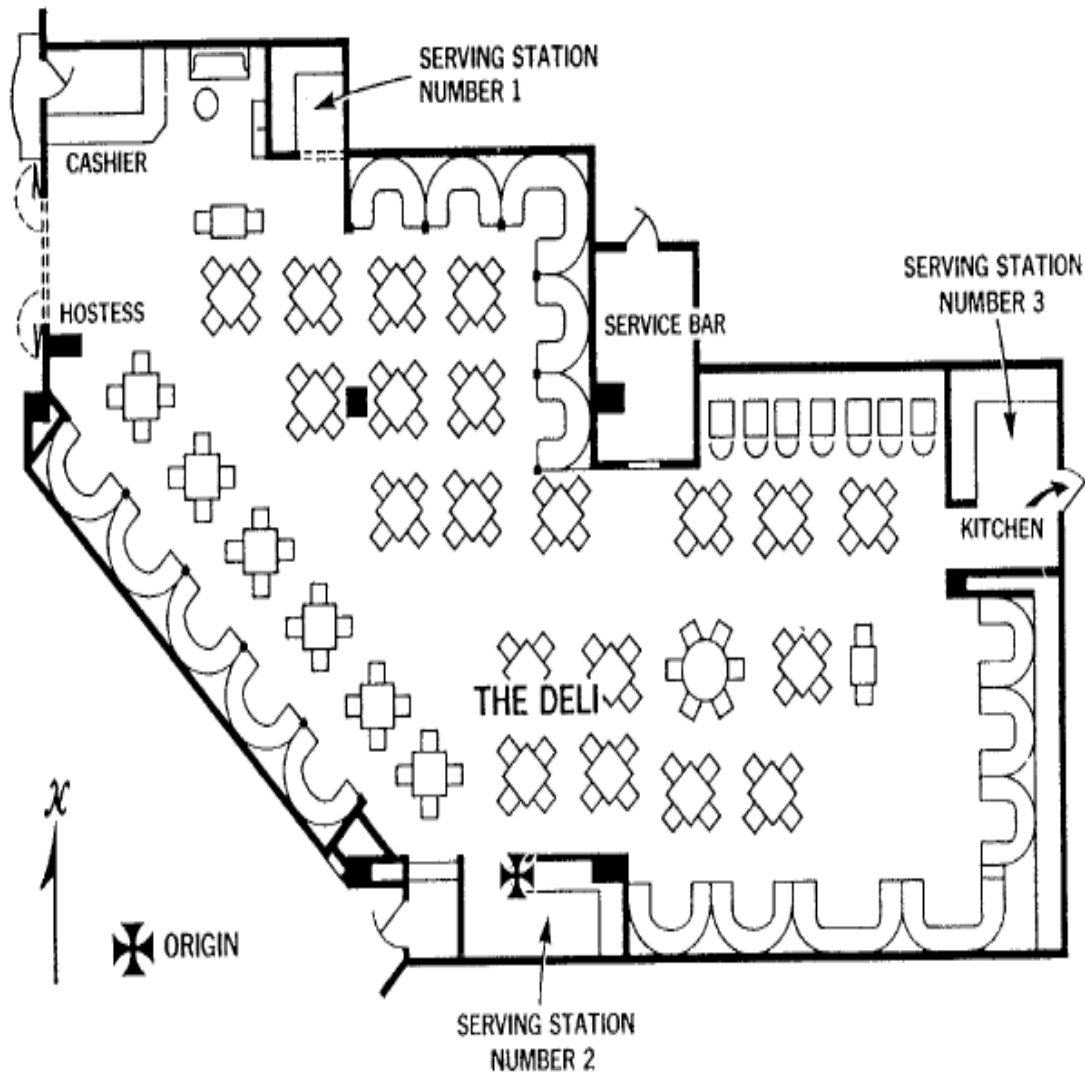


Imagen 2.2.2.2. Se muestra el plano del restaurante DELI donde tuvo origen el incendio por causas eléctricas. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, MGM GRAND LAS VEGAS, FIRE INVESTIGATION REPORT.

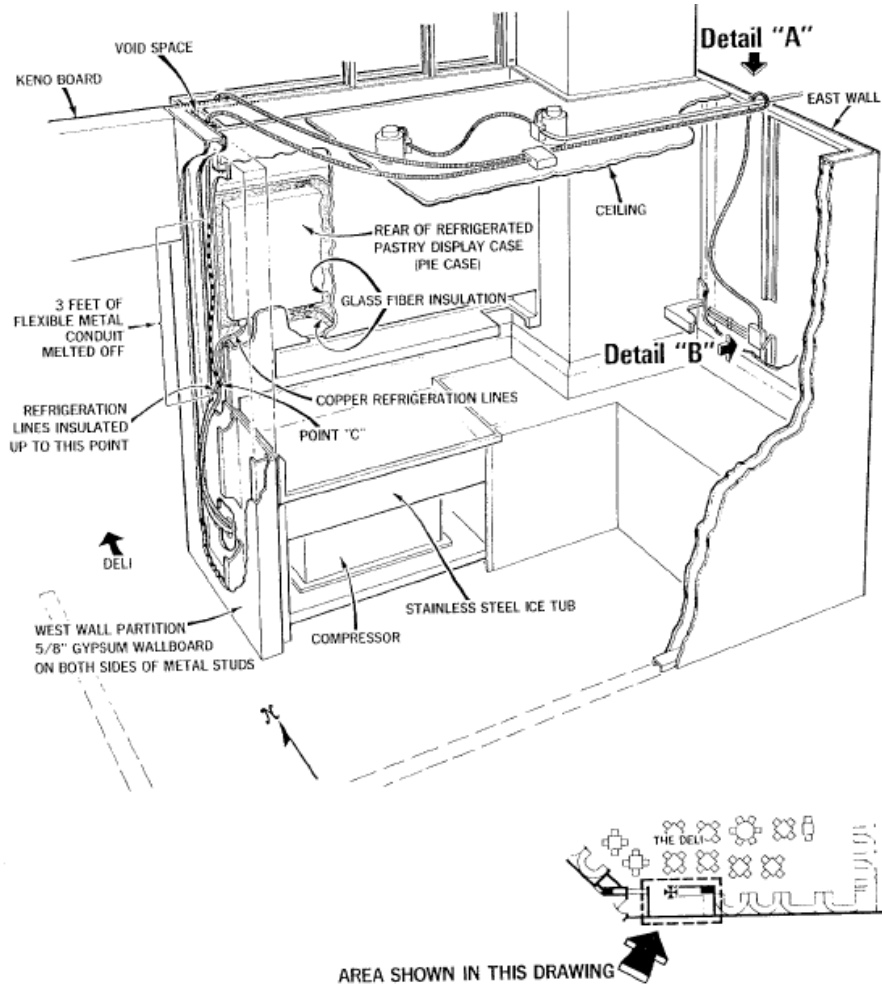


Imagen 2.2.2.3. Se muestra la máquina de servicio y conexiones eléctricas que dieron origen al incendio. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, MGM GRAND LAS VEGAS, FIRE INVESTIGATION REPORT.

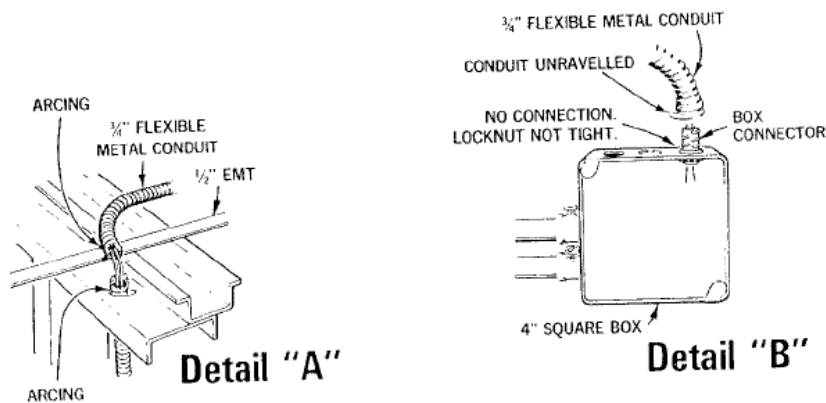


Imagen 2.2.2.4(a), Imagen 2.2.2.4(b). Se muestran los detalles de conexión de la máquina de servicio y conexiones eléctricas que dieron origen al incendio. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, MGM GRAND LAS VEGAS, FIRE INVESTIGATION REPORT.

Debido a dampers defectuosos de humo dentro de los conductos de ventilación, los gases tóxicos circularon por todo el sistema de circulación del hotel, acelerando la contaminación del aire.

La mayoría de de los muertos fueron encontrados en las escaleras, donde las puertas de emergencias se encontraban cerradas. Las víctimas murieron por las inhalaciones de humo. Los bomberos encontraron varias personas tomándose de las manos, incluyendo al menos una familia. Una mujer fue encontrada cerca de un elevador; el botón del ascensor estaba lleno de hollín, debido a que la occisa trató de marcarlo y bajar, pero quedó inconsciente.

El incendio fue contenido en las áreas del casino y restaurantes. El hotel fue equipado después con un sistema de detectores de humo e incendio y ayudarían a mantener el fuego en caso de que se desatara otro incendio. Según varios estudios de la NFPA, se llegó a la conclusión que los fallecidos no mostraron ningún comportamiento de pánico. Sin embargo, muchos de los cuerpos fueron encontrados muy serenos y calmados.

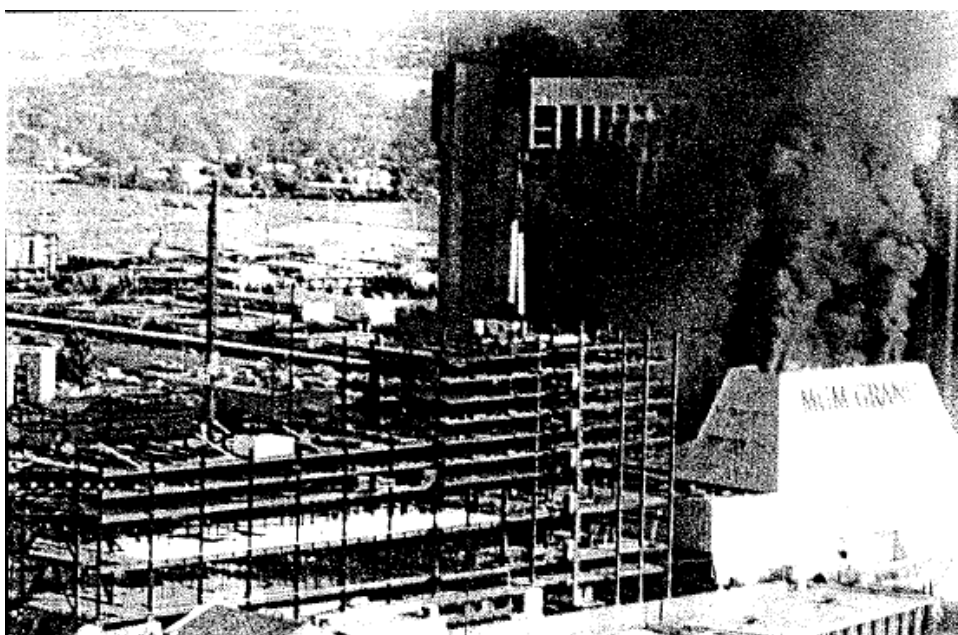


Imagen 2.2.2.5. Se muestra como los gases tóxicos tomaron todo el hotel haciéndolo una chimenea de gases por las aberturas desprotegidas. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, MGM GRAND LAS VEGAS, FIRE INVESTIGATION REPORT.

Algunos ejemplos vistos durante el incendio fue al encontrar toallas húmedas bajo las rendijas de las puertas y avisar a los otros huéspedes del hotel, algunos ofrecieron refugio

en sus habitaciones y al mismo tiempo usaron toallas mojadas en sus caras para no respirar el humo tóxico.

Los restaurantes y los casinos no estuvieron protegidos con detectores de incendios porque estaban exentos de normas que requerían rociadores contra incendios en las zonas ocupadas las 24 horas del día. Los inspectores de edificios del condado de Clark concedieron la exención -- a pesar de la oposición del jefe de bomberos-- alegando que el fuego podría fácilmente ser detectados por los trabajadores y extinguido con los extintores de incendio. En el momento del incendio, el área cesó la operación de 24 horas y fue cerrado y desocupado cuando el incendio se desató.

El sistema de alarma del hotel pudo activarse manualmente pero debido a que no había interruptores manuales en el área de casino y restaurantes, ninguna alarma fue dada.

Consecuencias

Eventualmente, el daño total provocado por el siniestro ascendió a un total de \$223 millones que fueron pagados para resolver los pleitos relacionados con el desastre, mas 85 vidas humanas que no pueden evaluarse.

El hotel fue reparado de improviso, al incluir nuevos detectores de humo e incendio y alarmas automáticas de incendios en toda la propiedad, luego el hotel fue vendido a Bally's Entertainment, la cual cambió de nombre a "Bally's Las Vegas".

2.2.3. Incendio de Central Telefónica de Los Angeles

Lugar: Los Angeles, CA

Fecha: 15 de marzo de 1994.

Investigado por: NFPA

Poco antes de las 12:47 a.m. del martes 15 de marzo de 1994, ocurrió un incendio accidental en una central telefónica de Pacific Bell que interrumpió el servicio telefónico así como el servicio de emergencias 911 en una gran parte de la ciudad de Los Ángeles. El

tiempo de interrupción del servicio varió a lo largo de la ciudad, en algunas áreas de Los Ángeles no hubo servicio de emergencias 911 por más de 12 horas.

El incendio ocurrió en una habitación de 138 pies x 164 pies en el piso 13 que contenía seis plantas de energía utilizadas para suministrar energía al equipo telefónico. El recinto donde se originó el incendio estaba protegido con detectores de humo.

El personal de un contratista experimentado que trabajaba para Pacific Bell estaba arreglando de nuevo los cables de la batería sobre una de las plantas de energía como parte de un trabajo grande para modernizar y actualizar la planta de energía, cuando ocurrió el incendio. El incendio involucró las baterías y el tablero de distribución principal para la planta de energía que estaba siendo modernizada, produciendo la pérdida de energía del equipo localizado en el noveno piso.

Este equipo tenía señales en multiplex y de-multiplex de comunicación, suministraba conexión física entre los cables que entraban y salían de la instalación, e incrementaba la fuerza de la señal. Como consecuencia por la pérdida de energía este equipo interrumpió la mayor parte del servicio E911 del centro de Comunicaciones del Departamento de Policía de Los Ángeles, el servicio telefónico normal dentro y fuera de la ciudad de Los Ángeles, algunos servicios de celular y buscapersonas, y muchos servicios de líneas para datos, servicios análogos y privados.

Afortunadamente ningún incidente de incendio, policial o médico fue agravado debido a la pérdida del servicio 911. La pérdida del servicio muestra que, en circunstancias adecuadas, la red telefónica de la comunidad, incluyendo su servicio telefónico de emergencia, pueden verse afectados de manera significativa por un pequeño incendio en la edificación de una central telefónica.

Aunque la energía eléctrica ha sido frecuentemente un factor significativo en los incendios en las telecomunicaciones, las plantas de energía eléctrica por sí mismas, no se han visto comúnmente involucradas en incendios. Sin embargo, el servicio telefónico fue interrumpido, como ocurre cuando los incendios suceden en otras ubicaciones dentro de una instalación de telecomunicaciones.

Como sólo una planta de energía fue afectada en este escenario, la extensión de la pérdida del servicio telefónico, especialmente el servicio E911, habría sido menor si los circuitos afectados estuvieran divididos entre varias plantas de energía. El tiempo en el cual no hubo servicio telefónico E911 habrá podido reducirse si hubiera existido un plan de contingencia para reenviar las llamadas antes del incendio, y si se hubiera implementado este plan.

Sistemas de protección contra incendios, tales como equipos de detección de arco, sistemas automáticos de interrupción de energía y sistemas de supresión de incendios, habrían reducido la severidad del incendio y, potencialmente, su efecto en el servicio telefónico. Sin embargo, actualmente no hay disponibilidad de sistemas de interrupción de energía automáticos, y ningún sistema de supresión de incendios es aceptado universalmente para usarse en equipos de telecomunicaciones o en áreas de suministro de energía.

La naturaleza atípica de este incendio y la falta de sistemas de protección contra incendios universalmente aceptados para instalaciones de telecomunicaciones sirven como un llamado para realizar más investigaciones y el desarrollo de métodos para el manejo de riesgos, equipo de protección contra incendios, aspectos sobre pólizas y procedimientos tales como planes de contingencia. Finalmente, este incendio también muestra los riesgos potenciales y las dificultades que los bomberos pueden enfrentar cuando son llamados para suprimir un incendio en una central telefónica.

2.2.4. Incendio de Fábrica Industrial Kader Industrial Co. LTD.

Lugar: Provincia de Nakhon Pathom, Tailandia

Fecha: 10 de mayo de 1993

Investigado por: NFPA

El 10 de mayo de 1993, aproximadamente a las 4:00 p.m., ocurrió un gran incendio en la fábrica Kader Industrial (Tailandia) Co. Ltd. ubicado en la Provincia Nakhon Pathom de Tailandia. Hasta la fecha, 188 trabajadores habían muerto en este incendio, aunque el número pudo incrementarse a causa de la gran cantidad de trabajadores que recibieron serias lesiones.

En la historia reciente, este desastre permanece actualmente como el peor incendio accidental del mundo con pérdida de vidas humanas en un edificio industrial. Durante ochenta y dos años, esta dudosa distinción fue ostentada por el incendio de Triangle Shirtwaist Factory en 1911, donde murieron 146 trabajadores en la ciudad de Nueva York. A pesar de los años que han transcurrido entre los dos desastres, hay una sorprendente variedad de similitudes.

Este es el tercer mayor incendio accidental en el sitio de trabajo que ha investigado la NFPA en los últimos meses. Una vez más, este incendio demuestra la importancia de incluir los principios fundamentales de la protección contra incendios en el diseño de los edificios y en el funcionamiento de las ocupaciones industriales. Ya NFPA ha cooperado con la International Labor Operation (ILO, una agencia especializada de las Naciones Unidas) y con la Brigada de Incendios de la Policía de Bangkok en la documentación de este incendio.

Posibles Causas

Aunque existen varias incongruencias, se conoce que el lugar de origen del incendio era usado para empacar y guardar productos terminados, y se encontraba cerca de un sistema de paneles grandes de control eléctrico. Las autoridades de Thai enfocaron su investigación en un cigarrillo como factor iniciador del evento, pero investigaciones tempranas se habían enfocado también en el sistema de paneles eléctricos como la fuente del incendio, según el reporte de la NFPA.

La total destrucción de esa porción del lugar y la conflictiva información ofrecida por los sobrevivientes han hecho que la investigación sea muy cambiante y las causas sean solo posibles.

Cuando los trabajadores del lugar se percataron hubo un intento de egreso por parte de más de 1100 personas, lo que hizo que los medios de egreso se vieran colmados, siendo de capacidad insuficiente. Sumado a esto el tipo de construcción no era adecuado, la primera llamada que recibió la brigada de incendios fue a las 4:21 p.m., y menos de una hora después, a las 5:14 p.m., el edificio 1 colapso totalmente.

Consecuencias

La fatalidad de 188 personas (en el momento sin contar las que posiblemente fallecieron luego por causa de lesiones graves), y 469 heridos de gravedad que fueron reportados en 22 hospitales, son las más lamentables consecuencias de este hecho.

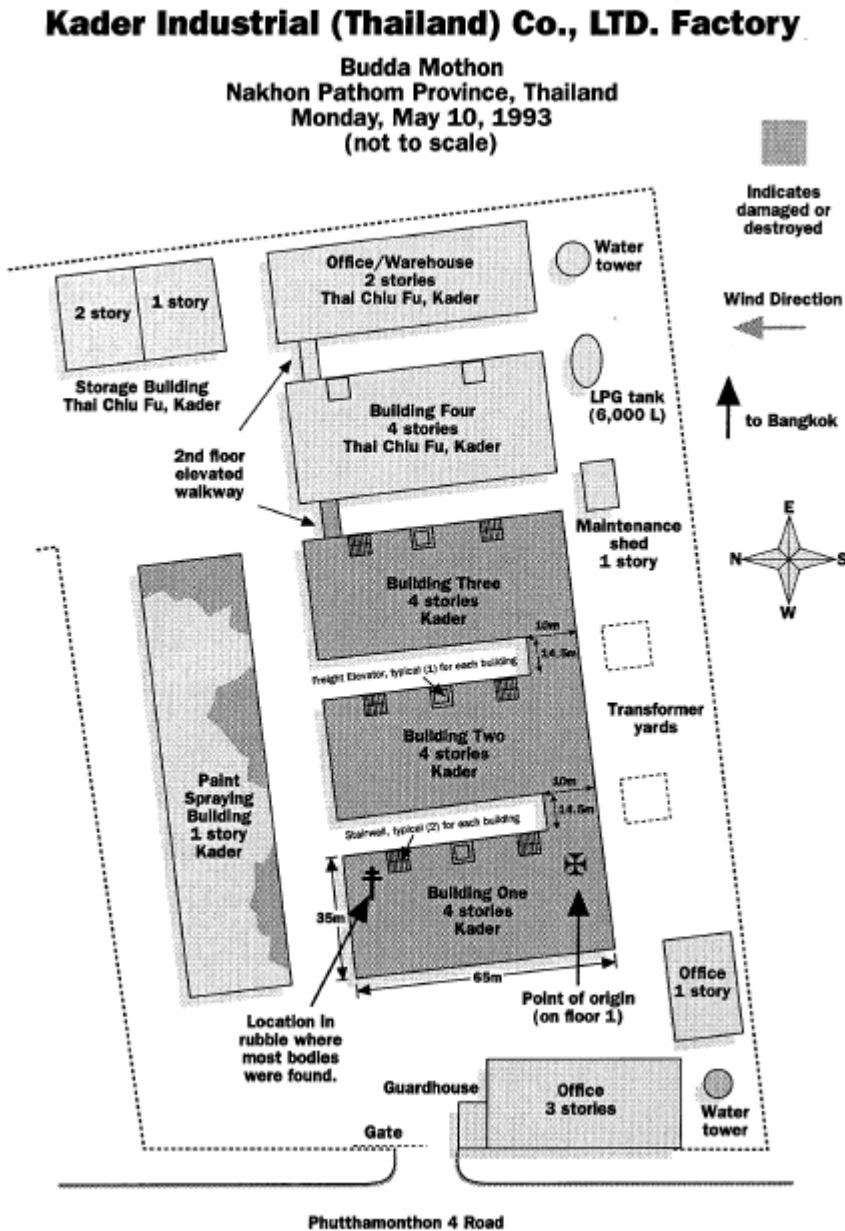


Imagen 2.2.4.1. Se muestra la distribución y afecciones de la planta Kader Industrial en Tailandia por el incendio de 1993. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, KADER INDUSTRIAL CO, FIRE INVESTIGATION REPORT.

Al lugar asistieron aproximadamente 50 aparatos de extinción contra incendios, innumerables ambulancias y aún con todo el esfuerzo, los daños no pudieron reducirse. La pérdida total de los edificios principales de la enorme fábrica, se incluye también en las consecuencias. Por lo trágico del hecho llamo la atención de investigación internacional.

2.2.5. Incendio en Paxton Hotel.

Lugar: Chicago, Illinois.

Fecha: 16 de marzo de 1993

Investigado por: NFPA

En la mañana del 16 de marzo de 1993, aproximadamente a las 4:00 a.m. o antes, ocurrió un incendio por causa y origen no determinado en el Paxton Hotel en Chicago, Illinois, un edificio que albergaba principalmente gente de edad avanzada y de pocos ingresos. El fuego se propagó dentro de varias habitaciones, y los corredores se llenaron de productos de la combustión antes de que todos los ocupantes pudieran escapar y que el cuerpo de bomberos fuera informado.

Los primeros bomberos en llegar encontraron el edificio envuelto en llamas, y a diez personas que estaban asomadas a las ventanas y sobre el tejado, esperando ser rescatadas de inmediato.

En este incendio murieron veinte residentes y algunas personas, quienes se suponía que estaban presentes en el hotel, se dieron por “desaparecidas”. Como resultado, otros 28 residentes sufrieron heridas y el edificio quedó destruido.

Debido a la falta de información y la imposibilidad de recabarla, los orígenes permanecen hasta el momento en que NFPA levantó su informe, totalmente indeterminados.

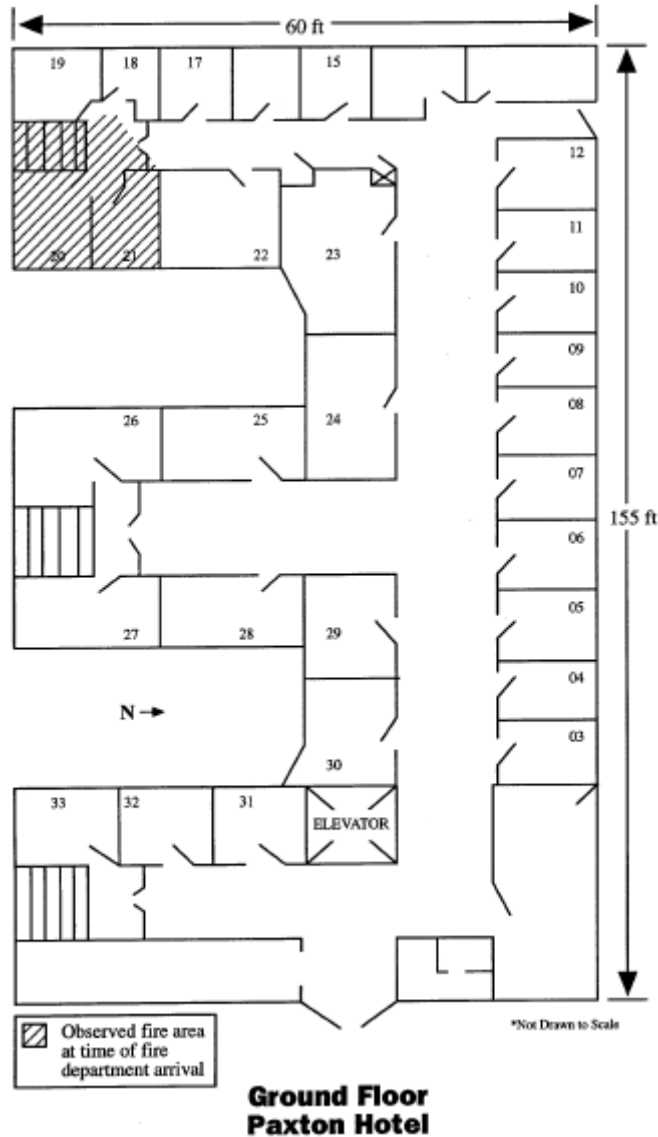


Imagen 2.2.5.1. Se muestra la distribución y afecciones del hotel Paxton al momento de la llegada de los bomberos en el incendio de 1993. Foto tomada de NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, PAXTON HOTEL, FIRE INVESTIGATION REPORT.

2.3. Resumen y Conclusiones Generales de la Situación Actual de las Cosas.

En el capítulo 2 se ha hecho referencia a una gran cantidad de investigaciones realizadas por centros de investigación de organizaciones internacionales y autores unitarios, que conforman una inmensa cantidad de información que puede ser consultada para complementar el estado actual de las cosas, como ha sido mostrado en este trabajo.

De entre miles de investigaciones realizadas por NFPA y otras organizaciones, han sido cuidadosamente seleccionadas 5 de ellas, ya que nos aportan mucho sentido e información de relevancia para el desarrollo del análisis de los incendios de origen eléctrico.

Se han presentado prácticamente en orden de complejidad, comenzando por una investigación totalmente determinada, hasta llegar a una totalmente indeterminada. Esto sustenta que aún las organizaciones con mayor capacidad tecnológica y económica del mundo (como lo es NFPA), encuentran enormes dificultades para investigar incendios, debido a la inmensa cantidad de variables que se encuentra en los mismos.

Se puede ver también a través de las mismas como cuando la complejidad va creciendo, la información va disminuyendo y van quedando mas variables aleatorias sin respuesta; en Rockefeller Center todo pudo investigarse, en MGM Grand fue un poco mas complicado dar con las fuentes y hechos iniciales pero pudo investigarse aún con bastante claridad; la complejidad dada por un centro de tipo industrial como una Central de Teléfonos de una ciudad, complica mas la investigación pero con la tecnología y el esfuerzo adecuados aún se pueden dar con las conclusiones correctas, la falta de previsiones, tecnología y posiblemente apoyo económico, sumado con gran cantidad de destrucción del área, como sucedió en Tailandia en la fabrica Kader, hicieron ya prácticamente indeterminadas las causas, y al final una imposible determinación, cuando el incendio no es atendido a tiempo, en el hotel Paxton, aunque pareciera a primera vista el mas pequeño y fácil de todos.

Cada una de estas investigaciones tienen extensos reportes que pueden ser consultados de forma individual y hemos puesto aquí pequeños resúmenes, solo para que sirvan a manera de ejemplo a conducir las propias.

Como conclusión de esto, puede vislumbrarse que la complejidad del medio, la tecnología contra incendios y la velocidad de respuesta en el momento del incendio, son factores que no solo son decisivos en salvar o no la vida al momento del incendio, sino que guardan una relación que pareciera directamente proporcional a la posibilidad de esclarecer la investigación del incendio luego.

2.4. Bibliografía Relacionada al Capítulo II

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, KADER INDUSTRIAL CO, FIRE INVESTIGATION REPORT.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, MGM GRAND LAS VEGAS, FIRE INVESTIGATION REPORT.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, PAXTON HOTEL, FIRE INVESTIGATION REPORT.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, ROCKEFELLER CENTER, FIRE INVESTIGATION REPORT.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, TEL. CENTRAL L.A., FIRE INVESTIGATION REPORT.

NCFPC, “America Burning”, report of the U.S. National Commission on Fire Prevention and Control, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1973.

Rohr, K. D., and Hall, J.R., Jr. “U.S. Experience with Sprinklers”, National Fire Protection Association Fire Analysis and Research Division, Quincy, MA, Aug.2005.

CAPÍTULO III

*Teorías Modelos y Definiciones de utilidad
actualmente (El Estado del Arte de la Ciencia del
Fuego)*

EN ESTE CAPÍTULO:

- 3.1. Las teorías actuales
 - 3.1.1 El triángulo y el tetraedro del fuego
 - 3.1.2 Otras definiciones teóricas básicas importantes en la ciencia del fuego
 - 3.1.2.1 Atomo
 - 3.1.2.2 Arco eléctrico
 - 3.1.2.3 Calor
 - 3.1.2.4 Calor de reacción
 - 3.1.2.5 Campo electromagnético
 - 3.1.2.6 Chispa eléctrica
 - 3.1.2.7 Combustible
 - 3.1.2.8 Combustión
 - 3.1.2.9 Conducción (de Calor)
 - 3.1.2.10 Convección
 - 3.1.2.11 Corriente eléctrica
 - 3.1.2.12 Elemento químico
 - 3.1.2.13 Encendido
 - 3.1.2.14 Energía
 - 3.1.2.15 Escalar (física-matemática)
 - 3.1.2.16 Estequiométrico
 - 3.1.2.17 Evaporación
 - 3.1.2.18 Fasor (electricidad-matemática)

- 3.1.2.19 Flama o Llama
- 3.1.2.20 Fórmula química
- 3.1.2.21 Función matemática
- 3.1.2.22 Fusión
- 3.1.2.23 Ignición
- 3.1.2.24 Impedancia eléctrica
- 3.1.2.25 Isótopo
- 3.1.2.26 Modelo
- 3.1.2.27 Mole
- 3.1.2.28 Molécula
- 3.1.2.29 Pirolisis
- 3.1.2.30 Plano complejo
- 3.1.2.31 Potencia eléctrica
- 3.1.2.32 Radiación
- 3.1.2.33 Rata de Liberación de Calor (HRR)
- 3.1.2.34 Reacción química
- 3.1.2.35 Sublimación
- 3.1.2.36 Temperatura
- 3.1.2.37 Tensor (física-matemática)
- 3.1.2.38 Transferencia de Calor
- 3.1.2.39 Vector (física-matemática)
- 3.1.2.40 Voltaje
- 3.1.3 Teoría de la Extinción del Fuego
- 3.1.4 Clasificación de los tipos de Incendio
- 3.2 Los Modelos Actuales
 - 3.2.1 Tipos de Modelos
 - 3.2.1.1 Modelos Físicos
 - 3.2.1.1.1 Modelos A Escala
 - 3.2.1.1.1.1 Modelos a Escala Completa
 - 3.2.1.1.2 Modelos Fuera de Escala
 - 3.2.1.2 Modelos Matemáticos
 - 3.2.1.2.1 Modelos Deterministas
 - 3.2.1.2.1.1 Modelos de Amontonamiento de Masas (Lumped-Mass Models)
 - 3.2.1.2.1.2 Modelos de Campo

- 3.2.1.2.2 Modelos Probabilistas
 - 3.2.1.2.2.1 Modelos de red
 - 3.2.1.2.2.2 Modelos Estadísticos
 - 3.2.1.2.2.3 Simulaciones Probabilistas
- 3.3 Ejemplos de Aplicaciones Actuales de la Teoría y Modelado en la Ciencia del Fuego
 - 3.3.1 Predicción de Riesgos
 - 3.3.2 Análisis de Sensitividad
 - 3.3.3 Reconstrucción de Incendios
 - 3.3.4 Modelado por Computador para Diseño Basado en Desempeño (Performance-based design)
- 3.4 Resumen y Conclusiones del Estado del Arte de la Ciencia del Fuego
- 3.5 Bibliografía Relacionada del Capítulo III

CAPITULO III

Teorías, Modelos y Definiciones de utilidad actualmente.

(El Estado del Arte de la Ciencia del Fuego)

3.1 Las teorías actuales

Las teorías actuales aplicadas para la extinción de incendios de tipo eléctrico basan su funcionamiento en la supresión de la fuente eléctrica. El comienzo de cada estudio e investigación formal que ha sido aplicada a la ciencia del fuego, trata de buscar siempre alguna forma de romper alguno de los eslabones por medio de los cuales se da y mantiene el incendio, lo cual es conocido como el “triángulo del fuego” al estudiar la generación del mismo (estado inicial), y bajo algunas literaturas “tetraedro del fuego” (cuando se estudia el fuego en su “estado estable”, o mas bien desarrollado, pues muy difícil mente se llega a una condición estable propiamente dicha). El triángulo cuenta con 3 eslabones principales que son necesarios para que se genere el incendio, y el tetraedro cuenta con 4 eslabones que son necesarios para mantenerlo vivo.

3.1.1 El triángulo y el tetraedro del fuego

En palabras sencillas el triángulo esta constituido por 1.) Un combustible, 2.) Una fuente de calor o temperatura suficiente; y 3.) Oxígeno. Las literaturas que han incluido un cuarto elemento principal en esta descripción de elementos fundamentales para el fuego, han considerado 4.) Una reacción en cadena desinhibida, por medio de la cual se mantiene la combustión; sin embargo este cuarto punto solo es tomado en cuenta realmente como una necesidad para mantener el incendio vivo una vez ha comenzado.

A continuación mostramos representaciones gráficas de los 2 esquemas, el esquema del triángulo del fuego para la ignición y el esquema del tetraedro del fuego para representar incendios que pueden mantenerse vivos por largo tiempo luego de la ignición.

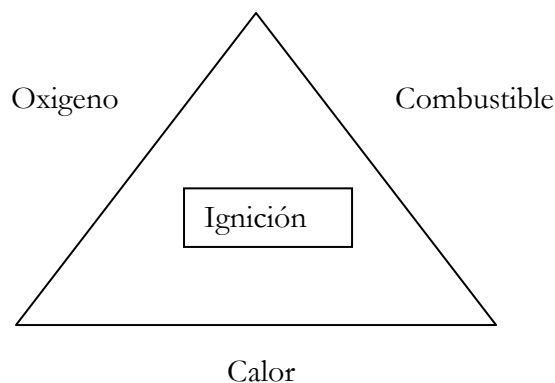


Imagen 3.1.1.1. Representación gráfica del “Triángulo del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para llevar a cabo la ignición.

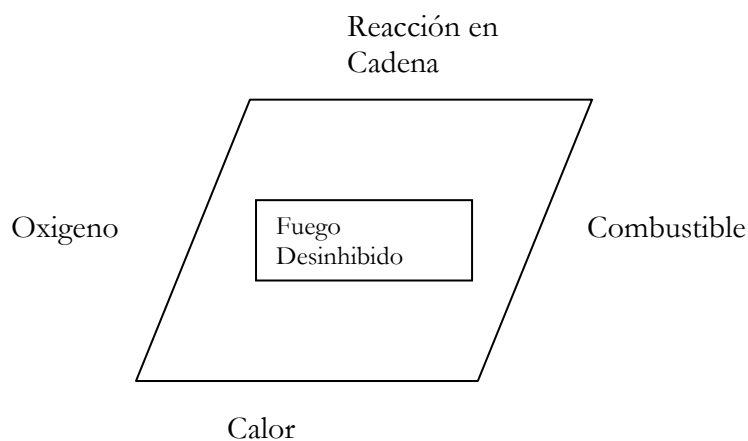


Imagen 3.1.1.2. Representación gráfica del “Tetraedro del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para tener un fuego mantenido.

Como se aprecia en las imágenes anteriores, el triángulo del fuego trata de representar la combinación adecuada de necesidades requeridas para dar inicio a un incendio, o sea para provocar una “chispa”. No solo es necesario tener combustible, oxígeno y calor, sino que hace falta combinarlos en las cantidades adecuadas con las cuales se satisfacen las condiciones apropiadas para que el calor, combustible y oxígeno, entren en un proceso químico llamado reacción exotérmica de combustión, por medio del cual se transforman materiales combustibles en productos al reaccionar químicamente con el oxígeno, librandolo una gran cantidad de calor.

Esta “ignición” o “encendido” es un proceso transitorio, en muchos casos muy inestable, que puede terminar muy pronto (a veces fracciones de segundos), con lo que solo se obtiene “un chispazo”. En otras ocasiones, el fuego puede mantenerse por si solo, sin apagarse por largo tiempo, es entonces cuando se considera que ha salido de la simple

ignición y se ha convertido en un incendio, y el mismo ha logrado mantenerse vivo o en “estado estable”. La razón por la cual no se extingue inmediatamente en este caso es porque se dieron las condiciones necesarias para que la reacción química inicial se vuelva una “reacción en cadena desinhibida”, con lo que aparecen llamas y se libera mucho más calor. Al suceder esto, el oxígeno y los combustibles se encuentran con mas facilidad pues las llamas propician condiciones de presión y temperaturas ambientales necesarias para esto (lo cual se vera mas adelante), lo cual sigue repitiéndose, generando mas calor y propiciando la extensión de la reacción en cadena una y otra vez.

3.1.2. Otras definiciones teóricas básicas importantes en la ciencia del fuego.

A manera de proveer al lector de ciertas definiciones importantes que serán de uso común en lo siguiente de la presente literatura ofrezco una pequeña extracción de aquellas que he considerado más importantes y enfocadas al tipo y características del tema específico que estamos desarrollando.

3.1.2.1. Atomo

Son los bloques constructores más pequeños de cada uno de los elementos químicos básicos. Según las teorías químicas manejadas en la actualidad son la base de toda la materia. Cada átomo básicamente tiene una carga positiva concentrada en su núcleo (en sub-partículas llamadas protones, separados por partículas neutras llamados neutrones; y alrededor de este núcleo giran partículas cargadas negativamente con la misma intensidad de carga que los protones, llamados electrones. La estructura de la “nube de electrones” que rodea el átomo, determina la naturaleza química de la posibilidad de reacción o “reactividad” del átomo.

3.1.2.2. Arco eléctrico

Se refiere a la existencia de una corriente eléctrica mantenida en el aire o un medio fluido, ya sea líquido o gaseoso, en el cual la forma de la línea de corriente no es constante sino que varía de acuerdo a los movimientos y características del fluido donde se encuentra.

3.1.2.3. Calor

Es una forma de energía que esta asociada al movimiento de los átomos y/o moléculas (partículas) que forman parte de la materia, el cual puede ser generado por reacciones químicas, nucleares, disipación electromagnética y disipación mecánica.

3.1.2.4. Calor de Reacción

Se refiere a la energía que es absorbida o liberada en el momento que se lleva a cabo una reacción química. Aquellas reacciones donde se libera energía se conocen como exotérmicas y en las que se absorbe energía se conocen como endotérmicas.

3.1.2.5. Campo Electromagnético

Es un campo físico de tipo tensorial, que afecta a las cargas con carga eléctrica. El mismo tiene 2 partes o componentes de campo, el campo eléctrico y el campo magnético. Para un sistema de referencia fijo cualquiera, una partícula cargada, referenciada a este sistema producirá un campo eléctrico debido a la cantidad de carga que tiene, y un campo magnético debido a la carga y a la cantidad de movimiento que tenga respecto al sistema (si no se mueve respecto al sistema el campo magnético será nulo en esta referencia); sin embargo un observador en un movimiento relativo a este primer sistema de referencia, medirá efectos eléctricos y magnéticos diferentes a los medidos en el mismo sistema de referencia por efectos de las diferencias de velocidades respecto de la carga que produce los campos; lo que ilustra la aplicación de la relatividad de los campos. Como consecuencia de lo anterior se tiene que ambos campos pueden ser modelados como cantidades vectoriales referenciadas a un sistema de referencia (como el inicial), pero ni el vector de campo eléctrico, ni el vector de inducción magnética, se comportan genuinamente como magnitudes físicas de tipo vectorial en todas las situaciones y condiciones, sino que juntos constituyen un “tensor”, para el que si existen leyes de transformación físicamente congruentes. La intensidad matemática previa de los temas de campos electromagnéticos no será desarrollada en esta literatura, pero si se hará referencia a dichos desarrollos para conseguir ciertas aplicaciones y conclusiones de los modelos que serán propuestos, por lo que se intentará referenciar al lector de la mejor forma posible, y solamente a cada uno de los temas importantes de la teoría de campos electromagnéticos, para el desarrollo del presente trabajo.

3.1.2.6. Chispa Eléctrica

Se refiere a un arco eléctrico de muy poca duración (fracciones de segundo).

3.1.2.7. Combustible

En ingeniería de incendios se refiere a cualquier sustancia capaz de reaccionar con el oxígeno por medio de la aplicación de calor, entrando en una reacción exotérmica llamada combustión, en la que se liberan grandes cantidades de calor. Específicamente en el área de petróleos, se les llama combustibles líquidos a aquellas sustancias que tienen su punto de ignición o “flashpoint” por encima de los 100°F (37°C), ya que aquellos que tienen el “flashpoint” por debajo de esta temperatura son denominados “líquidos inflamables” (siempre y cuando la presión de vapor no exceda 40 psia).

3.1.2.8. Combustión

Es un tipo de reacción química exotérmica, donde los reactivos son el oxígeno y alguna otra sustancia que se llamará genéricamente “combustible”.

3.1.2.9. Conducción (de Calor)

Es el mecanismo de transferencia de la energía térmica (calor) entre dos sistemas o cuerpos, basado en el contacto directo de sus partículas, sin flujo neto de materia, el cual tiende a igualar la temperatura dentro de cada sistema o cuerpo, y entre los diferentes cuerpos o sistemas que están en contacto durante la transferencia, por medio de ondas. El calor siempre se conduce de los puntos con mayor temperatura a los puntos con menor temperatura.

3.1.2.10. Convección

Es el mecanismo de transferencia de la energía térmica (calor), que se produce por intermedio de un fluido que es capaz de transportar el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Al cambiar la cantidad de calor en un área específica de un fluido, cambian también sus propiedades físicas como densidad, peso específico, presión relativa, volumen, etc. La mayor parte de los fluidos aumentan su volumen y disminuyen su densidad al adquirir calor. Las partes del fluido que tienen menor densidad, se hacen más livianas, ascendiendo y desplazando a las partes de fluido que están arriba, las cuales toman áreas más bajas. De esta forma se forman corrientes internas dentro del fluido, con lo cual se mezcla el mismo y dentro de las corrientes se lleva el calor y se da la transferencia por mezcla. También se incluye en este punto el intercambio de energía entre superficies sólidas y un líquido, cuando el sólido está en contacto con el líquido que sufre el fenómeno

descrito; una vez el calor entra en el sólido, la transferencia dentro del sólido se da por conducción.

3.1.2.11. Corriente eléctrica

Se refiere al “flujo” de electrones (o protones), partículas cargadas, a través de un medio. La misma puede ser unidireccional (corriente directa “DC”), o alternada en una misma dirección pero cambiando el sentido a lo largo del tiempo (corriente alterna “AC”). Cuando la corriente tiene más de una dirección, o los movimientos no son constantes a lo largo del tiempo, se le dan nombres como “densidad de corriente” o “movimiento electrónico”.

3.1.2.12. Elemento Químico

Son sustancias que están compuestas de un solo tipo de átomos. Este tipo único de átomo para cada elemento está diferenciado por un “número atómico” que no es más que el número de protones en su núcleo (igual al número de electrones cuando está estable), y un “peso atómico” que es un peso proporcional al peso de ese átomo en una escala basada arbitrariamente en el isótopo de carbono 12 (isótopo de carbono que contiene 6 protones y 6 neutrones). Este isótopo representado como C-12 contiene 6.022×10^{23} átomos (el número de Avogadro) en una cantidad física de masa de 12 gramos del isótopo. Los químicos han estructurado un ordenamiento de los elementos químicos en base a su número atómico en una tabla llamada “Tabla Periódica”.

3.1.2.13. Encendido

Es el proceso por medio del cual una llama que alcanza una sustancia es capaz de llevarla al estado de combustión.

3.1.2.14. Energía

De forma general se refiere a la capacidad de realizar trabajo, pero cuando se use bajo la referencia de la presente literatura también se estará refiriendo más bien a cualquiera de las formas puras de esta capacidad, aprovechable y disponible en un momento dado para que pueda ser tomada por un agente consumidor, o por un conductor de la misma. (ejemplo: energía eléctrica, calor, energía mecánica). La energía eléctrica por ejemplo es aquella que se debe a la existencia de un campo eléctrico que crea un voltaje entre 2 puntos, con lo que se crea una “capacidad de impulsar partículas cargadas” o establecer una corriente de un

punto a otro, al establecerse esta corriente se forman interacciones magnéticas, con lo cual surge una componente magnética haciéndola entonces “energía electromagnética. La energía mecánica es en general la suma de las energías cinética (debido a la cantidad de movimiento) y potencial (que depende de las fuerzas de atracción que existen entre los cuerpos y las configuraciones geométricas que tengan entre sí) de los cuerpos. Las definiciones en el campo de la energía son muchas y muy diversas, dependiendo de la “fuente de la energía” y la “forma como puede ser liberada la misma”, y pueden llegar a tener interpretaciones que tienden en muchos casos a entrar en confusiones filosóficas profundas acerca de la “clase de energía”. Como ejemplo se puede tratar de definir, que tipo de energía poseen un electrón y un protón que se encuentran en un espacio; se podría definir su energía como eléctrica, debido a que existe una atracción entre ellos por causa de los campos eléctricos resultantes de sus cargas, sin embargo podría definirse perfectamente como energía potencial de acuerdo a que tan lejos están el uno del otro, y la existencia de una fuerza de atracción entre ellos será inversa y proporcional a el cuadrado de la distancia. Igualmente se podría tratar de entrar en un análisis filosófico acerca de la corriente eléctrica (flujo de electrones) y su definición por energía electromagnética o cinética, o el calentamiento de un cuerpo, el cual está relacionado con la velocidad de las partículas y choques dentro del mismo. Al final no es nuestro objetivo hacer de esta literatura un ensayo interpretativo ni una clasificación filosófica de las formas de energías existentes (que son muchas); y en base a esto, nos hemos limitado a despejar la duda de la forma en la cual haremos uso de la palabra “energía”, a la luz y la interpretación que consideramos necesaria para el desarrollo de nuestro trabajo; sin dejar de mencionar al lector que por lo amplio del sentido de la palabra “energía”, la definición aquí dada es solo válida para el alcance de esta obra.

3.1.2.15. Escalar (física-matemática)

En la presente literatura, el término “escalar” se refiere a la entidad matemática que puede representar una magnitud física con una única coordenada. Si la magnitud es invariable, se le conoce como “constante”, si es variable se le conoce como “función escalar”. En la muchos de los casos, como la coordenada de acción es única, la misma ni siquiera se toma en cuenta, pues no hay mas direcciones de comparación, sino solamente el módulo o la magnitud del mismo. Como ejemplos de escalar están la masa de un cuerpo (constante) y el peso de un cuerpo (función escalar).

3.1.2.16. Estequiométrico

Un proceso estequiométrico es aquel en el que se tiene la equivalencia exacta de combustible y oxígeno en una mezcla (aire-combustible), para que una vez dada la combustión, todo el combustible haya sido consumido, y no quede oxígeno. Esto es una forma ideal de la combustión.

3.1.2.17. Evaporación

Es el término utilizado para nombrar el cambio de estado físico de una sustancia del estado líquido al gaseoso. No involucra ningún cambio químico de la sustancia, solo un cambio físico.

3.1.2.18. Fasor (electricidad-matemática)

Es un “vector” representado en el plano complejo, por lo cual solo tiene 2 componentes, la componente real y la imaginaria.

3.1.2.19. Flama o Llama

Es la reacción de oxidación gaseosa que tiene dos características principales: 1.) Ocurre en una región del espacio mucho mas caliente que la región que la rodea; 2.) Generalmente emite luz.

3.1.2.20. Fórmula Química

Representación escrita de los números de átomos presentes en los varios elementos que componen una molécula.

3.1.2.21. Función Matemática

Es una expresión matemática que denota la existencia de una correspondencia entre 2 o mas variables. Las funciones pueden de diversos tipos; escalares, vectoriales, diferenciales, integrales, etc., y depende de la forma como se relacionen las variables en juego.

3.1.2.22. Fusión

Cambio de estado de una sustancia de estado sólido a líquido de acuerdo a las condiciones de calor y presión. No involucra ningún cambio químico de la sustancia, solo un cambio físico. Cuando se refiere a ciencias químicas, es el término que se usa para nombrar la unión de dos núcleos atómicos.

3.1.2.23. Ignición

Es el proceso por medio del cual se da inicio a una combustión auto-sustentada, o sea que no se requiere de una llama externa para continuar la combustión una vez comenzada. La **autoignición** es el proceso de ignición que no requiere de llama externa para comenzar.

3.1.2.24. Impedancia Eléctrica

Es la dificultad al paso de la corriente que ofrece una sustancia cualquiera cuando a través de ella existe un campo eléctrico que crea un voltaje y un flujo de electrones (corriente). La impedancia esta compuesta por dos cantidades expresadas matemáticamente en el plano complejo como Resistencia (en el eje real) y Reactancia (en el eje imaginario). La cantidad inversa a la impedancia es la admitancia eléctrica y mide la “facilidad” al paso de la corriente. Igualmente esta compuesta por dos cantidades expresadas matemáticamente en el plano complejo como Conductancia y Susceptancia (en los ejes real e imaginario respectivamente).

3.1.2.25. Isótopo

Son átomos que contienen el mismo número de protones pero diferente número de electrones. Muchos elementos tienen más de un isótopo, de ejemplo común es el Carbono que tiene C-12 y C-13, que contienen ambos 6 protones pero tienen 6 y 7 neutrones respectivamente.

3.1.2.26. Modelo

De forma general, un modelo para una cierta teoría matemática, es un conjunto sobre el cual se han definido relaciones unitarias, binarias y trinarias, que satisfacen las proposiciones derivadas del conjunto de axiomas de la teoría; sin embargo en ingeniería de protección de incendios, como ciencia física aplicada; el “modelo” se refiere a un tipo de representación científica que emplea un formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, con la finalidad de estudiar comportamientos de

sistemas complejos ante situaciones difícilmente observables en la realidad. La modelización o modelado (técnicas para la consecución de los modelos), es ampliamente utilizada en la investigación de protección contra incendios, debido a que es muy complicado tener presente y/o incluir todas las variables presentes en los incendios reales, con lo cual el modelado se hace una herramienta de suma importancia. En ingeniería de incendios, los modelos se dividen en 2 grandes grupos: 1.) Modelos Físicos, 2.) Modelos Matemáticos. Los modelos físicos se dividen a su vez en a.) Modelos A Escala y b.) Modelos Fuera de Escala. Los modelos matemáticos a su vez se dividen en a.) Modelos Determinísticos o Deterministas y b.) Modelos Estocásticos o Probabilísticos. Los modelos formarán parte muy importante de la presente literatura, por lo cual se extenderá un poco más de la teoría de los mismos, en páginas subsiguientes.

3.1.2.27. Mole

Es la cantidad correspondiente en gramos al peso molecular de cada elemento (o molécula), teniendo en cuenta que cada mole contiene 6.022×10^{23} átomos o moléculas (el número de Avogadro).

3.1.2.28. Molécula

Son grupos de átomos combinados químicamente en proporciones justas y constantes a lo largo de una sustancia. Las sustancias compuestas por moléculas contienen de hecho 2 o más clases de átomos distintos, y son llamadas “compuestos”. Los compuestos tienen una sola clase de moléculas.

3.1.2.29. Pirolysis

En general es la descomposición química de una sustancia por el calentamiento de la misma en ausencia de oxígeno (sin combustión), sin embargo en ingeniería de incendios es un término utilizado para describir el proceso por el cual un sólido se vaporiza y al mismo tiempo se dan también una descomposición química.

3.1.2.30. Plano Complejo

Es el plano de representación de lo que llamamos “números complejos”. Puede entenderse como un plano cartesiano de 2 dimensiones donde una es la parte real y la otra la imaginaria. Es de extensa utilidad en las ciencias de la electricidad, donde se hacen transformaciones de funciones del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Al

hacer estas transformaciones, y luego de algunas simplificaciones, una función escalar matemáticamente muy elaborada (la cual puede incluir en ella varias funciones trigonométricas sumadas), queda reducida por medio de la relación de la “identidad de Euler” y alguna destreza matemática adicional, a una representación de “número complejo”, el cual no es mas que “un punto del plano complejo” el cual tiene una parte “real” y una “imaginaria” que son sus intersecciones con cada uno de los ejes del plano complejo. A la representación gráfica de este número complejo especial dado en electricidad, bajo la luz de sus dos componentes, las cuales lo dan como resultante, se le llama “fasor”.

3.1.2.31. Potencia Eléctrica

Es la cantidad total de energía por unidad de tiempo que pasa por medio de una corriente eléctrica al atravesar una sustancia o cuerpo y formar a través de este un voltaje. La misma es expresada matemáticamente en el plano complejo y compuesta por potencia Real y Reactiva (en los ejes real e imaginario respectivamente), las cuales se suman fasorialmente para dar como resultado la potencia eléctrica total o aparente, la cual es llamada también potencia compleja. El motivo principal de estas divisiones es el hecho de que por características propias de los elementos eléctricos, no toda la potencia que se produce llega finalmente a ser utilizada de alguna forma en los puntos donde se utiliza; la potencia que se produce en los generadores es la potencia total o aparente, pero la que se utiliza de alguna manera es solo la potencia real, que es una parte de la potencia total.

3.1.2.32. Radiación

Se refiere a la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas, o partículas subatómicas que viajen en el espacio vacío o en un medio material. Se han diferenciado por esta razón dos tipos de radiación; radiación electromagnética, la que se da por medio de las ondas electromagnéticas; y radiación corpuscular, la que utiliza las partículas subatómicas viajeras. Ejemplo de radiaciones son la luz, el calor emitido por una llama, las señales de radiocomunicaciones, los rayos gamma.

3.1.2.33. Rata de Liberación de Calor (HRR)

Es una cantidad utilizada en ingeniería de protección de incendios cuya simbología “HRR” proviene del idioma en el que fue creada (Heat Release Rate), y es probablemente la cantidad definida mas importante usada para caracterizar el riesgo de flamabilidad dado por

un material. El HRR mide la rata promedio a la cual un material que se quema libera energía química, y esta expresada usualmente como calor liberado por unidad de superficie expuesta del material que se esta quemando. Al ser utilizada como una entrada en los modelos computacionales de incendios, se puede llegar a obtener mucha información modelada acerca del tamaño de los incendios, su intensidad, forma como crecen, tiempo disponible para el egreso de los lugares incendiados, formas de extinción posibles y sus respuestas, y muchos otros parámetros de utilidad. Existen muchas otras cantidades características en ingeniería de protección de incendios que son utilizadas en situaciones específicas de modelado, y también con aplicaciones prácticas para la extinción de los fuegos. La “Rata de Quemado” por ejemplo es una cantidad que mide cuan rápido ocurre la reacción de oxidación en un incendio, los “Límites de Flamabilidad” miden en el caso de gases, las concentraciones mínimas y máximas a las cuales los gases mezclados con el aire pueden entrar en ignición y así muchas otras definiciones propias de incendio tomarán lugar en puntos situaciones específicas. El HRR sin embargo es una base general para determinar independientemente de lo que se queme, cuanto calor (o cuanta energía) tendrá el incendio y por lo tanto es considerada una definición básica en esta literatura.

3.1.2.34. Reacción Química

Es un proceso por medio del cual se dan recombinaciones de átomos y moléculas entre compuestos y elementos. Las sustancias iniciales en la reacción se llaman reactivos y las finales se llaman productos, y el proceso de reacción química es el que convierte los reactivos en productos.

3.1.2.35. Sublimación

Es el término utilizado para nombrar el cambio de estado físico de una sustancia del estado sólido al gaseoso. No involucra ningún cambio químico de la sustancia, solo un cambio físico.

3.1.2.36. Temperatura

Es una magnitud física de tipo escalar, relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, específicamente con la parte de la energía interna conocida como “energía sensible”, que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, ya sea en un sentido traslacional, rotacional o en forma de vibraciones. A medida que mayor es

esta “energía sensible” se observa que el sistema esta “mas caliente” por lo que se puede decir que la temperatura es una forma de medir la cantidad de esta energía en el cuerpo.

3.1.2.37. Tensor (física-matemática)

En la presente literatura, esta palabra corresponderá a una entidad matemática de varias componentes, en la cual se generalizan los conceptos de escalar, vector y matriz de una manera que la entidad es independiente de cualquier sistema coordenado. En vista de que las magnitudes físicas reales son independientes del sistema de coordenadas que utilice su formulación matemática (ya sea que este dada por funciones y/o modelos escalares, vectoriales o matriciales), el estudio general global de las consecuencias de este hecho, solo puede ser dado de forma precisa por medio del análisis tensorial. Como ejemplo se presenta la teoría de campos electromagnéticos, cuyo modelado básico se presenta con ecuaciones diferenciales y campos vectoriales, pero el estudio de sus consecuencias globales se hace por análisis tensorial, debido a que no siempre el sistema de referencia de la fuente, es el mismo sistema de referencia del observador.

3.1.2.38. Transferencia de Calor

Se refiere a cualquiera de los mecanismos o procesos por medio de los cuales el calor se mueve de un lugar a otro en un medio o conjunto de medios (sustancias o cuerpos). Los 3 mecanismos principales descritos a la luz de la ciencia común actual son Conducción, Convección y Radiación.

3.1.2.39. Vector (física-matemática)

En nuestro trabajo, esta palabra corresponderá a la entidad matemática por medio de la cual se puede representar una magnitud física, que tiene cuatro componentes básicos:

Origen: Es el punto de aplicación del vector.

Magnitud o Modulo: El cual determina el “tamaño” o la “intensidad” del vector.

Dirección: Determina la recta de acción en el espacio donde se ubica el vector.

Sentido: Determina hacia que lado de la recta de acción se dirige el vector.

Los vectores requieren de un sistema coordenado específico para ser representados, y sus efectos están relacionados al sistema coordenado donde son representados. Cuando el módulo del vector no es una magnitud constante, sino una función, a esta entidad se le denomina “función vectorial” y su campo de acción es el “campo vectorial”.

3.1.2.40. Voltaje

Es el término utilizado de forma simple para referirse a la energía potencial eléctrica que existe entre 2 cuerpos cargados eléctricamente. La diferencia de la carga y la dificultad al paso de la corriente eléctrica (impedancia) entre los dos cuerpos determinarán la cantidad de corriente que fluye entre ellos y la potencia eléctrica que se libera.

3.1.3. Teoría de la Extinción del Fuego

Luego que hemos planteado la teoría del fuego (triángulo y tetraedro del fuego), y que hemos definido conceptos teóricos importantes, los cuales nos ayudarán con la interpretación de aquí en adelante; es propicio formular lo que se tiene hasta el día de hoy como “Teoría de la Extinción del Fuego”.

Esta teoría, trata de exponer el conocimiento científico y técnico necesario para extinguir el fuego, análogamente a lo que expone la teoría del fuego (triángulo y tetraedro) para su existencia. En palabras sencillas la teoría del fuego expone que si no se cuenta con alguno o con varios de los elementos que hacen posible la existencia del fuego (el tetraedro del fuego), el fuego se extinguirá; igualmente si no se cuenta con alguno o con varios de los elementos que hacen posible el comienzo del fuego (el triángulo del fuego), el fuego ni siquiera podrá dar inicio.

En base a esto el triángulo del fuego se usa aplicadamente para prevención contra fuego y el tetraedro del fuego es el que nos sirve ampliamente para la extinción.

Consiguientemente, uno o más de uno de los mecanismos que exponemos a continuación, utilizados individual o simultáneamente pueden ser utilizados para extinguir un fuego:

- a.) Reducir la temperatura de la llama o del combustible.
- b.) Remover o diluir el oxígeno presente en el área de combustión.
- c.) Introducir compuestos que modifiquen químicamente la combustión, o rompan la reacción en cadena.
- d.) Separar físicamente la sustancia combustible de la llama, o removerla del área de combustión.

Como se puede apreciar cada uno de los mecanismos esta basado básicamente en suprimir alguno de los elementos del tetraedro del fuego, ya sea el calor, combustible, oxígeno o la reacción en cadena; con lo que se logrará teóricamente la extinción del mismo.

Se pueden usar varios mecanismos simultáneamente, por ejemplo cuando se aplica agua para extinguir un incendio en un combustible sólido que se está quemando en el aire, el combustible es enfriado por el agua lo que da como efecto que la rata de liberación de calor por medio de pirolisis o gasificación decrezca, la llama también es enfriada por el agua lo que ayuda a causar una reducción en la retroalimentación de calor hacia el combustible, ayudando a debilitar la reacción en cadena, y también al mismo tiempo se genera vapor de agua, el cual se esparce en el aire alrededor de la combustión y ayuda a diluir el oxígeno circundante sofocando el incendio.

Los agentes químicos secos son otro ejemplo de métodos aplicados para la extinción de incendios, en este caso ampliamente aplicados para incendios eléctricos y de líquidos combustibles, y los mismos envuelven varios mecanismos de extinción. Cuando un agente químico seco es aplicado a un incendio eléctrico o de líquido combustible, el mismo produce una interacción química con la llama para ayudar a romper la reacción en cadena, cubre la superficie del lo que se esta quemando (un cable eléctrico o un líquido combustible) con una cubierta que lo separa de la llama, enfría la llama y bloquea la transferencia de energía radiante.

La mayor parte de los métodos aplicados hoy en día para extinguir incendios utilizan mas de un mecanismo de extinción; no es nuestro objetivo presentarlos todos, sino solamente exponer la teoría básica de la extinción utilizada hoy en día en ingeniería de protección contra incendios; sin embargo en la bibliografía relacionada se puede consultar extensa información en muchos libros que están especializados en el tema de la extinción, con lo que el lector puede obtener referencia y amplia información del tema.

3.1.4. Clasificación de los tipos de Incendio

Como ya se ha mencionado líneas atrás de esta literatura, dependiendo de la región del mundo donde se encuentre, algún organismo de seguridad tendrá una clasificación para los tipos de incendio adoptada. Nosotros en esta literatura usaremos sólo como referencia la clasificación sugerida por NFPA, la cual da las siguientes clases:

- a. Clase A: Incendios con materiales combustibles ordinarios, como madera, papel, ropa, caucho y muchos plásticos.
- b. Clase B: Incendios con líquidos combustibles e inflamables, grasas de petróleo, alquitranes, aceites, pinturas basadas en aceite, solventes, lacas, alcoholes y gases inflamables.

- c. Clase C: Incendios que tengan que ver con equipo eléctrico energizado.
- d. Clase D: Incendios con metales combustibles, como magnesio, zirconio, sodio, titanio, litio y potasio.
- e. Clase K: Incendios en aplicaciones de cocina, que envuelvan medios combustibles de cocina, tales como aceites y grasas vegetales y animales.

3.2. Los Modelos Actuales

La modelización o modelado, ha sido ya desde hace décadas una parte importante de la investigación en la ciencia y la ingeniería del fuego y la protección de incendios. Desde el principio de los tiempos, el hombre ha tratado de representar fenómenos naturales, aproximando su comportamiento a alguna función matemática; la probabilidad y rata de crecimiento de una colonia de bacterias, el cálculo de la velocidad en caída libre de un cuerpo, y el curso que seguirán dos bolas de billar en un choque totalmente elástico son ejemplos de modelados sencillos de fenómenos reales que han sido representados con funciones matemáticas sencillas.

En el campo de la ingeniería, esto es el diario vivir, el modelado es el principio de cada uno de los nuevos productos que se diseñan, e incluso con el desarrollo tecnológico intenso que tienen los sistemas computacionales, una forma especial de modelado por computador llamado “simulación” ha sido desarrollada, a forma de ver que sucede no solo en el estado estático del elemento de ingeniería que se está diseñando, sino en el estado dinámico, trabajando, sometido a diversas condiciones de trabajo y ambientales, y que sucede con el a través del tiempo, con el desgaste, e incluso con variables estocásticas imprevistas.

Las simulaciones han tomado una parte importante en la ingeniería de incendios, primeramente por su capacidad de prever de forma dinámica el comportamiento de los eventos de incendio bajo diversas condiciones, y segundo por el gran potencial matemático que se tiene al desarrollar complicadas ecuaciones por medio de herramientas de análisis numérico, diferenciación finita y elementos finitos, que son metodologías matemáticas poderosas aplicables de forma sencilla a programas computacionales para resolver problemas complicados.

Existen programas de computación diseñados para diversos objetivos de modelado; están aquellos que tienen como fin modelar los diversos tipos de incendio y sus condiciones, los cuales están enfocados a la investigación; están aquellos diseñados para

evaluar los efectos del fuego en las personas y las propiedades; están aquellos que se utilizan para hacer análisis de riesgos por fuego; y aquellos que se utilizan para diseñar sistemas de protección, comúnmente conocidos como “programas de diseño”, los cuales se han convertido en un estándar de la industria de la ingeniería de protección de incendios en muchas de sus diversas áreas (como protección automática por rociadores, agentes limpios, presurización, cálculos de cortocircuitos, etc.).

El estado del arte en lo que se refiere a modelado por computadora, está cambiando rápida y constantemente en los últimos años. Los investigadores de diversas partes del mundo están dedicando intensos esfuerzos a entender mejor los procesos envueltos en el crecimiento del fuego, lo que es sumamente estocástico y aleatorio. Sendas investigaciones se han realizado por organismos como la NFPA, FM Global y otros, las cuales incluyen costosos experimentos que requieren generar incendios reales de escala completa, los cuales son medidos por medio de instrumentos especializados, solo para tratar de comprender y modelar el comportamiento del fuego.

Una vez se van obteniendo conclusiones se les da un sentido matemático, y se incluyen en los programas de modelado y simulación a forma de mejoras. En general, el talón de Aquiles del modelado, sigue siendo la inmensa cantidad de variables estocásticas, y el hecho de poder determinar cual de ellas realmente no tiene mucha importancia y cual si, ya que los incendios son tan dinámicos y la dinámica es tan rápida, que es muy difícil comprender su movimiento y predecir cual será su próxima acción y en base a cual de las muchas variables. Sumado a eso, el inmenso costo de la experimentación (la cual casi siempre es de tipo destructiva) para poder observar y analizar uno, hace que este trabajo sea de los mas difíciles en el mundo de la investigación científica y de ingeniería.

Personalmente, considero que si se llegara a conocer realmente buena la naturaleza del fuego (o por lo menos una muy buena parte de ella), podríamos hacer modelos análogos para comprender la naturaleza de las otras formas de energía pura (como lo son la electricidad, las radiaciones y el calor), ya que si bien es cierto, ninguna de ellas es totalmente comprendida y modelada de forma absoluta, todas ellas tienen características comunes: 1.) Son muy dinámicas, 2.) Son aleatorias en un medio volumétrico cuasiconstante, 3.) Son “amorfas” en un medio volumétrico cuasiconstante, 4.) Tienen un comportamiento estocástico y errático a lo largo del tiempo, durante el tiempo que existen, el cual depende de innumerables variables.

De las formas puras de energía, estudiar el fuego tiene sus ventajas; primeramente es visible al ojo humano con lo que puede ser perfectamente observado; y en muchos de

los casos tiene un desarrollo lento en cada una de sus fases (comparado con la electricidad, o las radiaciones que son demasiado rápidas), lo que da tiempo de observación de cada uno de sus movimientos.

3.2.1. Tipos de Modelos

De manera general, los modelos se dividen en 2 grandes grupos:

- a. Modelos Físicos
- b. Modelos Matemáticos

Los modelos físicos se dividen a su vez en:

- a. Modelos a escala
- b. Modelos fuera de escala

Una forma espacial de modelo a escala, el cual es al 100% de la escala, o al tamaño real de lo que se está modelando recibe el nombre de:

- c. Modelo a escala completa.

Los modelos matemáticos se dividen a su vez en:

- a. Modelos determinísticos o deterministas.
- b. Modelos probabilísticos o estocásticos.

Los modelos deterministas más avanzados pueden ser subclasificados a su vez en:

- a. Modelos de amontonamiento de masas (“Lumped-mass models”).
- b. Modelos de campo.

Los modelos probabilísticos más avanzados pueden ser divididos en:

- a. Modelos de red (network).
- b. Modelos estadísticos.
- c. Simulaciones probabilísticas.

La mayoría de los modelados en ingeniería de protección contra incendios caen en la clasificación dada, existen en ingeniería de incendios inmensa cantidad de nombres para modelos; como lo son modelados especializados de predicciones de postflashovers, explosiones, modelados de supresión de incendios, modelado de efectos del fuego,

modelados de interacciones y comportamiento humano, presurización, crecimiento de la llama, arqueo eléctrico, generación de chispa, ventilación forzada, esparcimiento de humos etc. los cuales se mencionan aparte pero de alguna u otra forma caen dentro de la clasificación mencionada, la cual es la clasificación base de modelado manejada en protección de incendios en la actualidad.

La imagen 3.2.1.1 da un vistazo de la organización general de la clasificación de los modelos de fuego.

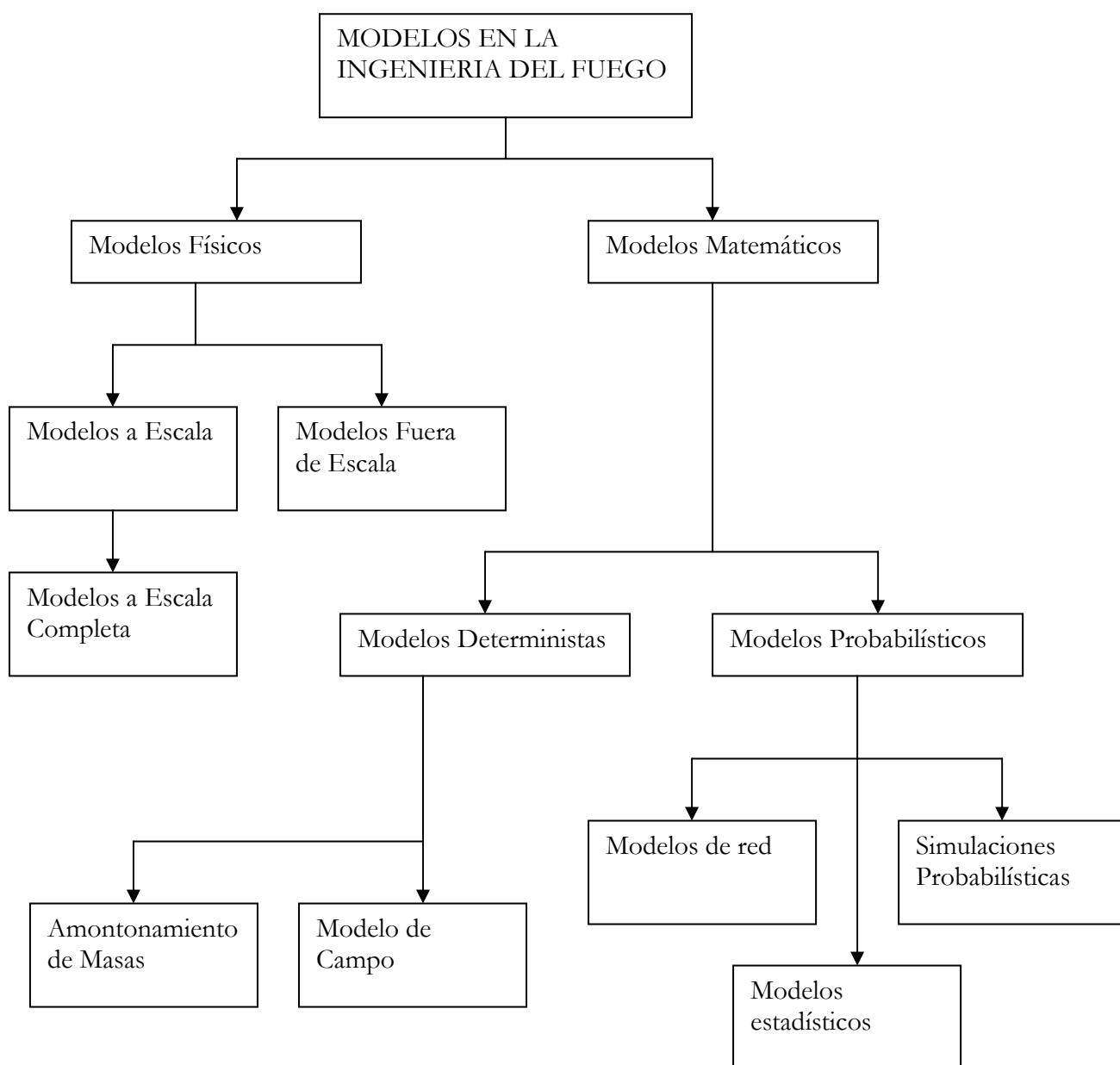


Imagen 3.2.1.1. Organigrama de la clasificación del modelado en Ingeniería de Protección contra Incendios.

3.2.1.1. Modelos Físicos

Los modelos físicos tratan de reproducir un fenómeno de fuego en una simulación física simplificada de la situación real. La simplificación estará definida por el alcance que se quiera tener en el modelo, cosas que se quieran obviar por considerarse prescindibles o la misma escala física del modelo. En los modelos físicos es sumamente importante definir que es lo que se está buscando para poder prestar especial atención a los aspectos que se relacionan con esta búsqueda. En base a lo anterior, ultimar la aplicabilidad es un aspecto crítico en el diseño de estos modelos.

3.2.1.1.1. Modelos A Escala

Un modelo a escala es una experimentación física que simula en una escala reducida un hecho real. Esto no conlleva simplemente realizar una experiencia en una medida física reducida del hecho real, reducir las dimensiones lineales y conducir la experimentación en base a relaciones dimensionales reducidas no es suficiente, una “escala geométrica” tiene que ser puesta en práctica, y aún mas que esto, la proporcionalidad y relación entre variables tiene que ser mantenida mas allá de los aspectos físicos visibles y estáticos, en aquellos que no son tan obvios o que son dinámicos.

Se deben mantener similaridad y proporcionalidad mecánicas, térmicas y químicas en el modelo a escala. Ejemplo de esto es por ejemplo el hecho de querer simular un incendio de una habitación de 20 x 20 pies, representándolo con un modelo físico en una habitación a escala de 2 x 2 pies. No solamente deben ser proporcionales las dimensiones físicas, sino también la intensidad del incendio, la cantidad de combustible por unidad de área, la resistencia al fuego de las paredes debe ser proporcional respecto de lo real y comportamientos como el crecimiento del fuego y expansión del humo, difícilmente se logrará que sean proporcionales en la línea del tiempo con lo real, pero se pueden establecer relaciones matemáticas en base a las características geométricas. Será fácil visualizar lo anterior, una vez contemplado el hecho de que definitivamente no podremos dominar la velocidad de la expansión del humo y reducirla a una décima o centésima parte de lo que sucedería en la habitación real de 20 x 20; pero tenemos una primera aproximación, de que como el modelo es 10 veces mas chico en cada dimensión lineal y 100 veces mas chico si consideramos el área, pues la expansión del incendio y del fuego, lógicamente tendrá también alguna relación de crecimiento entre 10 y 100 veces con

respecto a la escala real (si consideramos solamente las relaciones de línea y área con respecto al caso real, ignorando aún las velocidades de los gases generadas por el confinamiento).

Las leyes de modelado a escala física, en la actualidad han sido y continúan siendo ampliamente desarrolladas por muchos investigadores; y las más grandemente extendidas y aceptadas hasta el día de hoy en la ciencia del fuego son conocidas como “Modelado de Froude”, que es un modelado aplicable a los fluidos asociados con los incendios. El modelo de Froude básicamente requiere que la proporción de las fuerzas de inercia flotantes en el lugar del incendio sean mantenidas. El número de Froude “ Fr ”, puede ser expresado como:

$$Fr \propto \frac{Q^{\frac{2}{5}}}{D} \propto \frac{V}{\sqrt{D}}$$

donde Q representa en incendios el HRR (Rata de Liberación de Calor), D representa la escala física del experimento, y V representa las características de velocidad del medio que esta fluyendo.

De esta forma puede verse que un modelo físico a media escala requerirá que el HRR sea reducido no a la mitad sino al 17.7% del HRR presente en el hecho real a escala completa, para poder de esta forma mantener las relaciones de las velocidades de flujos con respecto a la media escala. Las velocidades resultantes en el modelo a escala serán aproximadas al 70.7% de las velocidades obtenidas en el modelo real, según la relación de Froude. De igual forma puede verse que si el modelo es a una escala física del 25%, el HRR deberá ser de tan solo 3.1% para poder mantener las proporciones energéticas, y esto dará resultado de que las velocidades se reduzcan a un 50%.

Aunque físicamente es un tanto complicado de visualizar, puede comprenderse desde el punto de vista energético, de que una esfera energética en expansión tendrá una mayor densidad de energía cuando es chica que cuando ya ha crecido. Un concepto parecido aplica, al modelar incendios (esferas energéticas), a escalas mas pequeñas de las que realmente ocurren, sin embargo Froude aparte de esto ha tomado en cuenta muchas otras variables que pueden ser vistas en las investigaciones y criterios bajo los cuales se llega a este modelo, en la bibliografía relacionada.

El modelo de Froude ha sido aplicado extensamente para la investigación en el entendimiento de lo que llamamos “flujos de pluma” que no son mas que los flujos de calor y humo que se obtienen a partir de las llamas en forma vertical; también en los flujos

de películas de gas y calor pegadas al techo “ceiling jet flows”, en algunos casos conocidos como “layers de humo y calor”, y en la modelización de la altura de las llamas.

Los fenómenos de fuego donde se ven envueltos procesos de radiación de calor importantes, no pueden ser modelados con Froude, pues el modelo no lo contempla. Esto deja por fuera del alcance de Froude a la mayoría de los fenómenos de incendio con un nivel de complejidad que comienza a ser alto, pues todos ellos contemplan transmisión de calor por medio de radiación. Es muy difícil contemplar fenómenos de flujos convectivos y de radiación al mismo tiempo. Froude puede ser conveniente en aquellos eventos donde el factor dominante sean los procesos convectivos, como por ejemplo en fenómenos de circulación de humos y gases calientes.

Existen también situaciones en las que una escala mas chica deja por fuera la capacidad de lograr un ajuste adecuado en las propiedades de los materiales utilizados para hacer el modelo a escala. Por ejemplo, difícilmente se puede llegar a modificar el HRR de ciertos materiales para hacer los modelos a escala y como se pudo ver en los ejemplos anteriores ésta es una cantidad ampliamente variable al escalar los modelos y su variación no es proporcional. También se incluyen en estos aspectos, las resistencias mecánicas de los materiales, esfuerzos cortantes, esfuerzos de aplastamiento, esfuerzos de tensión, momentos de inercia, módulos elásticos, etc., e incluso en caso especializados como el investigado en este trabajo, donde nos enfocaremos a incendios eléctricos, sus características eléctricas se convierten en un factor importante, al tratar de hacer un modelo a escala. Froude definitivamente no contempla características como la resistividad eléctrica del material, radioactividad (emisiones electromagnéticas), polarización, ionización, capacidad portadora de carga, etc.

3.2.1.1.1. Modelos a Escala Completa

Al encontrarse los investigadores con casos en los que es difícilmente modelable un fenómeno a escala reducida, lo más conveniente es hacer el modelo al tamaño real, lo que se llama “escala completa”. De esa manera los investigadores estarán seguros de que todo lo que observen, se dará bajo las condiciones y magnitudes que se darán en un hecho real. No todos los experimentos de modelado a escala pueden ser a escala completa, aunque sería deseable, sin embargo su alto costo es una limitante importante en la investigación.

3.2.1.1.2. Modelos Fuera de Escala

No siempre se requiere que el comportamiento dinámico y energético del modelo sea también correspondiente a lo que sucedería en el caso real. Cuando el modelado físico sólo incluye una reducción en la escala física de lo que se está estudiando, el modelo se llama Modelo Fuera de Escala. Una gran parte de las pruebas de comportamiento con respecto al fuego de los materiales son ejemplos de este tipo de pruebas, donde se toma una pieza de material y se somete a una cantidad ya estipulada de calor. Lo único que se busca es determinar el comportamiento del material ante el calor, y esta cantidad es fija, no esta escalada con respecto a ningún hecho real. La prueba de resistencia al fuego ASTM E119, es un ejemplo de este tipo de modelo, y genera una familia de curvas que es un estándar, pero no representa el comportamiento ante el fuego de ningún material ante un hecho real.

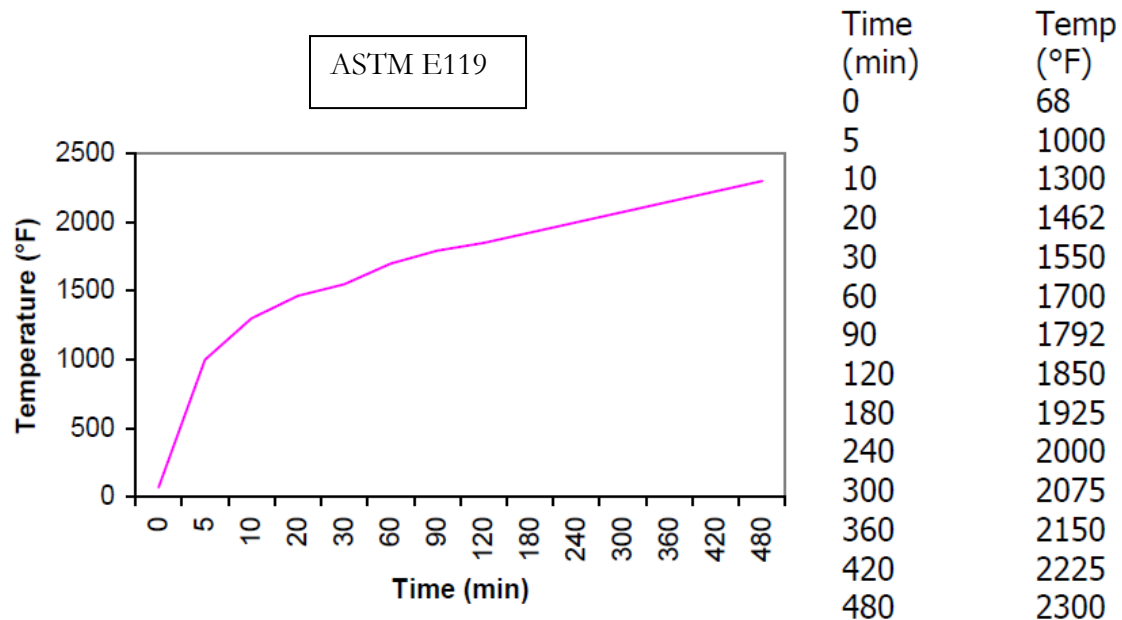


Imagen 3.2.1.1.2.1. Gráfica de la prueba ASTM E119 realizada con Horno Vertical de Escala Pequeña (Small Scale Vertical Furnace)

3.2.1.2. Modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos son aquellos en los que una entidad matemática o un conjunto de entidades matemáticas gobiernan el comportamiento del modelo. Los hay de 2 tipos básicos: Deterministas y Probabilistas.

3.2.1.2.1. Modelos Deterministas

Los modelos deterministas, tratan de modelar un hecho físico por medio de una entidad matemática o un conjunto de entidades que forman familias de funciones con respuestas determinadas y exactas a la luz del modelo. Este tipo de modelos pueden variar desde una simple función de correlación lineal de datos, hasta un modelo altamente complejo que requiera semanas de tiempo de procesamiento de datos utilizando poderosas herramientas matemáticas para resolver expresiones matemáticas utilizando a veces hasta decenas y centenas de computadoras.

Lo único que tienen en común estos modelos es el hecho de que contemplan variables que establecen un comportamiento en el curso del fuego al definir el ambiente en el que ocurre. Un ejemplo simple de un modelo matemático determinista es la siguiente ecuación, la cual describe el comportamiento promedio de la altura de la llama, en base a los principios ya descritos del modelado de Froude, que se utiliza en el diseño de modelos a escala:

$$\frac{L}{Q} = 0.2 \left(\frac{Q^{\frac{2}{5}}}{D} \right)$$

donde L es la altura promedio de la llama en metros; D es el diámetro del fuego en metros; y Q es el HRR dado en kilowatts.

Este es un modelo determinista muy simple, pero ampliamente aceptado, sin embargo cada nueva investigación aporta nuevos conocimientos a modelos que intentan ser cada vez más precisos, pero su complejidad crece exponencialmente. Ejemplo de modelos complejos son aquellos que modelan el comportamiento de el fuego en compartimentalizaciones (particiones hechas a lo interno de los edificios, tales como los cuartos de un hotel, o las habitaciones de un hospital), los cuales incluyen una gran cantidad de variables como lo son procesos físicos y químicos que no se desarrollan igual que como si el edificio no estuviese particionado o compartimentalizado, generando una gran cantidad de ecuaciones simultáneas que podrían en algunos casos no ser muy difíciles de resolver individualmente (en algunos otros son diferenciales, con lo que la dificultad se incrementa), pero por ser tantas, se requiere del apoyo de solución por programas matemáticos.

También está como ejemplo el modelado de incendios eléctricos, en el otro extremo de la balanza, donde el nivel de dificultad matemático se hace muy intenso, y no solo el de desarrollo de software, ya que el modelo podría estar basado en matemáticas de

muy alto nivel (análisis de campos, con funciones diferenciales vectoriales, análisis tensorial, etc.). En esta clase de modelos se hace muy deseable encontrar variables que puedan ser despreciadas por su poco efecto y enorme contribución a facilitar el modelo si son despreciadas, pero siempre es de mucho cuidado esta selección, ya que aquellas variables que son despreciables en un rango de valores, podrían ser muy importantes en otro rango.

Los modelos deterministas complejos hasta la actualidad pueden ser subclasificados en: Modelos de Masa Amontonada o Amontonamiento de Masas, y Modelos de Campo.

3.2.1.2.1.1. Modelos de Amontonamiento de Masas (Lumped-Mass Models)

El formato mas ampliamente utilizado en esta clase de modelo es el de “Zonas de Fuego”. El modelo trata de idealizar cada una de las zonas o compartimientos como un contenedor de una o más fuentes de fuego, y el ambiente de cada compartimiento es modelado como uno o dos volúmenes discretos o zonas. Por ejemplo en el modelado de una sola zona, el “ambiente del fuego” esta caracterizado por una sola temperatura promedio, igualmente una sola concentración promedio de humo y de gases calientes.

En un modelo de dos zonas, el ambiente de fuego es modelado como una capa superior y una inferior, cada capa caracterizada por los promedios de temperatura, y concentraciones de humo y gases. Aunque este tipo de modelos es algo simple (de los modelos deterministas complejos es el tipo mas simple), puede ayudarnos a visualizar las interacciones de los objetos, como las fuentes de fuego, y las capas de fuego, a través de ecuaciones que describen la conservación de la masa y energía. Los edificios muy grandes pueden ser modelados satisfactoriamente utilizando estas técnicas, igualmente cualquier fenómeno que envuelva un volumen amplio. No es deseable para describir procesos en los cuales el volumen de fuego es reducido, pues la separación en zonas no es efectiva.

3.2.1.2.1.2. Modelos de Campo.

El mejor ejemplo de Modelo de Campo existente en el estado del arte en la actualidad, es el modelo CFD, o modelo de Fluidos Dinámicos Computacionales (Computational Fluid Dynamics). El aspecto clave en los modelos de campo es el hecho de que modelan la estructura misma de los objetos a nivel de detalle, y no simplemente sus interacciones con otros objetos. Por ejemplo, las temperaturas en un compartimiento, en un modelo CFD, no son promedios, sino que son modeladas especialmente a través de

todo el compartimento, utilizando una distribución mucho mas aproximada. Igualmente, los movimientos de los fluidos (humos, gases) son modelados y calculados basándose en ecuaciones de mecánica de fluidos mucho mas detalladas. La solución final de un modelo de CFD, esta entonces mucho mas fundamentada que la de un modelo de Masa Amontonada, sin embargo su aplicación esta limitada por la complejidad a ciertos límites. Si se intentara modelar algo muy grande y laborioso por medio de un modelo de campo, la solución podría ser muy difícil de encontrar, y a veces insolucionable, con lo que los esfuerzos en investigación se pierden. He aquí el detalle de prestar especial atención y limitar lo más posible a los modelos de campo a fenómenos estudiados, de la forma más puntual posible.

El modelo de generación de incendios por fuentes eléctricas que se presentará finalmente en esta literatura, es un ejemplo de modelo de campo que ha sido cuidadosamente delimitado, tratando de sacar de él la mejor aproximación posible en relación con la complejidad del modelo, que intentará ser reducida a su máximo.

No existe aún en el estado del arte de los modelos de incendio una propuesta de modelado como esta, ni siquiera una enfocada en la manera como se dará en esta literatura, con lo que al desarrollar este trabajo se pretende dar la aportación a manera de primera aproximación, para que pueda ser en un futuro probado y ajustado a los requerimientos específicos de cada caso, ya sean conductores, dispositivos, equipos, etc.

3.2.1.2.2. Modelos Probabilistas o Probabilísticos

Los modelos probabilistas son aquellos que fundamentan su base en un análisis estocástico de variables aleatorias, donde se intenta predecir el comportamiento de los eventos, en base a situaciones similares pasadas o en base a tendencias de las situaciones y sus variaciones a futuro de acuerdo con las variables del medio. Pueden ser subclasificados en: modelo de redes, modelos estadísticos y simulaciones probabilistas.

Cada uno de los formatos de modelos probabilistas, juega con las incertidumbres asociadas con el proceso de formación y crecimiento del fuego.

3.2.1.2.2.1. Modelos de red

Los modelos de red son básicamente modelos de crecimiento del fuego, en los cuales la transición de un estado del incendio a otro, y la efectividad del sistema de

supresión del incendio, medios de extinción manuales, protección pasiva, etc.; están gobernados por probabilidades asignadas por el usuario. Estas probabilidades están basadas en datos históricos, evaluaciones ingenieriles o ambos. En los modelos de redes más simples estas probabilidades son valores simples asignados, y en los más complejos son funciones dependientes del tiempo.

3.2.1.2.2.2. Modelos Estadísticos

Estos modelos representan la probabilidad de ocurrencia de un evento basado en una base de datos histórica (o un muestreo a lo largo de un tiempo determinado). El mas claro ejemplo de este tipo de modelo se da al modelar la rata de activación u ocurrencias de alarmas contra incendios, las cuales son eventos arbitrarios, excepto en ciertas excepciones de medios donde guardan una naturaleza mas uniforme. Los modelos de fallas de las alarmas también utilizan bases de datos estadísticas para su formación.

3.2.1.2.2.3. Simulaciones Probabilistas

Los métodos de simulación tratan con diferentes juegos de condiciones para ver como cada uno de estos afecta el comportamiento del modelo o afecta las salidas del modelo. Las probabilidades son frecuentemente utilizadas para ponderar las salidas de cada uno de los juegos de condiciones de las entradas. De esta forma los modelos de simulación pueden predecir salidas para un juego de condiciones dado, utilizando datos probabilísticas, en muchos casos análisis estocásticos de tendencias diferenciales de los comportamientos y complementándose con modelos determinísticos.

En los casos mas complejos los modelos de simulación tratan los fuegos como lo haría un modelo determinístico de campo (o de masa amontonada en casos mas sencillos), una vez que el incendio ha sido completamente definido, sumando a la capacidad del modelo determinístico, la ventaja de poder predecir lo que sucederá en tiempo futuro.

Varios métodos de análisis de riesgos que usan procesos de simulaciones probabilísticas complejas están siendo continuamente desarrollados en muchos centros de investigación, los más notables proceden de Australia y Canadá.

3.3. Ejemplos de Aplicaciones Actuales de la Teoría y Modelado en la Ciencia del Fuego.

3.3.1. Predicción de Riesgos

La predicción de riesgos de incendios, es tal vez la aplicación más comercial que tiene la modelización de incendios en la actualidad. En este caso la palabra “riesgo” se esta refiriendo únicamente a las condiciones esperadas para que se produzca un incendio. Para comenzar, un conjunto de circunstancias son programadas, para representar un escenario específico. Todas las condiciones son mezcladas y evaluadas dentro del modelo, que por lo general corre en un programa de computadora, y este da como salidas o resultados, predicciones tales como el nivel de crecimiento de humos en las capas superiores de los pisos, las temperaturas, el volumen y profundidad de los humos, las respuestas de los dispositivos de protección de incendios; e incluso ciertos modelos dan resultados de predicción de condiciones muy serias como gases de alta toxicidad y ocurrencia de “flashover” (encendidos súbitos y repentinos de áreas de alto riesgo al tener todas las condiciones del triángulo del fuego previstas en gran cantidad, pero separadas por alguna de sus partes, al unir el triángulo repentinamente se produce una inmensa flama con este nombre). Esto sirve para predecir las condiciones de riesgo de cada locación. Las compañías de seguros utilizan últimamente programas que incluyen modelos de predicción de riesgos contra incendios.

3.3.2. Análisis de Sensitividad

El análisis de sensitividad está intrínsecamente envuelto en casi todos los modelos de incendio. Siempre es necesario conocer cuales son las condiciones limítrofes en las cuales se producirá un cambio en algún material de construcción, o en algún acabado, o mueble, o en algún elemento estructural del edificio o locación que esta expuesta al fuego. El análisis de sensitividad es un estudio de los parámetros a los cuales se dan estos cambios, o más bien es un estudio que responde a la pregunta ¿Qué pasa si se da un cambio en las condiciones?. También es de valiosa ayuda al determinar niveles de sensitividad de dispositivos de protección contra incendios como los detectores de calor y humo; y para determinar los índices de sensitividad (RTI “response time index”) de dispositivos automáticos de supresión como los rociadores automáticos. Por medio del análisis de

sensitividad puede determinarse también el incremento en el riesgo que sufre una locación al cambiar por ejemplo la alfombra, de una alfombra con un HRR moderado a una con un HRR alto. Este simple hecho puede incrementar grandemente el nivel de riesgo de la locación, apoyando así a los modelos de predicción de riesgos.

3.3.3. Reconstrucción de Incendios

La reconstrucción de incendios es posiblemente la aplicación más científica del modelado en la ciencia del fuego. Existen ya sinnúmero de modelos que intentan describir el comportamiento de diversos tipos de incendios. En este trabajo nuestro objetivo final es expresar un modelo que intente modelar un incendio eléctrico de ciertas características, con lo que este trabajo es en sí un ejemplo de modelado para reconstrucción de incendios.

Por lo general, luego de observados varios incendios iguales, o de ser experimentados varias veces a nivel de laboratorio, o incluso luego de hacerse ambas cosas, se sugieren varias hipótesis de las causas del fuego en base a sus escenarios. Idealmente sería fabuloso tener suficiente evidencia física, de la data y las condiciones que existen en el momento del fuego, las cuales debieran ser supervisadas para generar toda la información necesaria para la “entrada” del modelo seleccionado. En las prácticas reales, solo parte de esta información esta siempre disponible, mucha de ella se quema, no puede ser vista de forma simple, o simplemente no es considerada, de forma que al correr el modelo se asumen muchas de las cosas que corresponden a las entradas que debieran ser realmente vistas en el momento del incendio.

Al desarrollar o correr el modelo, mucho de este material que ha sido asumido se da por sí solo como cierto o falso, pues los resultados deben ser congruentes con los resultados reales que quedan luego del incendio, y muchas veces no lo son por causa de algo que fue mal asumido, con lo cual se cambia este parámetro a uno que de resultados mas aproximados con la experiencia.

Las ciencias computacionales han ayudado grandemente a los modelos de reconstrucción de incendios, ya que han facilitado este proceso de ensayo y error para buscar resultados mas precisos; con lo que una vez obtenida la estructura base de la ecuación matemática que gobierna un modelo, por medio de ajustes de parámetros se puede ir aproximando el modelo a la realidad, haciéndolo cada vez mas preciso.

3.3.4. Modelado por Computador para Diseño Basado en Desempeño (Performance-based design)

Los modelos por computadora han tomado tanto auge últimamente, que no solo se han quedado en la reconstrucción de incendios, sino que en últimos años se han venido desarrollando modelos más comerciales y amistosos que son aplicados a un método de diseño de sistemas en edificaciones, el cual en lugar de seguir códigos, normas y estándares de diseño como comúnmente se había hecho hasta hoy, va más enfocado a hacer diseños más precisos y ajustados a las necesidades de cada caso, haciendo que la construcción de los proyectos sea más adecuada y en muchos casos más económica al disminuir costos innecesarios en materiales, dispositivos y accesorios que no tendrán ningún valor adicional en elevar la seguridad de incendios general del proyecto. ¿Cómo se logra esto?, simplemente se modela el diseño como si estuviese trabajando normalmente; ejemplo si es un sistema eléctrico, como si estuviese a plena carga, y como si presentara fallas, etc. Si es un sistema de rociadores, como si estuviese apagando un incendio, etc. Este tipo de diseño se llama “Diseño Basado en Desempeño” y utiliza mucho de los modelos deterministas ya desarrollados y modelos de simulación de incendios, que trabajan dentro de programas comerciales en los que el diseñador ingresa las condiciones requeridas para su diseño, y se modela el desempeño de su proyecto en cada una de las condiciones que el diseñador establece.

3.4. Resumen y Conclusiones del Estado del Arte de la Ciencia del Fuego

En el capítulo 3 se vio de manera básica y puntual cada una de las cosas que fundamentan el actual estado del arte en lo que se refiere a la ciencia del fuego. Las teorías y formas básicas de modelado utilizadas en la ciencia del fuego, fueron expuestas de la manera más sencilla y puntual posible, habilitando al lector de las herramientas necesarias para entrar en lo siguiente al desarrollo de un nuevo modelo de incendio, que será propuesto y justificado utilizando muchos parámetros y estructuras de modelado existentes, pero bajo nuevas hipótesis de comportamiento.

La conclusión más importante que se deja ver de todos y cada uno de los formatos de modelos expuestos, es que en todos los casos, dependiendo de las condiciones de entrada que se tengan, se obtendrán resultados de salida para cada modelo, y los mismos deberán ser luego comparados con hechos reales, o experiencias de laboratorio, para ver

que tan aproximado es realmente el modelo en lo que expone, y que parámetros deben ajustarse, para lograr darle al modelo una mayor precisión.

3.5 Bibliografía Relacionada del Capítulo III

Alonso, Marcelo; Finn, Edward (1998). Física Vol II, Campos y Ondas. Editorial Interamericano, México, 1032 pp.

Drysdale Douglas (1985). Fire Dynamics (An Introduction to). John Wiley and Sons, St. Edmundsbury, 424 pp.

Fire Protection Handbook 20 edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.

Halliday, David; Resnick, Robert . (1972). Física II. CECOSA, México, 1757 pp.

Hyat, William (1967). Engineering Electromagnetics, McGraw – Hill & Kogakusha LTD, Tokyo, Japan, 435 pp.

Yearance, Robert (1997). Electrical Fire Analysis, John Wiley, U.S.A., 263 pp.

McCaffrey, B (1981). Some Measurements of the Radiative Power Output of Difusión Flames, Western States Section Meeting of the Combustion Institute, U.S.A., Paper WSS/CI 81-15.

Quintiere, James (2006). Fundamentals of Fire Phenomena, John Wiley & Sons LTD, Chichester, England, 439 pp.

Rohsenow, W.; Hartnett, J.; Cho, J. (1998). Handbook of Heat Transfer, McGraw – Hill, U.S.A., 1344 pp.

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002.

CAPÍTULO IV

Tecnologías de utilidad en la época actual (El Estado del Arte de la Tecnología)

EN ESTE CAPÍTULO:

- 4.1. Las tecnologías que se aplican actualmente
- 4.2. Tecnologías de Información y Software
- 4.3. Tecnologías de Materiales
- 4.4. Tecnologías de Medios de Egreso
- 4.5. Tecnologías de Almacenamiento, Orden e Higiene
- 4.6. Tecnologías de Procesos, Instalaciones y Equipamientos Especializados
- 4.7. Tecnologías de Seguridad de Detección y Alarmas
 - 4.7.1. Tipos de Señales
 - 4.7.2. Componentes Básicos del Sistema de Alarmas de Incendio
 - 4.7.2.1. Unidad de Control del Sistema
 - 4.7.2.2. Fuente de Poder Primaria o Principal
 - 4.7.2.3. Fuente de Poder Secundaria o de “Stand By”
 - 4.7.2.4. Circuitos y Dispositivos
 - 4.7.2.4.1. Circuitos con dispositivos iniciadores (IDC)
 - 4.7.2.4.2. Circuitos con aplicaciones de notificación (NAC)
 - 4.7.2.4.3. Circuitos de línea señalada (SLC)
 - 4.7.3. Tipos de Sistemas
 - 4.7.3.1. Sistemas de Protección de Locales
 - 4.7.3.2. Sistemas de comunicación de emergencia de voceo y alarma
 - 4.7.3.3. Sistema de Estación Central de Alarma de Incendios
 - 4.7.3.4. Sistema Propietario
 - 4.7.3.5. Sistema de Estación Remota
 - 4.7.3.6. Sistema Auxiliar

- 4.8. Tecnologías de Supresión de Incendios a Base de Agua
 - 4.8.1. Sistemas de Extinción con Mangueras de Incendio
 - 4.8.2. Sistemas Automáticos de Rociadores Contra Incendio
 - 4.8.3. Otras tecnologías de supresión de incendios a base de agua
 - 4.8.3.1. Sistemas de Rocío de Agua de Ultra Alta Velocidad (Ultra-High Speed)
 - 4.8.3.2. Sistemas de Supresión de Incendios por Niebla de Agua (Water Mist)
 - 4.8.3.3. Sistemas de Rocío de Agua por Válvulas de Diluvio y Boquillas Abiertas (Water Spray)
 - 4.8.3.4. Sistemas de combinación de agua y otros agentes
 - 4.8.4. Fuentes de Suministro de Agua
- 4.9. Tecnologías de Supresión de Incendios con Otros Agentes
 - 4.9.1. El Dióxido de Carbono
 - 4.9.2. Halones y Agentes Limpios Gaseosos
 - 4.9.3. Sistemas a base de Espuma o Foam
 - 4.9.4. Agentes Químicos
 - 4.9.5. Extinguidores
 - 4.9.6. Protección Contra Explosiones
- 4.10. Tecnologías de Protección Pasiva
- 4.11. Tecnologías de Confinamiento del Fuego y Locaciones Defensoras (Defend-in-Places)
- 4.12. Tecnologías de climatización, ventilación, presurización e implicaciones relacionadas
- 4.13. Tecnologías de equipos con vapor y combustibles para servicios estáticos.
- 4.14. Tecnologías Eléctricas y Electrónicas
 - 4.14.1. Conductores Eléctricos
 - 4.14.2. Equipos de distribución eléctrica
 - 4.14.3. Dispositivos de protección por interrupción automática
 - 4.14.4. Dispositivos para locaciones de alto riesgo (Hazardous Locations)
 - 4.14.5. Otras tecnologías de protección eléctrica
- 4.15. Tecnologías de Transportación
- 4.16. Bibliografía Relacionada del Capítulo IV

CAPITULO IV

Tecnologías de utilidad en la época actual

(El Estado del Arte de la Tecnología)

4.1. Las tecnologías que se aplican actualmente

El desarrollo tecnológico en la lucha contra los incendios ha visto en las últimas décadas avances a pasos agigantados. La intensa cantidad de investigaciones realizadas tanto por entidades de gobierno, como por entidades no gubernamentales y privadas, han dado enormes impulsos al avance de las tecnologías aplicables en la lucha contra el fuego.

Desde la tecnología de software, hasta los más complejos equipos utilizados en la lucha contra el fuego, en todos los campos se ha pasado por grandes transformaciones y adaptaciones. El objetivo de éste capítulo es presentar de una forma simple el estado del arte de la tecnología en la lucha contra el fuego.

En este trabajo dividiremos las tecnologías de la siguiente forma:

- a. Tecnologías de Información y Software.
- b. Tecnologías de Materiales.
- c. Tecnologías de Medios de Egreso.
- d. Tecnologías de Almacenamiento, Orden e Higiene.
- e. Tecnologías de Procesos, Instalaciones y Equipamientos Especializados.
- f. Tecnologías de Seguridad de Detección y Alarmas.
- g. Tecnologías de Supresión de Incendios a base de Agua.
- h. Tecnologías de Supresión de Incendios con Otros Agentes.
- i. Tecnologías de Protección Pasiva.
- j. Tecnologías de Confinamiento del Fuego y Locaciones Defensoras.
- k. Tecnologías de Climatización, Ventilación e Implicaciones Relacionadas.
- l. Tecnologías de Equipos con Vapor y Combustibles para Servicios Estáticos.
- m. Tecnologías Eléctricas y Electrónicas.
- n. Tecnologías de Transportación.

Aunque no se pretende exponer cada una de manera detallada, en las siguientes

páginas de éste capítulo, lo que el lector podrá ver es una breve descripción de cada una de ellas de la forma como he tenido a bien clasificarlas y el estado del arte en el que cada una de ellas se encuentra al día de hoy.

4.2. Tecnologías de Información y Software

Las tecnologías de Información y Software, aunque son utilizadas de distinta forma, se han puesto juntas debido al uso común que dan ambas a la tecnología de la computación. Como es de esperarse, ante un gran avance de la tecnología de los computadores o “hardware”, la tecnología de la información y de “software” o programas, no puede quedarse atrás.

Cuando hablamos de tecnología de la información nos estamos refiriendo específicamente a aquellos medios tecnológicos por los cuales se pueden almacenar e intercambiar datos digitalmente. Las redes, el internet, las unidades de almacenamiento de información, los discos, los programas de manejo de información, etc., hacen un gran pilar que soporta el avance tecnológico general, y el campo de la protección contra incendios aprovecha esto.

Tecnologías específicas de Información que son aplicables en la lucha contra el fuego son las Redes de Area Local (Local Area Networks, LAN); Redes de Area Ancha (Wide Area Network, WAN); Internet, ya que es una red a nivel mundial; tecnología móvil o de conectividad “wireless”; tecnologías de gerencia y manejo de información; tecnologías de Despacho Asistido por Computadora (Computer Aided Dispatch, CAD), las cuales ayudan ampliamente en las respuestas a las emergencias que dan los bomberos por medio de un despacho mas eficiente de las unidades; sistemas de comunicación o acceso a emergencias con número telefónico directo (tales como 911 en U.S.A. y algunos países); tecnologías de posicionamiento global, tales como GPS (global positioning system) y GIS (geographic information system); almacenamientos digitales de información en discos duros, discos flexibles, unidades de memoria, unidades magnéticas, etc.; sistemas automáticos de gerencia y manejo de reportes de accidentes tales como NFIRS (National Fire Incident Reporting System); y otras tecnologías ligadas al manejo, almacenamiento y análisis de la información.

Por el lado de las tecnologías de Software o Programas, se tiene como base el intenso trabajo que hay en programas de modelado y simulación que han sido desarrollados con el objeto de estudiar el comportamiento del fuego y las diferentes tecnologías de

extinción. Se habló un poco de esto en el capítulo 3 de este trabajo, y se puede encontrar mucha mas información en la bibliografía relacionada. Lo que es importante destacar, es que el desarrollo de softwares para modelado y simulación se encuentra actualmente en un intenso crecimiento, que tiene su trasfondo en el desarrollo de modelos tanto deterministas como probabilistas que puedan ser aplicados a los programas. La dependencia de los softwares de los modelos indica que si el modelo es bueno, el software será bueno, pero si el modelo es malo, el software también lo será.

4.3 Tecnologías de Materiales

Definitivamente, el nivel de riesgo de una locación dada esta muy duramente influenciada por el tipo de materiales que se hayan utilizado en su construcción. El estudio y análisis de los materiales en base a su riesgo de incendio es una ciencia muy profunda dentro del la ingeniería de protección contra incendios. Esta ciencia se concentra especialmente en conocer como el riesgo de incendio de los distintos materiales puede ser cuantificado y como se relaciona este riesgo con las características físicas y químicas del material. Aunque hay una gran cantidad de clasificaciones de los materiales dependiendo de su riesgo de incendio y de ciertas características físicas y químicas que los reúnen en grupos (tal como plásticos, fibras y textiles, polvos, líquidos combustibles, etc.), no presentaremos ninguna en esta ocasión por no ser parte de nuestro objeto de estudio. Es sin embargo importante recordar al lector que no todos los materiales se comportan de igual forma y algunos tienen niveles de combustibilidad muy superiores a otros, por lo que uno de los puntos más importantes en la evaluación del riesgo de un incendio en una locación son precisamente sus materiales. Incluso según muchos estudiosos del tema hay una gran cantidad de incidencia de incendios que son debidas a objetos y materiales que son traídos por los usuarios de una locación a la misma y no por los propios materiales de la locación, lo que nos indica que controlar el nivel de riesgo de incendio debido a los materiales que puedan existir en un momento dado en una locación es una tarea sumamente difícil.

Las tecnologías de materiales lo que buscan es disminuir el nivel de riesgo de incendio de los materiales, disminuyendo sus propiedades favorables a la ignición o disminuyendo su HRR (Rata de Liberación de Calor).

Muchos productos de madera, textiles, alfombras, colchones y ropa de bebes, son ejemplos de productos en los que están aplicando avanzadas tecnologías anti-incendios en

los materiales con los que son construidos, por representar estos un alto nivel de riesgo en los lugares y situaciones en los que son utilizados y hasta hace algunos años por sus altas características favorables al fuego. En Estados Unidos por ejemplo las alfombras tienen que pasar por rigurosas pruebas antes de poder ser vendidas libremente; una de ellas llamada “ Prueba de la Píldora de Methamine” (Methamine Pill Test), consiste en quemar de forma especial una píldora de methamine en el centro de 8 pedazos de 9 pulgadas cuadradas de alfombra con una forma circular en su centro sobre un plato metálico con 8 pulgadas de diámetro. Si al quemarse la píldora en el centro de la alfombra el fuego avanza 3 pulgadas hacia los bordes del plato circular en cualquiera dirección (o sea si queda a menos de 1 pulgada del borde del plato quemado), en un máximo de 2 de los 8 especímenes, la alfombra falla la prueba. Es interesante saber que esta prueba fue adoptada por el gobierno federal en 1970 como DOC FF 1-70 para alfombras y DOC FF-2-70 para mantas. ASTM también la adoptó como ASTM D2859. Cualquier alfombra que no pase esta prueba no puede ser vendida en Estados Unidos para ser utilizada en oficinas, salones, cuartos y locaciones al lado de corredores y cuando es vendida para cualquier otro uso debe estar etiquetada diciendo que no ha pasado la prueba. Aunque es un caso simple de la aplicación de tecnología de materiales, los fabricantes se esfuerzan en lograr alfombras que no tengan tendencia quemarse, y de esta forma cualquier cigarrillo, cerillo, fósforo o cualquier elemento de ignición que caiga sobre la misma una vez instalada se auto extinguirá.



Imagen 4.3.1. Muestra la Prueba de la Píldora de Methamine.

Tomada de <http://dataspec.ultron.com/dataspec/pages/workbook12305.asp>

Idénticamente a la prueba de Methamine, existen en la actualidad una inmensa variedad de pruebas que impulsan el avance de la tecnología de los diversos materiales en la seguridad contra la ignición y esparcimiento de la llama en los mismos. El lector podrá encontrar gran cantidad de información en la teoría relacionada.

4.4 Tecnologías de Medios de Egreso

Los medios de egreso, son las vías y facilidades con las que cuentan las personas en un momento dado para escapar de un recinto donde existe un incendio. Formalmente el concepto “medio de egreso” esta definido por el código NFPA 101 (Código de Vida) como “un camino continuo para desplazarse de cualquier punto en un edificio o estructura hasta una vía pública que se encuentre al aire libre y a nivel de terreno.

Los medios de egreso tienen tres componentes fundamentales:

- El acceso a la salida
- La salida
- La descarga de salida

El acceso a la salida es la porción del medio de egreso que conduce desde cualquier parte del Edificio, hasta la entrada o comienzo de la salida. La salida es la porción del medio de egreso que esta separada del área de edificio de la cual se escapa, por medio de paredes, pisos, puertas, o otros medios que proveen la protección necesaria para los ocupantes a fin de que puedan proceder con seguridad razonable hacia el exterior del edificio; ejemplos de salida pueden ser medios horizontales y verticales de viaje o traspaso como puertas exteriores, rampas, pasajes de salida y escaleras protegidas. La descarga de salida es la porción del medio de egreso que está entre el final de la salida y la vía pública.

El tema de los medios de egreso aunque parece a primera vista sencillo, no lo es tanto. Es necesario recordar que la efectividad de los mismos depende no solo de los parámetros físicos del mismo (ancho de pasillos, tamaño de escalones, dimensiones de puertas, señalizaciones, etc.), sino del comportamiento humano ante la percepción que se tenga acerca de cada uno de los elementos que se encuentran en el medio de egreso.

Como el comportamiento humano es distinto en cada persona, las bases de análisis en estos casos son de tipo probabilista, pero la explicación puede darse de una forma lógica científica sencilla basándonos en el concepto del Triángulo de la Percepción de Pierce por medio del cual se ve que no siempre la información que se intenta comunicar es la que es recibida por quien esta recibiendo la misma.

El triángulo de la percepción de Pierce considera tres elementos fundamentales:

- El referente
- El significante o significado
- El signo

El referente es la entidad física en el mundo real, un ente físico existente, una puerta, un pasamanos de una escalera, un cartón con escritos. El significante o significado es la interpretación mental que cada quien da al referente, es la imagen que se forma en cada una de las mentes de las personas acerca del referente. El signo es lo que se ve del referente, es la figura, el icono, la vista física del mismo. Cuando alguien observa el signo, se hace una imagen mental (significante/significado) acerca del ente físico real (referente) que el signo intenta representar; pero no todas las personas tienen la misma interpretación mental (significante/significado) para un signo dado; por lo tanto un mismo signo que intenta describir a un mismo referente puede incluso tener diferentes significados en las mentes de las personas, con lo cual dependiendo de los significados que se formen, las personas adoptarán un comportamiento.

Si sumado a esto, se utilizan signos diferentes para un mismo referente, la variedad de significados que obtendremos en las mentes de las personas será aún mayor. Este análisis, está en base a situaciones comunes donde el raciocinio es normal y cada persona se toma su tiempo para pensar. Pero si a todo esto sumamos una condición de urgencia, las personas intentan pensar rápidamente y muchas no piensan sino que llegan a estados de bloqueos mentales, con lo que la interpretación de los signos puede ser muy distinta de lo que realmente son los referentes que intentan describir.

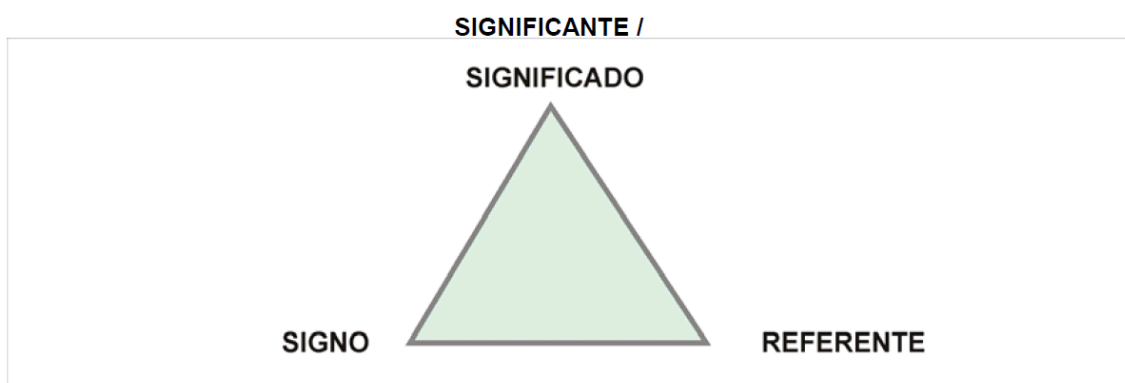


Imagen 4.4.1. Triángulo de la Percepción de Pierce

Tomada del Modulo 2: Sistemas en Proyectos, del Máster en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos, de FUNIBER.

En muchas ocasiones la misma vista física del referente es el signo, sin embargo aún en estos casos, los significantes pueden llegar a ser distintos. Como ejemplo sencillo se invita al lector a hacer un sencillo experimento, dibuje una línea de 30 pulgadas en un pizarrón de clases sin que nadie vea la medida, y pregunte a los alumnos de la clase cuantas pulgadas tiene la línea. Todos estarán viendo directamente la línea que es en este caso el referente y su enfoque visual por parte de las personas la hace convertirse en el signo; pero se sorprenderá de la cantidad de respuestas distintas que encontrará acerca de su medida.

Igualmente, el ancho de un pasillo de salida puede ser perfecto y suficiente para el escape de las personas de un recinto incendiado, sin embargo faltaría ver si en las mentes de las personas se forma acerca de este pasillo un significativo que diga lo mismo, por medio del cual la persona que lo observa sea invitada a escapar utilizando este pasillo en lugar de quedarse donde está por sentirse mas segura en ese lugar, en medio de una situación de pánico.

En la siguiente figura se describe el funcionamiento mismo del triángulo de la percepción de Pierce de una forma mas sencilla, realmente el referente no comunica directamente al cerebro de las personas sino por medio del signo, por lo tanto el referente se toma como “nunca visto” sino que mas bien lo que se ve es el signo y de allí la interpretación. Se ha puesto al referente y al cerebro y ojos del observador separados por una colina, y en la cima de la colina, el signo. Con ello se ve que la comunicación del observador es con el signo y de allí su interpretación. Aunque no podemos controlar la interpretación del observador, podemos controlar que el signo realmente represente al referente con la menor cantidad de ambigüedades posibles. Si fuera posible hacer un signo con 0% de ambigüedades, se lograría que todos los observadores vieran lo que es realmente el referente, y solo quedarían los errores propios de la interpretación de cada quien.

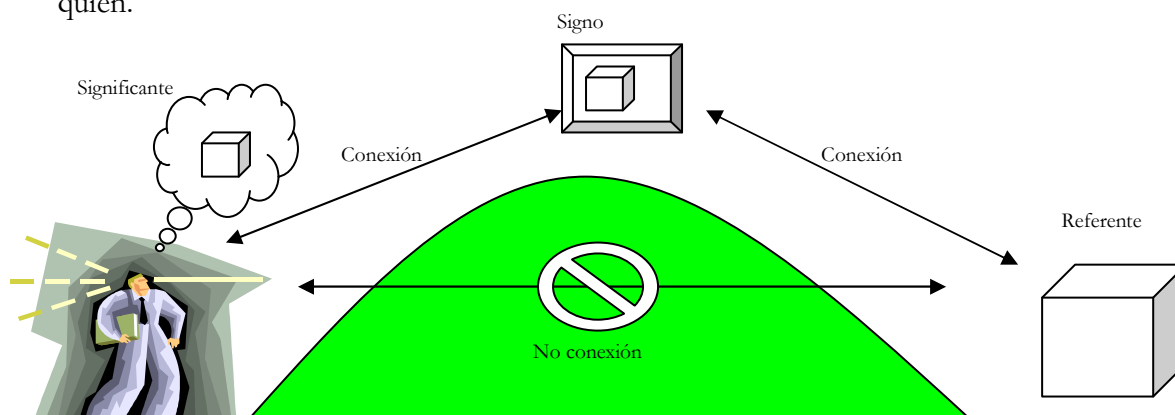


Imagen 4.4.2. Interpretación gráfica del Triángulo de la Percepción de Pierce

Se observa que el significativo formado en la mente de las personas guarda relación con el signo que puede observar, ya que no tiene conexión directa con el referente. El signo a su vez trabaja como un espejo por medio del cual el observador puede ver al referente a través de él.

Del significativo que den las personas a los signos que ven dependerá mucho de su comportamiento, igualmente al ejemplo que se dio líneas atrás, acerca de un pasillo que sea un medio de escape pero que no parezca confiable para que las personas se animen a escapar por el, puede darse el caso contrario, en el cual las personas vislumbran accesos que les parecen medios de escape, y al final concluyen en cuartos o pasillos cerrados sin salidas, atrapando a las personas.

Un diseño adecuado de los medios de egreso permitirá a los ocupantes desalojar las áreas amenazadas por el fuego en el menor tiempo posible, de forma segura y con un uso eficiente de las salidas (sin embotellamientos). El código NFPA 101, contiene amplia información del estado del arte de los medios de egreso, incluyendo su metodología de funcionamiento, cálculo de capacidades, forma de construcción, detalles, etc.

Como puede verse, esta tecnología de los medios de egreso no es solo calcular y hacer un análisis de flujo de personas, como si se tratase de un fluido físico cualquiera. Aunque se utilizan muchas técnicas de mecánica de fluidos, las cuales son aproximadas en los estados cuasi-estables, el comportamiento humano como factor iniciador preponderante introduce grandes complicaciones al análisis.

Se podría decir que hay que “convencer” a muchos sujetos de escapar del siniestro. El diseño de los medios de egreso incluya además de su dimensionamiento correcto, en base a los flujos de personas, los parámetros de iluminación adecuada para que las personas perciban los signos de forma correcta (caminos, pasillos, escaleras, obstáculos, puertas, etc.), las señales adecuadas que funcionarán como verdaderos signos para advertir al usuario la existencia o no de medios de escape; y tendrán enorme influencia en ellos los sistemas relacionados de alarmas, riesgos de los contenidos (no es lo mismo intentar escapar de un edificio de oficinas que de una planta química por ejemplo), influencia de los tipos de construcción (totalmente cerrados, con ventanas, con escaleras, sin ellas, con resistencia al fuego o no, etc.), influencia de la decoración y acabados interiores, influencia de factores psicológicos y fisiológicos (personas impedidas y/o discapacitadas); y la influencia de los equipos de protección contra incendios donde se determina en base a la

cantidad y clase de equipos de protección contra incendios que tiene el edificio si se pueden diseñar medios de egreso menos rigurosos y mas económicamente factibles.

El avance tecnológico ha dado como resultado la adopción de nuevos formatos en señalización, iluminación y dimensionamiento de los medios de egreso. Como ejemplo se puede mencionar que muchas señales antes requerían de suministro eléctrico el cual debía darse por medio de baterías pues cuando hay incendios en muchos casos la electricidad también es cortada. Hoy en día numerosas señales son de tipo fotofosforecente, solo es necesario apagar las luces y el mismo material de la señal queda iluminado, o utilizan nuevas baterías auto-recargables de diversas formas, ya sea con luz natural o artificial, etc., lo que hace mas fiable la señalización o sea los “signos” que son interpretados como significantes.

Muchos intentos se han dado para estandarizar las señalizaciones, pero poner al mundo entero de acuerdo es tarea difícil, y aunque muchas ya están casi estandarizadas, las normas y códigos mas aceptadas solo piden que las señales estén localizadas en lugares visibles desde todos los puntos que deben desalojarse por medio de ellas y que sean del tamaño, colores y diseño adecuados para que sean fácilmente visibles e identificables; esto con el fin de no dar lugar a significantes incorrectos. Por parte de la iluminación, en la mayoría de los casos se busca que el nivel de la misma sea adecuado para crear suficiente contraste con las partes del medio de egreso, para que el usuario pueda definirlos con facilidad (puertas, pasamanos, escalones, etc.); no debe ser en ningún caso inferior a 1 piecandela (10.77 lu/m² ó lux).

La aplicación de tecnologías adicionales como por ejemplo sistemas automáticos de protección de incendios por medio de rociadores, hace que se disminuyan los requerimientos. Solo por dar una muestra, en un edificio de oficinas común y corriente, la máxima distancia de viaje de un medio de egreso es de 200 pies (61 metros), pero si el mismo edificio esta totalmente cubierto con rociadores automáticos contra incendio esta distancia puede ser hasta de 300 pies (91 metros), con lo que se pueden disminuir la cantidad de puertas, pasillos de acceso directo, se aprovecharán mejor los espacios desde el punto de vista arquitectónicos, etc.

El lector podrá ampliar mucho mas su conocimiento de los medios de egreso y su tecnología refiriéndose al NFPA 101 y los libros citados en la bibliografía relacionada. Nuestro objetivo ahora solo es dar una pequeña carta de presentación a la tecnología de medios de egreso.

4.5 Tecnologías de Almacenamiento, Orden e Higiene

Orden e Higiene, son dos conceptos que están en los programas educativos de muchas culturas, desde los niveles más básicos; sin embargo, a pesar de ser conceptos sencillos, su aplicación en una inmensa cantidad de casos no es adecuada, sobretodo mientras mas grandes son las locaciones donde hay que aplicarlos.

Cuando se habla de “orden”, se esta hablando de las reglas y procedimientos a seguir para la colocación adecuada de las cosas en el lugar que les corresponde de acuerdo al tipo de relación que guardan entre sí y a la facilidad para su movimiento.

Cuando se habla de “higiene”, se esta hablando de la ciencia que tiene por objetivo la conservación de la salud y prevención de enfermedades y lesiones, por medio de la conservación de la limpieza y aseo adecuado de los lugares y cosas.

En las grandes zonas de almacenamiento, estas reglas y procedimientos adecuados para mantener el orden pueden llegar a ser un tanto complicados, por lo que se comienza a almacenar en el lugar en el que en el instante que se esta estibando parece mas cómodo para el operador de los equipos de movimiento de las mercancías. Esto trae como consecuencia inmensas pilas de almacenamiento que no cumplen con ninguna regla de orden, y que causan problemas de higiene en el lugar donde se almacenan.

En protección contra incendios, las normativas para lograr el orden en el almacenamiento están íntimamente ligadas con el tipo de material que se está almacenando y su nivel de riesgo de incendios.

La aplicación de métodos propicios de almacenamiento y manejo de materiales, en conjunto con el control de las fuentes de ignición, son las claves para minimizar el potencial de incendios en las locaciones donde estos materiales se encuentran. Una simple separación adecuada de materiales volátiles, limita la posibilidad que tienen estos de esparcirse desde donde ellos están almacenados hacia áreas adyacentes.

La distribución adecuada de los materiales, depende tanto de su cantidad, como de sus niveles de flamabilidad, ignitabilidad, HRR (Rata de liberación de Calor), explosividad, y propiedades similares que pongan en peligro la vida humana por causa de la existencia de estos materiales en una locación.

Adicionalmente, la aplicación de conceptos adecuados de protección contra incendios son importantes para mitigar los efectos de un incendio una vez ocurre.

Todas estas variables se vuelven complicadas por la inmensidad de los almacenamientos que tenemos hoy en día, sin embargo se basan en dos conceptos sencillos; orden e higiene. La inmensa variedad de materiales de almacenamiento

existentes hoy en día, complica mas las cosas, con lo que el Almacenamiento y Manejo de materiales se ha convertido en una rama muy amplia dentro de los campos de la protección contra incendios. Los materiales peligrosos, como combustibles líquidos, sólidos y gaseosos, químicos, gases y polvos, material radiactivo y basura biológica o inorgánica; tienen estrictas normas de manejo y almacenamiento, pero igualmente son extensiones y conceptos mas tecnológicamente avanzados de orden e higiene.

El lector podrá encontrar extensa cantidad de información de almacenamiento de materiales en la bibliografía relacionada, para nosotros en este trabajo es suficiente tener presente que independientemente del tipo de locación en el que se esté trabajando, la buena práctica y concepto de almacenamiento depende del orden y la higiene, que derivan en reglas aplicables específicamente a cada uno de los casos requeridos, dependiendo de las propiedades mismas del material a almacenar y el lugar donde es almacenado.



Imagen 4.5.1. La imagen muestra el apilamiento de materiales sin ningún orden específico dentro de una galera. No se observan espacios ni separaciones entre unos productos y otros, ni se observa ningún tipo de sistema de protección contra incendios como rociadores, mangueras o extintores.

4.6 Tecnologías de Procesos, Instalaciones y Equipamientos Especializados

En la época actual, el nivel de especialización de los procesos y equipamientos de instalaciones con procesos industriales, es tal, que se hace necesario el desarrollo de tecnologías específicas para la aplicación en el tema de seguridad contra incendios dependiendo de cada uno de los casos.

Desde instalaciones para trabajo con combustibles comunes como la madera, hasta instalaciones nucleares, para todas y cada una se ha llevado a cabo el desarrollo paralelo de tecnologías especializadas de supresión de incendios, donde se aplican equipos especiales y en muchos casos también agentes de extinción especiales.

Según las agrupaciones de NFPA los procesos e instalaciones son:

- a. Trabajos con madera, instalaciones y procesos.
- b. Acabados con spray y cubrimiento con polvos.
- c. Industria de plásticos y procesos con riesgos relacionados.
- d. Procesos de trabajo con metales.
- e. Soldadura, corte y otros trabajos en caliente.
- f. Almacenamiento y manejo de productos de Molino de Grano.
- g. Protección de registros
- h. Manufactura de semiconductores.
- i. Plantas de extracción de solventes de semilla de aceite.
- j. Protección de plantas de tratamiento de aguas servidas.
- k. Protección contra fuego de laboratorios que usan químicos.
- l. Protección contra fuego de instalaciones de telecomunicaciones.
- m. Plantas de generación eléctrica.
- n. Instalaciones nucleares.
- o. Minería y procesos con minerales.
- p. Atmósferas de oxígeno enriquecido.

Según las agrupaciones de NFPA los equipos especiales son:

- a. Equipos de movimiento de aire.
- b. Equipos de procesamiento químico.
- c. Equipos de manejo de materiales.
- d. Equipos de Automatización.
- e. Láseres
- f. Protección de equipo electrónico.

- g. Sistemas y fluidos de transferencia de calor.
- h. Equipos para la utilización de calor industrial y comercial.
- i. Tratamientos térmicos de enfriado en aceite y baños de sales fundidas.
- j. Máquinas de combustión estacionarias y celdas de combustible.
- k. Sistemas de potencia de fluidos.
- l. Sistemas de Refrigeración
- m. Sistemas Eléctricos

No entraremos a detallar cada uno de los sistemas tecnológicos de cada uno de los procesos, equipos e instalaciones mencionados, sin embargo han sido presentados a forma de que el lector pueda tener las agrupaciones hechas en base a las secciones del Fire Protection Handbook (20va edición) de la NFPA.

De requerirlo el lector podrá corroborar que cada uno de los sistemas y equipos mencionados tiene normativas especializadas aplicables a su instalación y manejo, al igual que tecnologías aplicables de forma específica. Como ejemplos se tiene que las plantas de generación eléctrica están regidas por la norma NFPA 850 (Prácticas Recomendadas para la Protección contra Incendios de Plantas Generadoras Eléctricas y Convertidores de Corriente Directa de Alto Voltaje), y los sistemas eléctricos que bajo nuestra propia clasificación en un punto aparte de este trabajo, por su gran importancia en una inmensa cantidad de instalaciones, y por estar nuestra investigación enfocada en ellos, son tratados por el NFPA 70 (Código Eléctrico Nacional).

No profundizaremos mas en cada uno de los diferentes procesos, instalaciones y equipos especiales, solamente en aquellos que están en un punto aparte según nuestra propia clasificación (dada al principio de éste capítulo), los cuales han sido dispuestos así de acuerdo a su gran importancia en la época actual por su enorme porcentaje de presencia en las edificaciones. Lo importante a destacar en este punto, es que muchos incendios en la industria y los comercios, se deben a sistemas de control y prevención de fuego inadecuados para el tipo de proceso, equipo o instalación en la que se suscitan. Las tecnologías desarrolladas en los últimos tiempos se han enfocado a cada proceso, instalación y equipo de forma particular, reduciendo los eventos de incendios, y las pérdidas por incendios en este tipo de situaciones. El lector podrá consultar cada especialidad en la bibliografía relacionada.

4.7 Tecnologías de Seguridad de Detección y Alarmas

Los sistemas de detección y alarma de incendios son siempre los primeros tipos de tecnología que vienen a la mente, cuando se habla del combate contra el fuego. La evolución de estos sistemas ha sido realmente grande, los sistemas actuales, son totalmente digitales y computarizados; se examinan ellos mismos por problemas, tienen comunicación continua con las autoridades y los dueños de las locaciones que vigilan por medios como internet y comunicaciones telefónicas e inalámbricas, registran los eventos en memorias y pueden describir como se desarrollaron los eventos de incendio; y tienen una extensa lista de bondades menores, que sus antecesores de hace algunas décadas ni imaginaban.

Hoy en día los sistemas de alarmas son aparte más robustos y detectan mas formas de riesgos contra la vida humana, como por ejemplo la detección de monóxido de carbono en ocupaciones residenciales, que no es incendio, pero que amenaza la vida de los ocupantes.

El código que rige los sistemas de alarmas contra incendios por parte de NFPA es el NFPA 72 (Código Nacional de Alarmas de Incendio). Existen otras normativas dependiendo del país donde se encuentre, sin embargo el NFPA 72, ha sido adoptado por muchos países como código de aplicación y/o de referencia.

Las metas que se persiguen al instalar un sistema de alarmas de incendio son básicamente tres:

- a. Salvaguardar vidas.
- b. Proteger la propiedad.
- c. Proteger la misión (impacto sobre los negocios).

La vida humana siempre ocupa el primer lugar en la seguridad, si se salvan las vidas se ha ganado el objetivo mas importante; luego la propiedad, todo lo que tiene que ver con lo material, aunque en segundo plano mientras mas propiedad se salve, se cumple con un mayor porcentaje del segundo objetivo; luego de esto, la misión, incluye un hecho que solo puede ser determinado por medio de un análisis de impacto al negocio, que envuelva e identifique las funciones críticas, determinando el impacto del incendio sobre las mismas y la forma y tiempo que tomaría recobrar las condiciones normales dentro del negocio.

4.7.1. Tipos de Señales

Los sistemas de alarmas tienen 3 tipos de señales:

- a. Señal de Alarma
- b. Señal de Supervisión
- c. Señal de Problemas

La señal de alarma es la que alerta sobre la posible existencia de un incendio dentro de la locación; la señal de supervisión indica acciones que son necesarias tomar para un sistema que está siendo monitoreado por el sistema de alarma, tal como por ejemplo el sistema de rociadores contra incendios, sistemas de dióxido de carbono, sistemas de químicos secos, agentes gaseosos, etc. La señal de supervisión puede indicar tanto que el sistema supervisado está fuera de la condición normal, como que está en la condición normal. La señal de problemas indica una falla en un componente del sistema o en alguno de los circuitos monitoreados, lo que requiere de una acción de corrección o arreglo.

4.7.2. Componentes Básicos del Sistema de Alarmas de Incendio.

Los componentes básicos de los sistemas de alarmas de incendio son como se listan a continuación.

4.7.2.1. Unidad de Control del Sistema

Es el cerebro del sistema, es quien observa las acciones de los dispositivos de detección, monitorea los sistemas supervisados, determina si existen problemas en el sistema y da las señales de alarmas de acuerdo a cuando y donde se requieran.

4.7.2.2. Fuente de Poder Primaria o Principal

Es la fuente de potencia que alimenta al sistema de forma general y en la mayor parte del tiempo, usualmente viene de una conexión eléctrica de utilidad general, pero debe ser un circuito ramal dedicado para el sistema de alarmas de incendio. Este circuito y sus conexiones deben ser protegidos mecánicamente y los medios de desconexión deben tener una marca roja, algo que los identifique como “Circuito de Control del Sistema de Alarma de Incendio”, y ser accesibles solo a personal autorizado.

4.7.2.3. Fuente de Poder Secundaria o de “Stand By”

Como la fuente primaria no es infalible, se requiere una fuente secundaria para cuando la primaria no está disponible. Esta fuente secundaria debe alimentar el sistema

automáticamente antes de que pasen 30 segundos sin alimentación de la fuente primaria. La protección de locales, estaciones centrales, estaciones remotas, sistemas propietarios y auxiliares deben tener cuando menos 24 horas de autonomía con el sistema en reposo o “stand by”, sumado a 5 minutos del sistema en operación de alarma. Los sistemas de comunicaciones de emergencia en voz y alarma deben tener 24 horas de autonomía en “stand by”, seguido de 2 horas de operación en emergencia, las cuales serán equivalentes según NFPA 72 a 15 minutos de operación a carga máxima, o sea con todos los dispositivos de entrada y salida operantes.

La capacidad requerida en fuente secundaria puede ser suplida por baterías de 4 horas en combinación con generadores a motor de combustible, o generadores múltiples potenciados por motor de combustible que sean capaces de suplir la carga completa en “stand by”.

4.7.2.4. Circuitos y Dispositivos

Los circuitos son todos aquellos canales de comunicación entre la unidad de control del sistema y los dispositivos.

Los dispositivos son los elementos del sistema que están ubicados en lugares estratégicos del lugar que esta siendo vigilado por el sistema de alarma para intercambiar señales con el panel o unidad de control, que dependerán del estado y sucesos que se den en cada una de las locaciones donde estos se encuentran.

Los circuitos y dispositivos están íntimamente relacionados, debido a que el objetivo del circuito determina que dispositivos serán instalados en este, por lo tanto, circuito y dispositivo tienen objetivos en común dependiendo de la función de cada cual.

Existen en la actualidad tres tipos básicos de circuitos:

- a. Circuitos con dispositivos iniciadores (IDC: Initiating Device Circuits)
- b. Circuitos con aplicaciones de notificación (NAC: Notification Appliance Circuits).
- c. Circuitos de línea señalada (SLC: Signaling Line Circuits).

4.7.2.4.1. Circuitos con dispositivos iniciadores (IDC)

Son aquellos circuitos donde se conectan dispositivos de detección y supervisión convencionales (no direccionables), a la unidad de control del sistema. Se hace la especificación en vista de que un gran porcentaje de los dispositivos de detección vendidos en la época actual son direccionables (los mismos cuentan con una dirección IP o sistema direccionable digitalmente similar al protocolo IP, para cada dispositivo). Respecto de los

dispositivos iniciadores y su funcionamiento interno propio (independientemente de si sean o no direccionables), existe una gran cantidad de tecnologías y aplicaciones en dispositivos iniciadores, desde accionamientos manuales, hasta modernos detectores de incendios, humo, deflagraciones, condiciones de explosión, basados en tecnologías de video, laser, ionización y otros conceptos de última generación. El lector podrá encontrar documentación adicional en la bibliografía relacionada.

4.7.2.4.2. Circuitos con aplicaciones de notificación (NAC)

Son circuitos donde se conectan los dispositivos de notificación en caso de una emergencia, tanto audibles como visibles, (bocinas y luces).

4.7.2.4.3. Circuitos de línea señalada (SLC)

Son circuitos en los cuales puede haber comunicación en 2 vías. Este tipo de comunicación puede darse entre dispositivos direccionables y la unidad de control del sistema, o entre la unidad de control del sistema y conexiones fuera del lugar protegido tales como conexiones con estaciones centrales, servicios públicos, estaciones remotas o una estación de supervisión propietaria.

4.7.3. Tipos de Sistemas

Una vez tenemos claro el concepto de los tipos de señal y componentes de los sistemas, podemos adjuntar de forma simple una designación de los tipos de sistemas más comunes en la industria actual de las alarmas contra incendio y sus características principales.

4.7.3.1. Sistemas de Protección de Locales

Son sistemas que tienen como objetivo principal la protección de un local en específico (una oficina, una tienda comercial, un hangar, etc.), y dan señales audibles y visibles de alarma dentro del local en caso de un incendio para notificar que se debe evacuar el mismo. Este sistema puede interactuar con otros sistemas para ayudar a mantener la seguridad general de un edificio o complejo de edificación en caso de un incendio; como por ejemplo un sistema automático de supresión, el autollamado de los elevadores, apertura de puertas con seguro automático, cierre de barreras de humo y fuego,

activación de sistemas de presurización y control de humos, control de sistemas de climatización, etc.

4.7.3.2. Sistemas de comunicación de emergencia de voceo y alarma.

Este sistema es utilizado en locaciones con alta densidad de personas y dificultades para un rápido egreso, tales como rascacielos y lugares de asamblea. En estos lugares se hace más necesario reubicar a los ocupantes en áreas de refugio y/o zonas seguras que evacuarlos. Consisten en una serie de bocinas de alta fiabilidad localizadas estratégicamente a lo largo de la edificación conectadas a una consola de control y comunicación localizada en un área llamada Estación de Comando de Incendios del Edificio. Desde ésta estación de comando, pueden ser seleccionadas zonas individuales del edificio para recibir alertas acerca del incendio, dependiendo de las características y urgencias del mismo para cada zona. Los mensajes de voz para cada zona dan instrucciones específicas a los ocupantes en las mismas, dependiendo de las condiciones que se encuentren en la zona. Los mas modernos sistemas de comunicación de emergencia permiten comunicaciones bidireccionales que son monitoreadas por el sistema de alarmas contra incendio; estas son utilizadas por los bomberos en para comunicarse en edificios de gran altura, donde las comunicaciones por radiofrecuencia pueden no funcionar adecuadamente. Las tecnologías mas modernas van de la mano con los últimos códigos, ahora existen sistemas de notificación de masas (MNS: Mass Notification Systems), que son integrados con los sistemas de comunicaciones de alarma y voceo, de tal forma que pueden funcionar automáticamente interactuando con el sistema de alarmas, deteniendo las alarmas mientras son dictadas instrucciones mas específicas. Los MNS pueden incluso ser integrados al sistema de alarmas de tal forma que utilicen hasta los mismos canales y bocinas.

4.7.3.3. Sistema de Estación Central de Alarma de Incendios

Una estación central de alarma de incendios, es un sistema que está diseñado para recibir señales provenientes de los sistemas de protección de locales, en una locación que está constantemente atendida u operada por una compañía cuyo propósito es proveer de un servicio de supervisión como estación central. Hay 8 características que diferencian al servicio de Estación Central de los demás servicios, 4 de ellas se refieren a los locales

protegidos y 4 al trabajo de la misma estación central. Las mismas se listan a continuación:

- a. Instalación de un sistema adecuado de alarmas en el local.
- b. Pruebas adecuadas del sistema de alarmas en el local.
- c. Mantenimiento adecuado del sistema de alarmas del local.
- d. Servicio de corredor o retransmisión en el local.
- e. Gerencia o Supervisión del sistema de los locales protegidos por parte de la Estación Central.
- f. Monitoreo de las señales de los locales protegidos por la Estación Central.
- g. Retransmisión de las señales de alarma de incendio en los locales protegidos, hacia el centro de comunicaciones del servicio público de protección de incendios.
- h. Registrar y guardar los eventos que se den en los locales que supervisa la Estación Central.

Una estación central podría simplemente monitorear una serie de locales por señales de alarmas y problemas, sin cumplir con todos los requerimientos dados anteriormente, sin embargo esto puede ser provisto también por una estación remota de la cual se hablará posteriormente. Las estaciones centrales que están bajo norma (NFPA 72), actualmente deben estar listadas por UL y FM Global Research. Esto incluye tanto a los equipos tecnológicos como a las compañías que los operan.

4.7.3.4. Sistema Propietario

Los sistemas propietarios, son sistemas privados propios que han sido extensamente adoptados en los grandes comercios y grandes ocupaciones industriales. Las señales que se transmiten por medio de estos sistemas son recibidas y automáticamente guardadas de forma permanente en una estación propietaria de supervisión constante, la cual puede estar localizada en la misma locación que está siendo protegida por el sistema o en cualquier otra locación del dueño de la propiedad protegida. En palabras sencillas, un sistema propietario es similar a una estación central, donde la estación de supervisión es del dueño del local protegido y esta supervisada también por el dueño (o alguien que lo represente), y ubicada en algún lugar propiedad del mismo dueño de las propiedades protegidas por el sistema propietario.

Estos sistemas en muchas ocasiones tienen circuitos iniciadores separados y subdivididos en zonificaciones por edificio o subzonas de edificios protegidos, cuentan con

multiplexores y sistemas con microcomputadoras comunicadas que ayudan a dividir la protección de las propiedades. Estos sistemas reciben las señales de las propiedades protegidas por uno o más caminos de comunicación y determinan la localización exacta del incendio por medio de la utilización de información digital codificada. En casos de incendio, la señal puede ser también retransmitida al centro de comunicaciones del servicio público de protección contra incendios.

4.7.3.5. Sistema de Estación Remota

Un sistema de estación remota, conecta las salidas de una unidad de control de alarma de incendio de un edificio o locación y las transmite a una localización remota (en otro lugar) específica donde estas señales son recibidas. Este centro de recepción puede ser el centro de comunicaciones del servicio público de protección contra incendios, como puede ser una compañía de supervisión privada o un encargado por parte de los dueños de la propiedad supervisada. El personal que reciba estas señales debe estar debidamente capacitado y la supervisión debe ser constante y de 24 horas. La transmisión de las señales puede utilizar una gran variedad de tecnologías aprobadas por norma, entre las cuales se encuentran, cableado, fibra óptica, sistemas privados de radio y/o microondas, sistemas McCulloh, sistemas RF de dos vías, sistemas privados de radio alarma de una vía o sistemas de conexión directa no codificada. El lector interesado podrá encontrar extensa literatura de cada uno de estos sistemas en la bibliografía relacionada, para nuestro objetivo en este capítulo es suficiente el conocimiento simple de la existencia de esta tecnología en el estado del arte de las alarmas contra incendio.

4.7.3.6. Sistema Auxiliar

Un sistema auxiliar provee una interface entre los locales protegidos por un sistema de alarmas contra incendio y un sistema público de reporte de incendios. Muchas comunidades cuentan con estos sistemas públicos que los alertan de un incendio en una locación dentro de la comunidad, sin embargo si la comunidad no cuenta con un sistema público de reporte de incendios, el local protegido tampoco puede contar con un sistema auxiliar que funcione. Las tecnologías de comunicación entre el sistema auxiliar y el sistema público dependen del tipo de sistema público utilizado; puede ser por cableado codificado, por radio codificada, teléfonos en serie o paralelo, etc.

4.8. Tecnologías de Supresión de Incendios a Base de Agua.

No es un secreto el hecho de que indiscutiblemente el agua es el agente de supresión de incendios más prevalente. Cuando las personas detectan de alguna forma un posible incendio, vienen 2 cosas a su mente, la primera es la posibilidad de escapar de él, y la segunda es encontrar una fuente de agua para extinguirlo, lo cual se deja a los más valientes; y ante la inexistencia de la segunda opción, el pánico se apodera totalmente de la situación pues desde niños se nos ha enseñado que el enemigo número uno del fuego, es el agua.

Aunque hoy en día sabemos que no todos los incendios son iguales, y que incluso en muchas clases de incendio el agua es hasta contraproducente; una gran cantidad de incendios se siguen combatiendo con agua por dos hechos simples:

- a. El agua es suficientemente efectiva para combatir dichas clases de incendio.
- b. El agua es muchos casos un agente abundante, barato y fácil de conseguir.

En base a los dos puntos anteriores, se ha invertido mucha investigación en desarrollar tecnologías de supresión a base de agua, con las cuales se ha incrementado la efectividad del agua en la extinción de los incendios, incluso en muchos de los casos, para tipos de incendios que no podían ser combatidos directamente con agua, se ha modificado la presentación del agente, ya sea dándole un cambio físico (atomizándola o nebulizándola por ejemplo) o combinándolo con algún otro agente (químicos, foam, etc.), con lo que se ha hecho posible la aplicación de agua a un rango más variado de incendios.

En las próximas líneas mencionaremos algunas de las principales formas en las cuales se han desarrollado tecnologías de aplicación de agua a los incendios, solo a forma de corroborar al lector las ideas ya planteadas; sin embargo el lector debe estar claro que las aplicaciones son muchas.

4.8.1. Sistemas de Extinción con Mangueras de Incendio

Los sistemas con mangueras han sido por años nuestro primer frente de batalla contra los incendios en edificaciones. Siempre que se piensa en la lucha contra un incendio, posiblemente la primera imagen que viene a la mente es la de un bombero

cargando una manguera que dispara un chorro de agua hacia las llamas. Aunque antiguos; los sistemas de mangueras de incendio no pasan a ser obsoletos, se han desarrollado importantes avances en la tecnología de los mismos hasta el punto que hoy día existen cuando menos unos 5 tipos distintos de sistemas de mangueras, cuyo objetivo final es el mismo, pero la tecnología de trabajo se ha desarrollado en distintas formas. Dependiendo de las normas aplicables en el lugar del mundo donde se encuentre, podrá ver que existen variaciones en los tamaños de los diámetros y largos de las mangueras, en los tamaños de las tuberías, en las especificaciones de las válvulas y los mismos gabinetes; sin embargo no se debe olvidar que cada sistema está diseñado dependiendo del tipo de uso que se le quiera dar; no es lo mismo luchar contra un incendio en una industria, que luchar contra un incendio en una residencia.

De forma básica, independientemente de los códigos aplicables en cada país o región del mundo, el proceso de diseño de estos sistemas comienza determinando la intención de su uso. Podríamos dividir de forma muy simplista estos parámetros de diseño en 3 categorías dependiendo de la intención:

- a. Lucha directa y completa contra el fuego.
- b. Primer auxilio en la lucha contra el fuego.
- c. Ambas intenciones o criterios anteriores.

Si bien es cierto, NFPA no es el único organismo que ha normado y clasificado a los sistemas de acuerdo a como van a ser utilizados, nos da una clasificación sencilla y práctica de sistemas, en base a la forma simple en la que hemos dividido nuestras intenciones, otorgando 3 niveles a la clasificación, dividiendo los sistemas en clase 1, 2 y 3. No entraremos al detalle de la clasificación dada por NFPA ni por ninguna otra agencia u organismo, pero si pondremos de ejemplo el hecho de que la clase 1 de NFPA, que es para lucha completa contra incendios, utiliza mangueras con diámetros de 2.5 pulgadas y presiones hasta los 100 psi; la clase 2 utiliza mangueras de 1.5 pulgadas y presiones hasta los 65 psi, y la clase 3 debe tener la posibilidad de utilizar ambas mangueras. El objetivo del mayor caudal y presión de la clase 1 sobre la clase 2, es precisamente que la clase 1 está diseñada para lucha directa contra el fuego (tal como lo hacen los bomberos), y la clase 2 está diseñada para que le utilice algún personal entrenado en los momentos antes de que lleguen los bomberos, como para prestar una primera ayuda; sin embargo podría ser algún inquilino de la edificación que no tiene el entrenamiento que tienen los bomberos, con lo que si se utiliza una manguera como las de clase 1 podría lesionarse.

Igualmente a lo expuesto hay muchas clasificaciones de los sistemas de mangueras, dependiendo del uso y la aplicación, y hay tecnologías desarrolladas para cada uno de ellos.

Sumado a la forma de diseño por la intención de uso, está el tipo de sistema dependiendo de la manera como funciona, lo cual divide los sistemas de mangueras por lo menos en cinco categorías distintas denominadas tipos de sistemas:

- a. *Sistemas húmedos automáticos*: Son aquellos sistemas donde las tuberías que llegan hasta las mangueras están llenas siempre con agua y están siempre listos para ser utilizados, apenas se abre la manguera el agua es suministrada de forma automática.
- b. *Sistemas secos automáticos*: Aquellos sistemas en donde la tubería que llega a la manguera esta llena normalmente de aire presurizado, cuando la válvula de la manguera es abierta, el aire se despresuriza, sale; y por medio de la liberación automática de un enclave mecánico, se permite el suministro de agua hacia la manguera. El objetivo en muchos casos es no tener agua ociosa en la tubería que llega a la manguera para prevenir fugas o el congelamiento del líquido en la tubería en climas muy fríos.
- c. *Sistemas secos semiautomáticos*: Similares a los anteriores, sin embargo el aire puede o no estar presurizado y el suministro del agua hacia la manguera depende de la activación de algún dispositivo en localización remota de accionamiento manual. El suministro de agua luego de este accionamiento debe ser automático.
- d. *Sistemas secos manuales*: Son sistemas que tienen una tubería seca conectada a las mangueras y no tienen un medio de suministro automático de agua conectado al juego de tuberías. El departamento de bomberos debe realizar manualmente una conexión a un punto de suministro del sistema de tuberías para alimentar de agua el sistema y así suministrarla a las mangueras. El punto de suministro es por lo general una entrada doble llamada “siamesa”.
- e. *Sistemas húmedos manuales*: Son sistemas similares a los anteriores, sin embargo una conexión doméstica de agua mantiene las tuberías de los mismos llenas de agua. Esta conexión doméstica no tiene la capacidad de suplir de agua al sistema en caso de utilización de los mismos para una emergencia, por lo que igualmente el departamento de bomberos debe realizar manualmente una conexión al punto de suministro de agua para el sistema y alimentarlo con caudal adecuado para emergencias. El objetivo de mantener la tubería llena, es eliminar el tiempo de llenado de la misma por parte del sistema de suministro de agua de los bomberos, y lograr que cuando ellos se conecten sea directamente para luchar contra el incendio.

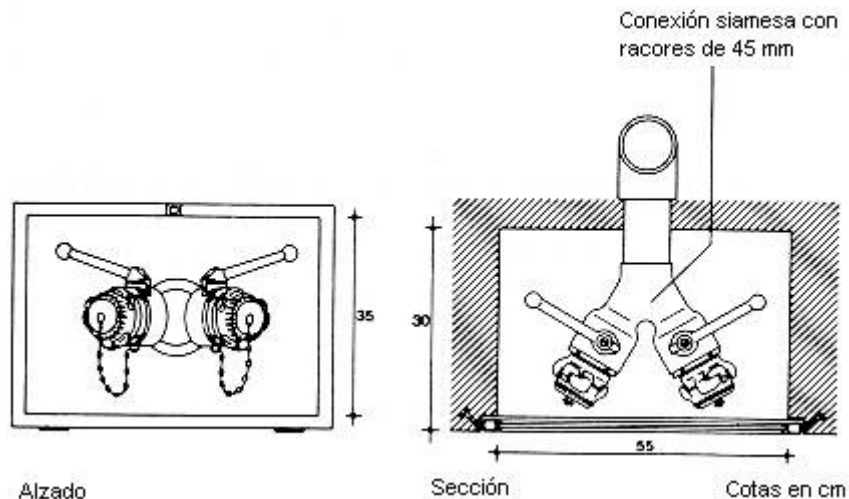


Imagen 4.8.1.1. Conexión siamesa típica utilizada por el cuerpo de bomberos para alimentar los sistemas de supresión de incendios en edificaciones Fuente: *Fire Protection Systems, Inspection, Test & Maintenance Manual*.

Independientemente de la disposición de los sistemas como automáticos, semiautomáticos o manuales, en la mayoría de los países, se requiere que los bomberos tengan un lugar de conexión al sistema para poder alimentarlo con agua.

4.8.2. Sistemas Automáticos de Rociadores Contra Incendio

Los sistemas de rociadores automáticos contra incendios, son una tecnología más novedosa que las mangueras, aunque ya con bastante aplicación, pero se encuentra en continuo desarrollo en la época actual. El principio básico de las tecnologías de rociadores automáticos es un dispositivo que detecta el calor proveniente de un incendio y se activa liberando la cantidad adecuada de agua sobre el incendio para extinguirlo.

En la actualidad existen una gran cantidad de tipos de rociadores contra incendios que dependen cada uno de la aplicación que se les vaya a dar; algunos tienen mayor capacidad de caudal que otros, algunos son más sensibles, algunos se activan con menor temperatura que otros, algunos tienen un mejor tiempo de respuesta, etc. Hay un amplio margen de parámetros y variables para clasificarlos, hay otra gran cantidad de elementos que están siendo desarrollados y otros que están siendo optimizados continuamente.

Sin embargo de forma simple todos tienen un principio básico de funcionamiento: el calor generado por un incendio sube como un chorro hasta el techo de la edificación, luego de chocar con el techo se propaga horizontalmente formando capas en flujos que cubren entre el 5 y el 12% de la distancia que hay en altura desde donde está la fuente del

incendio hasta el techo; los dispositivos rociadores termosensibles son ubicados cerca del techo de forma que queden inmersos en esta capa de flujo de calor, al calentarse el sensor térmico, se activa rompiéndose o liberando un enlace que abre una válvula dentro del elemento rociador que permite el flujo de agua; este chorro de agua choca con un deflector que lo esparce dividiéndolo en pequeñas gotas a forma de rocío (por lo cual se le llama rociador), lo que hace que la superficie aprovechable de agua que choca con el fuego sea mayor, logrando una mayor evaporación por unidad de tiempo y quitando mas energía al incendio que si se luchara con chorro directo (como en el caso de las mangueras), y al mismo tiempo ocupando espacios de aire con lo que se quita oxígeno al incendio.

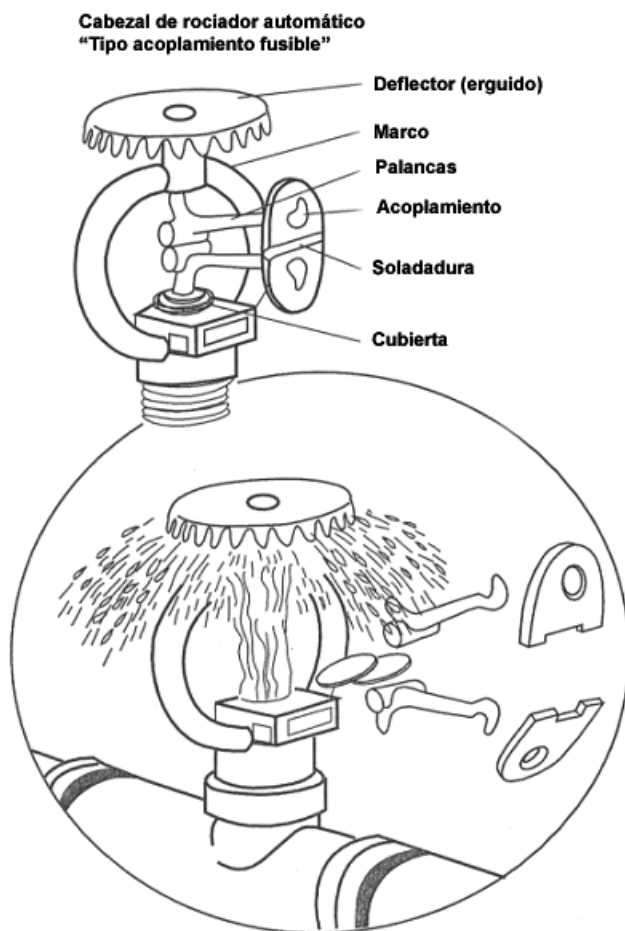


Imagen 4.8.2.1. Esquema de la activación de un rociador automático de accionamiento tipo fusible. Fuente: *Fire Protection Systems, Inspection, Test & Maintenance Manual*.

El diseño y aplicación de las distintas variantes de tecnologías de supresión contra incendios por medio de rociadores depende principalmente de que es lo que se va a

proteger. Partiendo de eso se estipula la cantidad de agua que se va a requerir por unidad de área para sofocar el incendio más crítico que puede darse en esa propiedad, se selecciona un juego de rociadores que cumpla con estas características de flujo y patrones de distribución de agua por unidad de área, y cuyas coberturas sean adecuadas para ajustarse a las características arquitectónicas de la edificación.

Luego se dimensiona un juego de conexiones por tuberías por medio de las cuales pueda suministrarse adecuadamente las cantidades requeridas de agua a cada uno de los rociadores, se calculan las pérdidas friccionantes (o de presión) que se generan por los flujos de agua dentro de estas tuberías, y se dimensionan para que sean adecuadas (las mínimas posibles dentro del marco de la economía del proyecto pues mientras mas se reducen, mas se aumentan los diámetros de las tuberías y mas costoso sale el sistema), y se calculan los requerimientos mínimos que debe tener el sistema o la fuente de suministro de agua para alimentar el sistema de forma adecuada para que funcione correctamente.

Se dan los datos de presión y caudal necesarios para la fuente y se selecciona la fuente. Aunque en palabras sencillas he resumido los pasos a tomar en el diseño de un sistema automático de protección contra incendios por medio de rociadores; el proceso es muy largo, complejo y laborioso. Los cálculos hidráulicos son tan extensos que es necesario llevarlos a cabo con apoyo de mucha tecnología de software y simulación, para la envergadura de los proyectos actuales.

Es importante mencionar que aparte de esto, la selección de los rociadores no solo se enfoca en la cantidad de agua que liberen y su distribución, parámetros como el tiempo de respuesta, la temperatura de respuesta, la forma arquitectónica de los rociadores (en muchos lugares se intenta poner rociadores que combinen con la arquitectura del sitio o que se disimulen lo mas posible), las obstrucciones, y muchos otras variables deben ser consideradas al momento de especificar el sistema.

Al igual que con los sistemas de mangueras, hay sistemas húmedos y sistemas secos, lo que incrementa grandemente la variedad de aplicaciones de los mismos. Para nuestros efectos solo es importante demarcar el estado del arte de estos sistemas, el cual es avanzado como ya se ha estipulado, pero en desarrollo; y se ha estipulado cual es el principio de funcionamiento general de la tecnología desarrollada. El lector interesado podrá consultar la bibliografía relacionada a fin de extender su conocimiento en cada uno de los diferentes tipos de sistemas de rociadores.

A continuación proporcionaremos una tabla para la identificación práctica de los rociadores, por un código de colores utilizado independientemente del tipo, el cual se basa

solo en la temperatura de aplicación. Es importante recordar que con esto no se estipula un tipo de rociador, esta tabla es solo una clasificación muy simple que nos indica a que temperatura se activan los elementos de cada rociador. Existen una gran cantidad de tipos distintos de rociadores para diferentes aplicaciones que se pueden activar a la misma temperatura.

Clasificación, código de colores y rango de temperaturas para rociadores automáticos ^(c)						
Máxima Temperatura del Cielo Raso		Rango de Temperatura		Clasificación de Temperatura	Código de Colores	Color del Bulbo de Vidrio
°F	°C	°F	°C			
100	38	135-170	57-77	Ordinaria	Sin Color o Negro	Naranja o Rojo
150	66	175-225	79-107	Intermedia	Blanco	Amarillo o Verde
225	107	250-300	121-149	Alta	Azul	Azul
300	149	325-375	163-191	Extra Alta	Rojo	Púrpura
375	191	400-475	204-246	Muy Extra Alta	Verde	Negro
475	246	500-575	260-302	Ultra Alta	Naranja	Negro
625	329	650	343	Ultra Alta	Naranja	Negro

Tabla 4.8.2.1. Clasificación simple de los rociadores de acuerdo a su temperatura de activación y colores para su identificación visual. Extraída del código NFPA-13.



Imagen 4.8.2.2. Se muestra la activación de un rociador en el momento de una prueba para el sistema de un edificio de gran altura. Se puede observar el patrón cónico de rocío.

4.8.3. Otras tecnologías de supresión de incendios a base de agua

Las mangueras y los rociadores aunque son extensamente las tecnologías mas utilizadas, no son las únicas, el ingenio humano ha logrado conquistar terrenos de lucha contra el fuego, en aplicaciones donde hace algunos años, no era imaginable utilizar el agua; como por ejemplo en riesgos de explosión, combustibles sólidos y grandes equipos energizados con altas cargas eléctricas. A continuación se presentan algunos ejemplos de aplicaciones tecnológicas de última generación con las que se combaten estos y otros tipos similares de riesgos con tecnología basada en agua.

4.8.3.1. Sistemas de Rocío de Agua de Ultra Alta Velocidad (Ultra-High Speed)

Los Sistemas UHS (Ultra-High Speed) han sido diseñados para aplicaciones de riesgo de explosión. Este tipo de sistemas utiliza tecnologías por medio de las cuales la descarga de agua comienza antes de que pasen los 100 primeros milisegundos luego de la

detección, la cual a su vez se da por la medida de una fuente de energía por parte de un detector. Estos niveles de respuesta son requeridos cuando se trabaja con materiales de propagación de flama muy rápida y HRR (rata de liberación de calor) muy elevado.

La tecnología ha avanzado al nivel de que se utilizan detectores electrónicos muy sofisticados, como detectores ultravioleta, infrarrojos, multibanda, etc.; conectados a controladores de alta velocidad, logrando disminuir los tiempos de respuesta hasta a 10 milisegundos, por lo que esta cantidad de tiempo ya se ha vuelto mandatoria para sistemas que combaten fuegos de muy rápida propagación de flama (deflagraciones, explosiones).

Al otro lado del avance tecnológico evidente de estos sistemas, se encuentran múltiples complicaciones que vienen adjuntas a los mismos, y es que no se puede negar que son sistemas de mucho cuidado, tanto en su instalación como en su mantenimiento. Los contratistas en general, consideran que estos sistemas son muy difíciles de instalar; los clientes finales los consideran muy difíciles de mantener, y para las personas en general estos sistemas tienen una connotación de misterio o presagio.

Las principales aplicaciones de este tipo de sistemas se dan en locaciones de manufactura o procesos de combustible de cohetes, manufactura y manejo de combustible propulsor sólido, pintura en spray, manufactura de municiones, mantenimiento y renovación de artículos y material militar que contienen artículos pirotécnicos, fuegos pirotécnicos, manufactura y manejo de sólidos volátiles, polvos, químicos y gases.

Es importante recalcar sin embargo que esta tecnología no ha logrado ser efectiva en el caso de detonaciones, sin embargo ha logrado gran aplicación en deflagraciones y explosiones, donde la velocidad de la propagación no supera la velocidad del sonido.

4.8.3.2. Sistemas de Supresión de Incendios por Niebla de Agua (Water Mist)

Los sistemas de niebla de agua, han sido utilizados intensamente desde la década de los '90. Las organizaciones de regulación marítima internacionales decretaron a principios de los '90 el requerimiento de tener sistemas rociadores en buques de pasajeros, lo que condujo a los investigadores a la búsqueda de un sistema que fuera equivalente a los rociadores comunes que ya se conocían, pero cuyos requerimientos de agua de suministro fuesen menores, que las tuberías del sistema hidráulico fuesen de dimensiones pequeñas y que en general tuviese elementos y componentes que representaran una menor carga que un sistema de rociadores contra incendio. Los halones como agentes extintores eran una alternativa, pero se encontraba la fuerza conservacionista de reducción y eliminación de

componentes que deterioran la capa de ozono, entre los cuales se encuentran estos. Ante estas situaciones triviales, los ingenieros e investigadores hicieron surgir un novedoso sistema que nebuliza el agua en pequeñas gotas mucho más finas que el rocío, a tal punto de ser considerada “niebla de agua”, para estas aplicaciones marinas.

Como ya se ha visto en partes anteriores de esta literatura, mientras más finas son las gotas de agua, más efectividad existe en la extinción de los incendios, ya que se tiene mayor área de contacto del agua con el fuego que cuando la misma se encuentra en bloques de masa más grandes. El aumento en esta efectividad de la extinción es tal que se utiliza una cantidad mucho menor de agua para lograr los mismos efectos de extinción que si se utilizaran rociadores comunes, ya que el agua nebulizada ataca 2 de los puntos clave en la extinción; toma el espacio del oxígeno produciendo sofocamiento, y es un agente refrigerante al reducir la temperatura de la llama. (Se puede consultar el acápite 3.1.3 del capítulo 3 que habla sobre la ciencia del fuego para aclarar esta forma de trabajo en la extinción). Aparte de esto en menor escala la niebla de agua contribuye al bloqueo del calor radiante del foco del incendio hacia otros posibles focos y produce un efecto cinético de niebla en las llamas, con lo que se mezclan diluyen y pierden fuerza.

Los sistemas de agua nebulizada tienen hoy día gran aplicación, no solo en el ámbito marino, sino también en cuartos de máquinas, recintos de turbinas, hoteles (más que todo en Europa), galerías, edificios de retiro, salas o cuartos con equipamiento eléctrico, cuartos de cómputo, túneles y compartimientos de pasajeros de aeronaves.

Los sistemas se diseñan bajo varios criterios de diseño diferentes, tanto es así que hay sistemas de baja, media y alta presión, con presiones de trabajo que van desde los 75 hasta los 2000 psi (5 a 140 bars). Sin embargo el fin último es el mismo, lograr una niebla de agua que produzca el efecto ya indicado sobre un incendio.

4.8.3.3. Sistemas de rocío de agua por válvulas de diluvio y boquillas abiertas (Water Spray)

Estos sistemas son una variante del sistema de rociadores contra incendio, donde los rociadores son reemplazados por boquillas direccionadas que esparcen un patrón de rocío más preciso y con gotas más finas que los rociadores comunes. Las tuberías son en su mayoría tuberías secas, con un juego de tuberías pequeñas llenas de agua con rociadores parecidos a los comunes llamados rociadores pilotos, los cuales solo cumplen el objetivo de detección del incendio, y al detectar el incendio dejan escapar el agua de la pequeña tubería

que llega a ellos, la cual llega también a la válvula principal que puede ser una válvula de diluvio simple, o una válvula con algún tipo de retardo de tiempo o con algún enclave a una segunda señal que confirme el incendio (tal como un detector electrónico) antes de dejar pasar el agua hacia las boquillas que son las que cumplirán el objetivo de extinguir realmente el incendio. En caso de que la válvula que libera el agua tenga algún tipo de retardo o enclave, se le llama válvula de preacción en lugar de válvula de diluvio.



Imagen 4.8.3.3.1 Verificación del sistema de “Water Spray” de transformadores de potencia eléctrica de una planta generadora.

Las aplicaciones de este tipo de sistemas son múltiples, siendo las más, la protección de grandes transformadores de potencia con bobina sumergida en aceite, tanques de gas licuado de petróleo, tanques de combustible líquido, interruptores de potencia, máquinas rotativas, bandejas portacables, y estructuras similares.

El cálculo de la demanda de agua dependerá de la aplicación que se tenga, ya que cada tipo de combustible protegido tiene distintos requerimientos de extinción.

4.8.3.4. Sistemas de combinación de agua y otros agentes

Existen también diversas tecnologías en la que el agua es combinada con otro agente extintor, ya sea un polvo, un gas, una emulsión, una pasta o foam u otro líquido. Las aplicaciones son mucho mas específicas y en estos casos el agua muchas veces es usada solo como medio transportador del otro agente que es el que realmente actúa en contra de tipos y formas específicas de incendios, y como refrigerante.

4.8.4. Fuentes de Suministro de Agua

La fuente de suministro de agua de los sistemas de protección contra incendios en general (mangueras, rociadores o cualquier otro que utilice agua), debe ser confiable, y debe tener la reserva de agua suficiente para combatir el incendio dependiendo del tipo de riesgo que se maneje (la locación y los materiales combustibles que en ella se encuentren) y el tipo de construcción (combustible o incombustible).

En muchos casos se utiliza una reserva de agua artificial con tanque cisterna conectada a una bomba de protección de incendios que debe estar certificada para este uso por UL, FM, o ambos. En otros casos se utilizan lagunas, lagos, tanques de gravedad, ríos, pozos, agua de la red municipal, etc., siempre y cuando su nivel de producción y/o reserva de agua cumpla con los requerimientos del sistema de protección de incendios y su nivel de fiabilidad sea suficientemente alto.

El hecho de cumplir con los requerimientos del sistema de incendios, quiere decir que la fuente provee el caudal necesario, la presión necesaria y provee ambas características por el tiempo necesario estipulado para poder mantener el sistema de protección contra incendios operando su capacidad mientras se suprime el incendio. En muchos casos se utilizan combinaciones de fuentes para lograr los caudales adecuados por lo tiempos correctos, y se utilizan bombas de presión para elevar las presiones a las requeridas por el sistema de incendios.



Imagen 4.8.4.1. Inspección por parte de la Oficina de Seguridad del Cuerpo de Bomberos de un sistema de bombeo para incendios impulsado eléctricamente. Al fondo se aprecia la reserva o fuente de agua, en 3 enormes tanques que suman más de 45,000 Galones conectados a la Bomba de incendio. En la inspección como se ve, deben estar presentes el ingeniero diseñador y los peritos especialistas del Cuerpo de Bomberos.

El tema de las fuentes de suministro de agua es tan importante y complejo que organizaciones como NFPA le han dedicado códigos y libros enteros, ya que la fuente es un punto único de falla del sistema, si la fuente falla, nada de lo que este conectado a ella funcionará. El estudio de fiabilidad de los sistemas de suministro de agua es un tema de alta importancia y algo complejo. Referenciaré al lector a un ejemplar que he desarrollado para la Universidad Politécnica de Catalunya, el cual se encuentra en los anexos de esta literatura, sin embargo debo recalcar que no es la única forma de realizarlo.

4.9. Tecnologías de Supresión de Incendios con Otros Agentes

Aunque como se vio en el punto anterior, el agua es el agente mas extensamente utilizado en la lucha contra el fuego, no es el único. Existen otros muchos agentes que

tienen aplicaciones específicas en la lucha contra el fuego, a continuación exponemos algunos de ellos.

4.9.1. El Dióxido de Carbono

El principal frente de batalla del dióxido de carbono es sofocar el incendio por medio de la eliminación del oxígeno, y en menor escala por enfriamiento; hoy en día tiene unos 100 años de utilización. Su utilización se da en varios formatos, entre ellos sistemas de inundación total con dióxido de carbono de la locación incendiada; sistemas de aplicación local, sistemas de aplicación manual directa por medio de mangueras, aplicación manual móvil por medio de tanques móviles, descarga extendida no encerrada, etc. Como el CO₂ elimina o desplaza el oxígeno del área, no debe ser utilizado en locaciones donde exista ocupación prolongada de personas. Sus principales aplicaciones son en líquidos inflamables, gases, incendios eléctricos, y en menor escala en combustibles ordinarios como papel, ropa, y otras materias celulósicas.

4.9.2. Halones y Agentes Limpios Gaseosos

Los halones y agentes limpios son gases inertes que proveen supresión de incendios en requerimientos especiales por medio de inundación de la locación incendiada con el porcentaje adecuado del gas para suprimir el incendio por medio de sofocamiento y enfriamiento. Como los halones son agentes destructores de la capa de ozono (cloro-fluoro-carbonos), han sido poco a poco reemplazados por nuevos agentes mucho menos perjudiciales, y algunos de ellos incluso aprobados para su uso en lugares con ocupación de personas, pues no causan daño apreciable a la salud. Estos nuevos agentes tienen cada uno nombres químicos y nombres comerciales distintos, pero su objetivo es el mismo, y han sido reunidos en un grupo llamado “agentes limpios”. Estos nuevos agentes tienen la capacidad de vaporizarse rápidamente y no dejar residuos luego de su aplicación, y los hay de dos categorías: compuestos y de mezclas de gases inertes.

4.9.3. Sistemas a base de Espuma o Foam

Estos sistemas han sido desarrollados primordialmente para combatir incendios en líquidos inflamables y combustibles, donde la punta de lanza en el combate contra el fuego

es establecer una barrera entre el combustible y la llama como es expuesto en el punto 3.1.3 de esta literatura. El foam forma esa barrera entre la superficie del combustible que se está quemando y las llamas que están sobre él controlando el incendio. El efecto comienza cuando por medio de esta barrera se suprimen los vapores del líquido combustible o inflamable, que son los causantes de la llama y se enfría la superficie del líquido. Cuando logra romperse la reacción en cadena (lo que a veces es muy complicado en estos combustibles), se extingue el incendio. El foam se combina con agua para que sirva como medio de transporte, y luego de aplicado el combustible se expande a razón de 20 veces por volumen si es de baja expansión, de 20 a 200 veces por volumen si es de mediana expansión y de 200 a 2000 veces por volumen si es de alta expansión. Existen múltiples sistemas de aplicación de foam, manuales, automáticos y móviles.



Imagen 4.9.3.1. Equipo de foam descargando sobre la superficie de un combustible

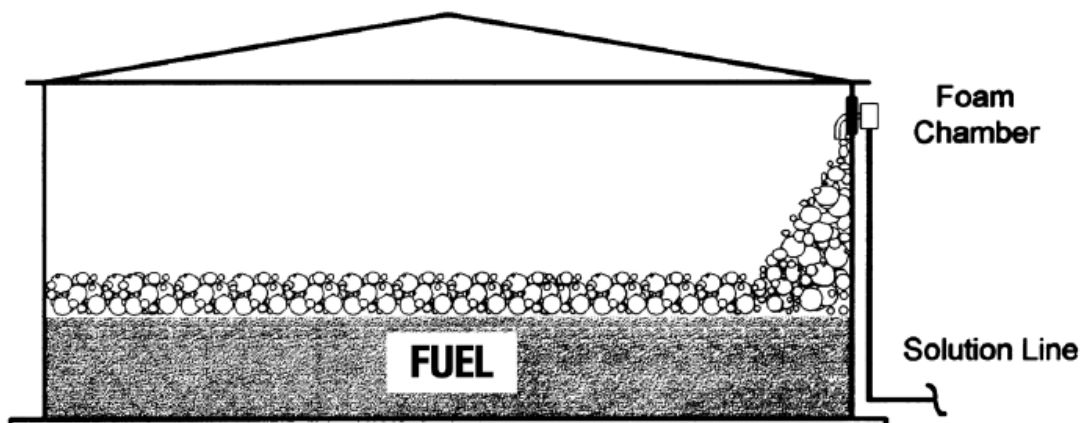


Imagen 4.9.3.2. Se muestra el esquema típico sencillo del funcionamiento de los sistemas de foam.



Imagen 4.9.3.2. Incendio de un tanque de combustible líquido.

4.9.4. Agentes Químicos

Los agentes químicos tienen como principal objetivo funcionar en aplicaciones donde el agua no es un elemento deseable en la extinción de un incendio, tal como es el caso de metales combustibles, procesos de maquinado y líquidos inflamables.

En general están divididos en dos grandes categorías:

- a. Agentes químicos secos.
- b. Agentes químicos húmedos.

Los agentes químicos secos datan de mediados de los años '50 y los húmedos se vieron a partir de los años '60 para aplicaciones de cocinas. Los agentes secos en general son polvos compuestos por partículas muy finas, usualmente bicarbonato de sodio, bicarbonato de potasio, o fosfato de amonio, con adiciones de material suplementario que provee una resistencia a la absorción de la humedad y también provee propiedades deseables de flujo del agente.

Las aplicaciones son en general para incendios clase B y C (según la clasificación general de NFPA), que incluye combustibles líquidos y aplicaciones para incendios eléctricos, sin embargo los agentes que están basados en fosfato de amonio son agentes químicos secos multipropósito con los cuales se pueden atacar los combustibles comunes (clase A). Los agentes secos no han demostrado tener efectividad en metales combustibles por lo cual no tienen aplicación en la clase D de la NFPA.

Los agentes químicos húmedos por su parte consisten en sales orgánicas e inorgánicas que se mezclan con agua y forman soluciones alcalinas que son descargadas desde una tubería por ayudados generalmente por un gas bajo presión. Son altamente efectivos en la supresión de incendios de clase K según la clasificación de NFPA, de equipos de cocinas comerciales, tales como freidoras, planchas, parrillas, sartenes, etc., y actualmente son los únicos agentes listados por organismos internacionales de prueba y certificación, para estos objetivos.

4.9.5. Extinguidores

Los extinguidores son pequeños tanques portables que utilizan alguno de los agentes extintores que ya se han visto a lo largo del capítulo 4 y pueden ser fácilmente reemplazables y movibles de un sitio a otro.

Debido a su facilidad de instalación, mantenimiento y uso han sido extensamente utilizados en seguridad contra incendios desde hace muchas décadas, tanto por personal

especializado como por personal sin entrenamiento alguno (los propios inquilinos de las locaciones donde ellos se encuentran); y les hemos puesto en un acápite aparte para distinguir su gran utilidad y destacarlos, no en base a algún agente específico pues los hay para todos los agentes ya vistos, pero sí por su presentación portable.

Para dar utilidad a un extintor sólo es necesario seguir algunas sencillas instrucciones que están plasmadas en una placa o calcomanía en el mismo extintor y muchas veces son gráficas para que el entendimiento sea casi instantáneo sin necesidad de leer.

Los extintores son clasificados según su propósito y los hay para cada una de las clases de incendio según la clasificación de NFPA (ver punto 3.1.4.), y según esto también se da la distribución y ubicación de los mismos dentro de las locaciones. Por ejemplo aquellos extinguidores listados para servir en incendios clase A deben ser puestos a distancias de camino de 75 pies (23 m) de uno a otro, mientras que los de clase B deben ser puestos a 50 pies (15 m) de uno a otro.

Los extintores también vienen llenos con agentes multipropósito (aquellos que sirven para varias clases de incendio). Por ejemplo es muy común encontrar en muchas locaciones de uso general y comercial los extintores llamados “ABC”, pues sirven tanto para incendios clase A, como clase B, como clase C; lo que los hace muy versátiles e utilizables.

4.9.6. Protección Contra Explosiones

El tema de las explosiones ya ha sido tocado en esta literatura cuando se habló de sistemas de supresión de ultra alta velocidad por medio de agua. Sin embargo también se mencionó que no es un sistema que tenga aplicación efectiva en todos los tipos de explosión, sino solo en las más lentas. Dependiendo de la velocidad en la que se da la explosión y de la intensidad y cantidad de la energía liberada, muchos autores tienen clasificaciones para las explosiones que van desde aquellas nubes de vapor que causan explosiones más lentas y con menor energía, hasta las implacables detonaciones nucleares cuya liberación de energía es muy alta, intensa y rápida.

Las clasificaciones pueden ser múltiples dependiendo del autor, nosotros nos limitaremos a describir 2 tipos principales de explosiones de forma muy general dependiendo principalmente de su velocidad de propagación mayor o menor a la del sonido en el medio reaccionante; las mismas son las detonaciones y las deflagraciones.

Los explosivos de fase condensada, tanto militares como comerciales son divididos usualmente también en 2 categorías, Altos Explosivos y Bajos Explosivos.

Los altos explosivos tienden usualmente a detonar, lo que significa que tienen una reacción y velocidad de propagación mayor que la velocidad del sonido en el material reaccionante. Este tipo de explosivos puede generar presiones en el rango de 10^4 a 10^6 psi (700 a 70,000 bares), y sus velocidades de propagación están entre los 2,000 y 8,200 m/seg. La dinamita es un buen ejemplo de estos explosivos, la cual tiene una velocidad de propagación que ronda los 4,900 m/s.

Por su parte los bajos explosivos tienden a deflagrar, lo que significa que tienen una reacción y velocidad de propagación menor a la del sonido en el medio reaccionante. Las presiones producidas por este tipo de explosiones son mucho menores a las producidas por las detonaciones, y son este tipo de explosiones las que generalmente pueden ser suprimidas por los medios de supresión de explosiones de alta velocidad.

Existen otras múltiples clasificaciones de las explosiones, entre ellas explosiones de gas, explosiones de polvos, explosiones de nubes de vapor, ráfagas de onda, explosiones de reacciones químicas, etc.; pero en general pueden ser clasificadas todas dentro de la división propuesta de deflagraciones y detonaciones.

Los ingenieros de protección contra incendios tienen especial cuidado con un tipo particular de explosión que se debe a la ruptura de contenedores de gas licuado en 2 o mas piezas. Cuando esto sucede, el contenido del recipiente de gas licuado rápidamente se vaporiza y expande creando una alta expansión de vapores, lo que es una explosión llamada BLEVE, que viene de la terminología inglesa que describe lo que sucede con iniciales: *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*; y es prácticamente un caso especial de explosión pues es una explosión por liberación de presión, la cual es bastante común en zonas industriales, comerciales y residenciales que contienen recipientes con este tipo de cargas.

Lo cierto es que para todos los tipos de explosiones, las tecnologías desarrolladas para la lucha en su contra están mas orientadas hacia su prevención, mas que hacia la protección, pues muy difícilmente es efectivo un medio de protección en una explosión de gran magnitud, sin embargo, los estudios hechos con las mismas han demostrado que existe una cadena general de eventos que siguen la mayoría de las explosiones independientemente si es de gas, vapor, polvo, o mezcla; cadena en la cual se puede introducir una acción de ingeniería de protección en muchos de sus eslabones, la cual es citada a continuación de forma abreviada:

Eslabones de la cadena	Descripción breve del evento; materiales, procesos, etc.	Acción ingenieril y tecnológica de protección
Disturbio	Fuga de material, aumento de presión, movimiento súbito.	<ul style="list-style-type: none"> a. Suprimir los disturbios por medio de aislamientos. b. Redireccionar los disturbios a locaciones seguras
Entrada de depósitos de polvo	Distribución de partículas, estrés crítico.	<ul style="list-style-type: none"> a. Eliminar o limitar los depósitos de polvo. b. Rociar con agua o aceite aquellos que no se eliminan.
Dispersión de combustible	Turbulencias dentro del recinto, ventilación y recirculación de aire, localización de mezclas inflamables	<ul style="list-style-type: none"> a. Minimizar las fuentes de combustibles. b. Mejorar la ventilación
Mezcla inflamable	Presentación de concentraciones de combustible dentro de los rangos mínimos y máximos para propiciar la inflamabilidad	<ul style="list-style-type: none"> a. Controles de combustible. b. Control de oxígeno.
Fuente de Ignición	Contacto con llamas, chispas, superficies calientes, electricidad estática, rayos, chispas de fricción o impactos, vibraciones, etc.	<ul style="list-style-type: none"> a. Eliminar las fuentes de ignición posibles.
Ignitabilidad del material	Ignición del combustible por medio electrostático, superficies calientes, alta temperatura de volumen de ignición	<ul style="list-style-type: none"> a. Aditivos para los materiales. b. Cambiar la distribución de las partículas.
Reactividad del material	Presiones pico, ratas de incremento de presión, velocidad de quemado, y propensión a deflagración y/o transición a detonación.	<ul style="list-style-type: none"> a. Aditivos para los materiales b. .Cambiar la distribución de las partículas.
Propagación de la	Velocidades turbulentas de	<ul style="list-style-type: none"> a. Detención de la

llama	llama, aceleraciones de llama inducidas por características geométricas	<p>propagación de la llama por medios físicos (de ser posible).</p> <p>b. Supresión de la explosión (generalmente en deflagraciones solamente)</p> <p>c. Aislamiento de la explosión (sólo en deflagraciones)</p>
Desarrollo de grandes presiones	Calor liberado por combustión, calor perdido por radiación o enfriamiento convectivo, material perdido por venteo o ventilación; creación de ráfagas de ondas de presión	<p>a. Confinamiento de la presión (si es posible).</p> <p>b. Supresión de la explosión (solo en deflagraciones y de ser posible en este punto)</p> <p>c. Venteo de la explosión</p>
Daños ocasionados	Daños mecánicos debido a sobrepresiones, proyectiles, altas temperaturas, daño químico, daños ambientales, etc.	<p>a. Mejorar el diseño mecánico de los elementos.</p> <p>b. Control de proyectiles.</p> <p>c. Protección térmica</p>

Tabla 4.9.6.1. Cadena general de eventos de las explosiones.

Como puede verse en la tabla anterior, para cada uno de los 10 eslabones de la cadena hay acciones ingenieriles y tecnologías de posible aplicación con las que se puede tomar una posición de protección contra la explosión. No es funcional con todas las explosiones, como ya se dijo, mientras mas rápida e intensa sea la explosión (tendencia a detonación), menos elementos de control se pueden tener sobre ella; igualmente, mientras mas tarde se tome una acción de control, menos control se tendrá sobre ella.

Los estudios sobre explosiones son muchos, muy especializados y muy diversos, el lector podrá complementar algún conocimiento específico en la bibliografía relacionada, para nosotros es mas que suficiente dejar estipulado cual es el actual estado del arte en la lucha contra las explosiones en este punto. Las explosiones son uno de los temas más estudiados, pero con menos respuestas, por causa de la rapidez con la que se desarrollan y su difícil observación.

4.10. Tecnologías de Protección Pasiva

Las tecnologías de protección pasiva hacen referencia a todas aquellas técnicas de protección, en las cuales no se toman acciones ni manuales ni automáticas. La protección se lleva a cabo básicamente por resistencia al fuego dada por elementos inmóviles

Este tipo de tecnología se desarrolla básicamente por medio de pruebas de resistencia a fuego de los materiales, un ejemplo de estas pruebas es la ASTM E119, de la cual se habló en el punto 3.2.1.1.2. de esta literatura, la cual se ha vuelto la curva estándar de tiempo-temperatura, tabulada por NFPA en su código 251 (Métodos Estándares para Pruebas de Resistencia al Fuego de Materiales de Construcción de Edificios); y designada para superficies en el 255 para aplicaciones generales de pruebas de materiales de construcción.

Esta prueba sigue una curva que fue presentada en el punto 3.2.1.1.2. sobre la cual se dictamina la duración de una barrera contra el fuego en base a que la temperatura sea la indicada con respecto al tiempo por la función de la curva. Sin embargo es lógico que todos los incendios tienen características de temperatura e incremento de temperatura distintos, por lo cual la curva ASTM E119 es solo una referencia para normar resistencia al fuego de los elementos. Cuando se estipula que un elemento sirve como barrera de 2 horas de resistencia al fuego según ASTM E119, significa que el elemento ha sido sometido a un fuego que sigue las características de la curva en la superficie del elemento, y el mismo demora 2 horas o más en dejar pasar el fuego de un lado a otro; sin embargo si el fuego muestra características mucho más severas en intensidad de calor y temperatura en la superficie del elemento que las que dice la curva, seguro no durará 2 horas, y si muestra características menos severas, durará más.

Igualmente que la ASTM E119, hecha con propósitos generales de prueba y desarrollo de tecnologías de protección pasiva, existen otras curvas que requieren otras características, y por lo tanto 2 horas según ASTM E119, no son equivalentes a 2 horas bajo los dictámenes de las otras curvas. Ejemplos de otras curvas son la ASTM E1529 para simulación de exposición a fuego en piscinas de hidrocarburo, la ASTM E1725 para barreras de componentes de sistemas eléctricos, la ASTM E2074 (NFPA 252) para puertas, la ASTM E2010 (NFPA 257) para ventanas, la ASTM E2226 para prueba de chorros de manguera, la ISO 834 para pruebas de resistencia a fuego de elementos de construcción de edificios (la cual es ligeramente más severa que la ASTM E119 y norma los mismos

materiales), la UL 1709 para pruebas de resistencia a fuego (mucho mas severa que la ASTM E119 en lo que respecta a incremento de temperatura).

En base a estas pruebas e investigaciones se han desarrollado gran variedad de barreras contra incendios, e incluso barreras contra humo solamente donde solo es requerido por código limitar el pase del humo. Entre ellas se encuentran, puertas cortafuego, ventanas cortafuego, dampers cortafuego y cortahumo, cubrimientos de materiales estructurales, pinturas resistentes al fuego, espumas resistentes al fuego, y una gran variedad de presentaciones de materiales resistentes al fuego para hacer las barreras.

Muchos materiales de construcción tienen propiedades naturales muy buenas de resistencia al fuego, por lo cual son utilizados como barreras contra fuego en muchos de los casos. Un ejemplo de estos es el cemento y los bloques, con los cuales se hacen excelentes barreras contra fuego de 2 horas bajo la norma ASTM E119, con muy bajos costos.

4.11. Tecnologías de Confinamiento del Fuego y Locaciones Defensoras (Defend-in-Places)

Con el desarrollo de las tecnologías de protección pasiva y activa, y su coordinación y aplicación combinada dentro de las edificaciones, se ha logrado desarrollar modelos de confinamiento del fuego, donde aquellos incendios que no pueden ser extinguidos son controlados y confinados a ciertas áreas durante el tiempo suficiente para permitir el egreso de todos los ocupantes del edificio. Lo que se busca con esto es modelar el comportamiento del fuego dentro de la edificación, pero no bajo su desarrollo normal y natural, sino tomando en cuenta el efecto que producen las distintas tecnologías de protección aplicadas a la edificación, incluyendo incluso cosas tan comunes dentro del modelado como lo son los acabados interiores, y también temas especializados como la protección con rociadores, el movimiento de humo y la ventilación, las barrears de fuego y humo, y el control de deflagraciones y detonaciones donde pueda ser aplicado.

Este desarrollo de combinaciones tecnológicas ha evolucionado lo suficiente en años recientes, como para comenzar a pensar en el caso contrario, en lugar de confinar el fuego el tiempo suficiente para que los ocupantes escapen, se piensa en confinar a los ocupantes con la seguridad suficiente para que puedan permanecer en el lugar mientras el fuego se extingue. En este caso ya no se habla de “confinamiento del fuego” sino de “locación defensora” o “lugar protector” (en inglés “defend in place”). La locación

protectora “defend in place” se convierte en un área de refugio dentro del lugar del siniestro donde los ocupantes acuden en lugar de proceder con la evacuación del edificio. Esta tecnología está tomando lugar en edificaciones como hospitales, cárceles y rascacielos, donde la evacuación de las personas es dificultosa y a veces no viable; entonces se crean locaciones defensoras donde las personas pueden moverse con seguridad y estar seguros con pocos metros de recorrido en lugar de evacuar por un trayecto largo y a veces imposible.

4.12. Tecnologías de climatización, ventilación, presurización e implicaciones relacionadas

Los sistemas de climatización, ventilación y presurización han tomado un lugar importante cuando se tiene que ver la seguridad contra incendios, debido al hecho de que la circulación de aire dentro de las edificaciones actuales es en un alto porcentaje realizada mecánicamente por medio de los sistemas de climatización y ventilación, y las presiones atmosféricas de los distintos ambientes son dominadas por los sistemas de presurización.

Las complejidades de los diseños de estos sistemas actualmente son muchas, y hay aplicaciones específicas para cada tipo de edificación, sin embargo se persiguen varios objetivos en común, entre los cuales están:

- a. Lograr que los sistemas de climatización y ventilación mantengan adecuados niveles de oxígeno dentro de las edificaciones para conservar parámetros adecuados para la habitabilidad humana, El ASHRAE 62 es una norma que regula estos parámetros, de acuerdo a niveles de oxígeno renovado por medio de reemplazo del aire viciado y control de los niveles de CO₂ y otros residuos que se acumulan en el aire cuando es viciado.
- b. Lograr niveles adecuados de humedad dentro de los recintos dependiendo de la aplicación que se tenga.
- c. Lograr controles de gases inflamables por medio del control de concentraciones de los mismos. Es una norma general no permitir concentraciones superiores al 25% del Limite Inferior de Flamabilidad (LFL).
- d. Crear zonas de presión diferencial por medio de sistemas de presurización para crear barreras físicas contra el humo en caso de incendio, originando de esta forma zonas de recorrido seguro libres de humos.

Las normas mas aplicadas en lo que se refiere a tecnologías de climatización y ventilación son ASHRAE 62, NFPA 90A, NFPA 90B, para climatización; NFPA 91 para extracciones; NFPA 92A, NFPA 92B, para control de humos.

4.13. Tecnologías de equipos con vapor y combustibles para servicios estáticos.

Los momentos cuando Thomas Savery, Thomas Newcomen y James Watt, dieron a la luz pública sus invenciones de máquinas de vapor, fundaron los hitos en la historia que nos condujeron a la edad moderna. Hoy en día el vapor aún es extensamente utilizado en máquinas para producir movimiento mecánico y transferencia de calor. Los equipos utilizados para producirlo, comúnmente conocidos como calderas, pueden tener distintas tecnologías de ensamblaje, dependiendo de la forma como funcionen; ya sea que sean de placas internas por donde pasa el agua que se convierte a vapor e intercambia calor con el fuego que la convierte a vapor; o de tubos, donde por los mismos puede pasar agua o fuego.

Pero el principio básico de operación sigue siendo el mismo, un cuerpo de agua que absorbe calor de una fuente de combustible incendiado controladamente, hasta que se convierte en vapor en un espacio confinado, donde aumenta su calor, energía interna, entalpía, entropía y presión.

Los riesgos básicos de esta operación, también siguen siendo los mismos, comenzando con la perdida del control sobre un gas presurizado, lo que conduce como ya se vio en el punto 4.9.6. a una explosión, aparte la perdida del control sobre calor irradiado del equipo, lo que puede producir incendios no deseados, la perdida de control sobre la ignición de combustible, el cual es almacenado por lo general en grandes cantidades en los lugares donde existen estas calderas, pues las mismas deben trabajar por periodos prolongados para la mayoría de las operaciones en las que son utilizadas.

Las tecnologías aplicables actualmente en ésta área de la ingeniería para la protección contra eventos de incendio comienza desde la forma como se almacena el combustible, la forma como es quemado en los quemadores, los cuales han sido sometidos a intensa investigación y mejorados; se han implementado controles de combustión y de generación de gases, se han implementado tecnologías de control de explosiones similares a las descritas en el punto 4.9.6. pero aplicado a calderas; y se han implementado alarmas, interlocks y equipos de monitoreo especializado para prevenir secuencias de operación peligrosas o inadecuadas, con señales de alarma que le avisan al operador el riesgo que se

presenta a forma de prevención y alerta en caso de pérdida de control en alguna fase de algún proceso.

4.14. Tecnologías Eléctricas y Electrónicas

Mucho se ha hablado ya entre líneas de sistemas electrónicos que han encontrado enorme aplicación en los diferentes frentes de desarrollo tecnológico en la lucha contra el fuego; microprocesadores, sistemas de alarma, sensores de distintos tipos, actuadores, etc.; sin embargo es nuestro objetivo en este punto enfocarnos en los equipos y materiales fundamentales para el trabajo de instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones que son las principales causantes de los incendios suscitados a nivel mundial.

Aunque la fuente de energía es la misma, la electricidad, la causa del incendio puede subdividirse en 2 tipos, por causa de un arco (o chispa eléctrica), o por causa de un sobrecalentamiento de algún conductor.

En el caso de un arco eléctrico, el mismo ya ha sido estudiado y modelado por muchos investigadores, y todos concuerdan en el hecho de que la energía liberada (y por ende la causante del incendio eléctrico) depende de la intensidad de la corriente, la impedancia entre los contactos donde se forma el arco, el voltaje que existe entre dichos contactos y la inductancia de la carga eléctrica que alimenta el circuito que arquea. Cuando el arco se forma, la temperatura en el área alrededor del mismo puede alcanzar en poco tiempo niveles suficientes para incendiar un material combustible, iniciando de esta forma el incendio.

El caso de incendio por fuente eléctrica y causas termoconductoras ha de tener un modelo un poco más complejo, es más lento y silencioso; y opera en la mayor parte de los casos sin dejar un rastro firme sobre el cual se pueda levantar la pista de una investigación. El modelado de este tipo de incendio es escaso, por lo cual este trabajo emprende un esfuerzo en llegar a un modelo aunque sea de aproximación a lo que ocurre cuando se da este tipo de evento. El principio básico de este tipo de incendio es el hecho de que un conductor que porta corriente se calienta por causa de la resistencia que ofrecen las moléculas del conductor al paso de la corriente, lo que causa generación de energías internas y por ende calor.

En los próximos capítulos el lector podrá leer acerca del modelado de incendios eléctricos de causas termoconductoras

Como resultado del hecho de que las causas eléctricas puras (los arcos), han sido mucho mas estudiados que las causas termoconductoras (el calor generado por sobrecalentamiento de conductores); las tecnologías contra arcos han sido extensamente mucho mas desarrolladas que las que contrarrestan los incendios de causas eléctricas termoconductoras.

4.14.1. Conductores Eléctricos

Los conductores eléctricos son elementos por los cuales la corriente eléctrica se desplaza de forma segura desde un lugar a otro. Los hay aislados y sin aislamiento; aquellos que son aislados están recubiertos de un material que provee una restricción al paso de las cargas eléctricas fuera del conductor a través del aislamiento, y dependiendo de la tecnología que usen en su aislamiento (termoplástico o termoestable) están normados para operaciones de 60°C, 70°C, 75°C y 90°C. Hay conductores disponibles que pueden operar a mucho más de 90°C, pero tienen designación especial, como los AS+ españoles.

Deben respetarse límites de temperaturas ambientales y temperaturas dentro de las canalizaciones por las cuales viaja el conductor para optar a que el mismo pueda trabajar a los rangos de temperatura para el cual ha sido diseñado. Cuando el conductor supera la temperatura para el cual ha sido diseñado el aislamiento se debilita eléctrica y mecánicamente, muchas veces se funde, propiciando el escape de carga a través de él, formando el arco y luego de ello un posible incendio.

Simplemente por el calentamiento excesivo el conductor puede también irradiar este calor, propiciando de igual forma un incendio. Este tipo de generación es por calentamiento termoconductor, y es el centro de la presente investigación.

Las tecnologías de aislamientos eléctricos de los conductores se han desarrollado en direcciones como el hecho de hacerlos mas delgados (para ocupar menos espacio en las canalizaciones), mas resistentes al calor, resistentes a la humedad y el agua, resistentes a inclemencias del tiempo y mas resistentes a daños mecánicos (choques, vibraciones, etc.).

Los mismos conductores han desarrollado también distintas presentaciones, como lo son los cables sólidos, cables trenzados, cables con núcleos mecánicos de alta resistencia (acero, aleaciones, etc.), electrobarras protegidas por carcasas, barras simples descubiertas, etc., buscando al mismo tiempo mejor aplicabilidad, portando mayores cantidades de corriente de forma mas segura y en espacios mas reducidos.

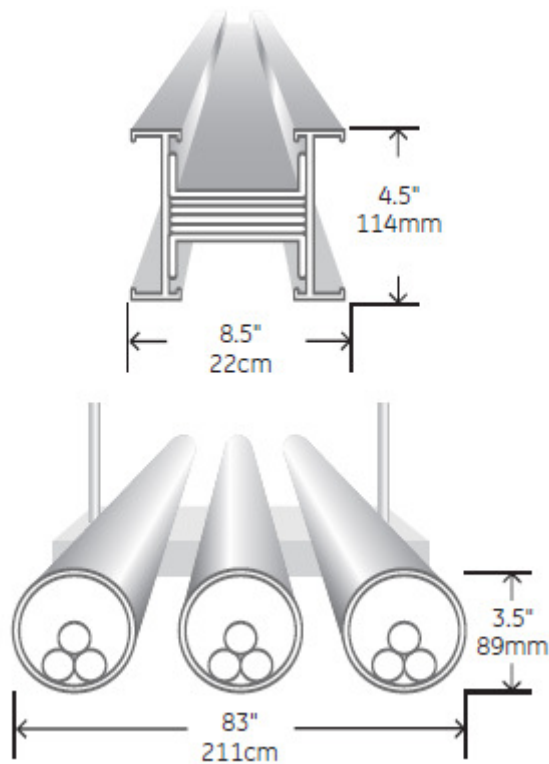


Imagen 4.14.1.1. Se muestran gráficamente la cantidad de conductores requeridos para transportar 2000 amperios en 3 fases con neutro y hasta 600 voltios utilizando electrobarras (superior) o 12 cables de cobre 500 MCM en 3 canalizaciones de 6" de diámetro. Fuente: Documento *Application And Technical GET 7005F generic (Busways)* de General Electric.

4.14.2. Equipos de distribución eléctrica.

Los equipos para la distribución de cargas eléctricas, también han experimentado enormes avances tecnológicos. Ya sean tableros montados en paredes, panelboards o switchboards, o equipos de control más especializados como Centros de Control de Motores, o Interruptores de Transferencia Automática; todos han experimentado aumentos tecnológicos y estándares de seguridad en lo que respecta a su robusticidad eléctrica ante una falla; como simple ejemplo, ya es muy difícil encontrar un fabricante que tenga alguno de estos productos normados, que no soporte por lo menos 10,000 Amperios de corriente simétrica de falla, y los más robustos superan los 200,000 Amperios de corriente simétrica de falla.

4.14.3. Dispositivos de protección por interrupción automática.

Los dispositivos de interrupción automática funcionan en base a dos situaciones básicas de falla; cuando existe una sobrecorriente y cuando existe una sobrecarga. Las tecnologías actuales contemplan dispositivos de interrupción sólo de sobrecorriente, sólo de sobrecarga y dispositivos que funcionan tanto para sobrecargas como para sobrecorriente. Por lo general los dispositivos de sobrecarga funcionan con un disparador que actúa cuando sensa una corriente superior a la corriente que debe pasar por la línea que está siendo protegida por el dispositivo, el ejemplo clásico es un corto circuito. Los dispositivos de sobrecarga funcionan sensando cambios o aumentos en la temperatura de la línea, lo que quiere decir que la carga es superior a la soportada por la línea, aunque no se esté dando el caso de un corto circuito.

Estos dispositivos vienen en diferentes presentaciones y para una inmensidad de aplicaciones específicas, con sus variantes dependiendo de la aplicación, los hay para proteger equipos electrónicos, equipos con motores, equipos de climatización y aire acondicionado, equipos de iluminación, equipos de datos informáticos, etc.; y sus nomenclaturas en general reflejan de forma corta el tipo de aplicación que tienen. En general sus presentaciones físicas son tipo fusible, donde al ocurrir una falla el elemento requiere ser reemplazado por uno nuevo; o tipo breaker, donde el elemento puede ser reseteado luego de la actuación por causa de una falla para operar nuevamente.

Los adelantos mas modernos en ésta tecnología de protección por interrupción automática, cuentan varios desarrollos tecnológicos de última generación; entre ellos se enlistan los breakers con cerebro electrónico, los cuales pueden ser seteados para actuar bajo condiciones específicas de carga siguiendo una gráfica de actuación por falla que puede ser modificada bajo los requerimientos de quien lo programa. Este tipo de breakers ha facilitado enormemente lo que es la coordinación de interruptores en los grandes proyectos. Esta coordinación se basa simplemente en el hecho de que ningún breaker debe actuar en caso de una falla a menos que sea el que esta directamente antes de la falla, y en muchos proyectos que no tienen esta coordinación, se dan casos en los que la falla se encuentra al final del proyecto en una pequeña carga final sin embargo como no hay coordinación de breakers, todos los breakers que están antes de ella la pasan por alto y el breaker principal que por lo general es el único que se programa es quien la detecta e interrumpe la corriente dejando a todo el proyecto sin electricidad por causa de una pequeña falla en un punto final que pudo ser aislada del sistema eléctrico del proyecto por la actuación de un breaker mucho mas pequeño y dedicado para sólo esa área.

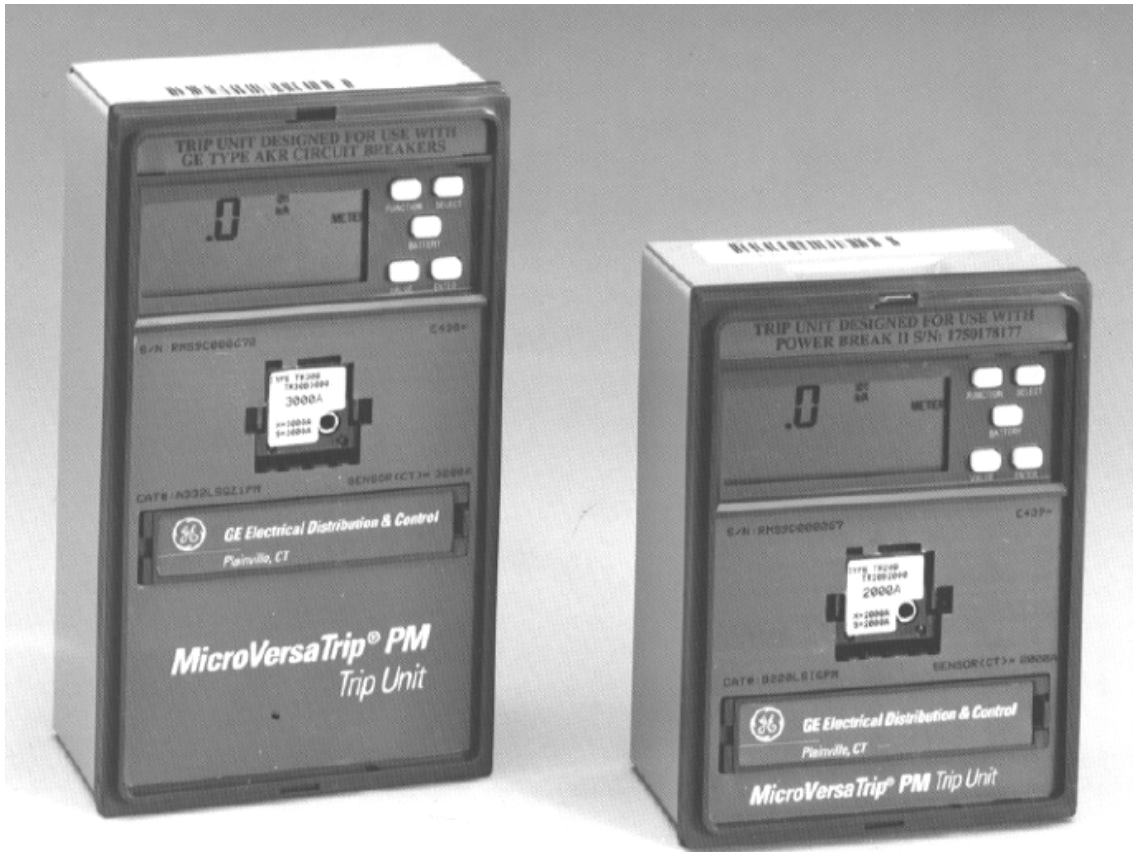


Imagen 4.14.3.1. Se muestran dos breakers programables con cerebro electrónico Microversatrip fabricados por General Electric, con pastilla para programación y capacidad de hasta 3000 y 2000 amperios de operación respectivamente de izquierda a derecha. Fuente: Documento GEH-6273E de General Electric.

Los dispositivos sensores especializados como interruptores por falla a tierra (GFCI: Ground Fault Circuit Interrupters), se listan como un avance tecnológico que ha sido muy bien aceptado por su gran aplicabilidad en áreas donde las fallas a tierra están a la orden del día, como cocinas y baños.

Otros avances relacionados con sensores, también han sido desarrollados en aplicaciones específicas, tal como los interruptores por falla de arco (AFCI: Arc Fault Circuit Interrupters), con lo que se intenta sensar características de corriente y voltaje típicas de los arcos eléctricos e interrumpir de esta forma la corriente, extinguiendo así el arco; también los interruptores por escape de corriente (LCDI: Leakage Current Detection and Interruption), que son dispositivos de última tecnología similares a los AFCI, pero diseñados para sensar características propias de cualquier daño en los conductores que suplen la corriente por donde la corriente pueda comenzar a tener un escape aunque sea mínimo, y de esta forma interrumpir el suministro. Esta última es una aplicación muy especializada y de muy alta sensibilidad, con la cual el elemento electrónico de control

puede interrumpir el suministro en menos de 25 milisegundos, o sea mucho más rápido que un pestañeo.

4.14.4. Dispositivos para locaciones de alto riesgo (Hazardous Locations)

Si bien es cierto, una pequeña chispa eléctrica puede ser algo bastante común sin ser la causante de un incendio en la mayoría de las aplicaciones. Como ejemplo, muchos de nuestros circuitos de iluminación tienen características inductivas, con lo cual al accionar el interruptor que enciende o apaga la luz, se genera dentro de él una pequeña chispa, lo cual es normal y controlado dentro del interruptor. Sin embargo de encontrarse en una locación de alto riesgo, como por ejemplo aquellas donde existen concentraciones suficientes de gases inflamables como para entrar en ignición, esta chispa puede ser la causante de una explosión.

NFPA 70, ha descrito estas locaciones y las ha clasificado en 6 grupos, que incluyen 3 clases y 2 divisiones por clase. En resumen son locaciones donde existen gases inflamables y/o combustibles, polvo, o alguna otra condición de alta explosión por chispa eléctrica. Los mismos elementos eléctricos que se usan en las locaciones normales, son requeridos en éstas locaciones de alto riesgo; se requieren paneles de distribución, conductores, interruptores, etc.; pero los mismos deben ser de tecnología normada y listada para este uso, y es referida como equipamiento eléctrico “a prueba de explosión” (explosionproof), los cuales han sido desarrollados siguiendo 2 criterios básicos; 1- que los equipos y dispositivos deben soportar explosiones internas de gases, vapores o mezclas inflamables o combustibles; y 2- que los equipos y dispositivos deben prevenir o impedir esta explosión interna, hacia los alrededores que están igualmente pueden estar inmersos en la atmosfera explosiva.

4.14.5. Otras tecnologías de protección eléctrica

En locaciones especializadas de acuerdo a su uso, se han desarrollado tecnologías de aplicaciones específicas, como ejemplo, las locaciones industriales con extensa cantidad de motores, deben ser diseñadas con Centros de Control de Motores, los cuales proveen control, coordinación y seguridad eléctrica y operativa de los mismos; los hospitales deben ser equipados con centros y equipos de distribución eléctrica especializados, referidos como “de aislamiento”, donde por ejemplo una falla dada en un quirófano durante una

operación no sea la causante de la desconexión eléctrica del quirófano completo por este suceso, convirtiéndose en una operación automática contraproducente; sino que la falla queda aislada del sistema eléctrico por el panel de aislamiento, y luego de terminada la operación puede ser verificada; las plantas químicas tienen requerimientos similares a las locaciones de alto riesgo pero con incluyendo gases, líquidos y sólidos; teatros, cines, lugares de asamblea, deben ser diseñados e instalados siguiendo requerimientos especiales de seguridad eléctrica contra incendios, debido a la alta densidad de gente que manejan; y de igual manera otras aplicaciones específicas, tienen actualmente tecnologías eléctricas especializadas en continuo desarrollo para su aplicación.

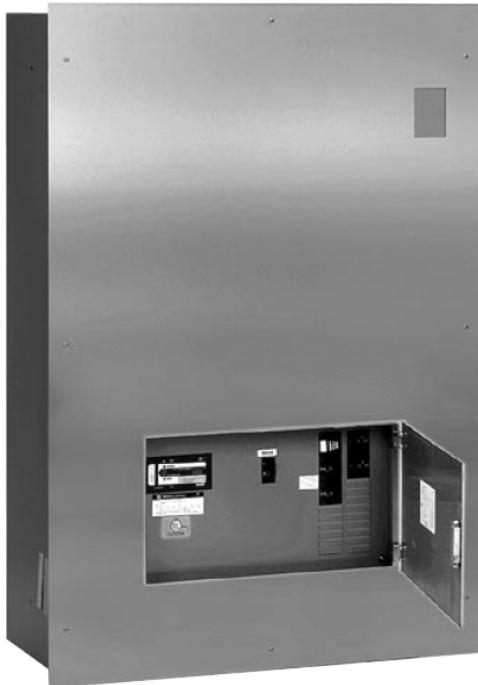


Imagen 4.14.5.1. Se muestran un panel aislado trifásico fabricado por Square D. *Fuente: Documento 4800CT9801 de Square D.*

4.15. Tecnologías de Transportación

Las tecnologías de transportación pueden ser consideradas como casos especiales de todas las tecnologías anteriormente expuestas. Desde el punto de vista de la transportación, se pueden subclasificar en:

- a. Transportación Vertical

b. Transportación Horizontal

En general la transportación vertical se da por medio de elevadores, escaleras eléctricas, y otros elementos que por lo general se encuentran dentro de locaciones estáticas, pero la transportación horizontal en general se da fuera de las locaciones o proyectos estáticos y se da por recorridos mucho más largos.

También dentro de la transportación podríamos subclasificar los sistemas de acuerdo al medio donde se muevan como:

- a. Terrestres: si van sobre el terreno.
- b. Acuáticos: si usan el agua como medio.
- c. Aéreos: si vuelan.
- d. Espaciales: si viajan en el espacio exterior.

Independientemente del tipo de clasificación, los sistemas de transporte en general utilizan alguna fuente de energía; ya sea combustible, eléctrica, química, solar, etc.; y en muchos de los casos esta fuente tiene suficiente generación de calor para convertirse también en fuente de incendios. Las aplicaciones vistas en los puntos anteriores han sido muchas adaptadas a locaciones móviles, como los sistemas de transporte, con ligeras variaciones, muchas aún están siendo adaptadas, y algunas de ellas incluso han sido aplicadas primero a sistemas de transporte antes que a sistemas fijos; ejemplo de éste último caso es el sistema de Water Mist, que fue aplicado primero a buques de navegación antes que a proyectos estáticos en tierra.

El desarrollo de tecnologías contra incendio está incluyendo poco a poco todos aquellos aspectos en los cuales la vida humana corre un peligro por causa de un posible incendio.

4.16 Bibliografía Relacionada del Capítulo IV

Fire Protection Handbook 20 edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.

Knowlton, Archer E. (1957). Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw – Hill & Kogakusha Company LTD, Tokyo Japan, New York, Toronto, London; 2230 pp.

Manual de Protección Contra Incendios, 17va edición, National Fire Protection Association, MAPFRE, España, 1991.

NFPA 12: Normas para Sistemas de extinción con Dióxido de Carbono, National Fire Protection Association, Quincy, MA., 2008.

NFPA 13: Normas para Instalacion de Sistemas de Rociadores Automáticos Contra Incendios, National Fire Protection Association, Quincy, MA., 2007.

NFPA 14: Normas para Sistemas de Mangueras y Stand Pipes, National Fire Protection Association, Quincy, MA., 2007.

NFPA 15: Normas para sistemas de protección contra incendio tipo “Water Spray” (Para equipos especiales), National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007.

NFPA 16: Norma para la instalación de sistemas de rocío con agua de espuma. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007

NFPA 30: Líquidos Inflamables y Combustibles., National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

NFPA 70: National Electrical Code. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

NFPA 70B: Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 70E: Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2009.

NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007.

NFPA 101: Código de Seguridad Humana. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2009.

NFPA 110: Standard for Emergency and Standby Power Systems. , National Fire Protection Association, Quincy, MA 2005.

NFPA 111: Standard on Stored Electrical Energy Emergency and Standby Power Systems, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2005.

NFPA 220: Standard on Types of Building Construction. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 221: Standard for Fire Walls and Fire Barrier Walls, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 231: Standard for General Storage, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 1998.

NFPA-921: Guide for Fire and Explosion Investigations , National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.

NFPA 2001: Normas para Sistemas de Extinción de Incendios por medio de Agentes Limpios. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002.

Stein, Benjamín; Reinolds, John (1992). Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, John Wiley & Sons, U.S.A., 1627 pp.

UNE 20.460-5-523:2004. “Instalaciones Eléctricas en Edificios. Parte 5: Selección e instalación de los materiales eléctricos. Sección 523: Intensidades admisibles en sistemas de conducción de cables”. Normas UNE del REBT., AMV Ediciones – C/Almansa, 94-28040, 2004, Madrid.



CAPÍTULO V

Fundamento Teórico de un Modelo de Generación de Incendio de tipo Termo-Conductivo (Bases Físico-matemáticas comprobadas basadas en Modelos Anteriores)

EN ESTE CAPÍTULO:

- 5.1. Bases técnicas de un modelo termo-conductivo
- 5.2. Modelos matemáticos actuales que soportan el modelo termo-conductivo
 - 5.2.1. Modelos de Ignición
 - 5.2.1.1. Ignición de Mezclas Inflamables de Aire/Vapor
 - 5.2.1.2. Ignición de Líquidos
 - 5.2.1.2.1. Clasificación de Líquidos Inflamables y Líquidos Combustibles
 - 5.2.1.2.1.1. Clasificación según la NFPA
 - 5.2.1.2.1.2. Clasificación según la norma Británica
 - 5.2.1.3. Ignición de Sólidos
 - 5.2.1.3.1. La ecuación general de difusión de calor
- 5.3. Bibliografía Relacionada del Capítulo V

CAPITULO V

Fundamento Teórico de un Modelo de Generación de Incendio de tipo Termo-Conductivo (Bases Físico-matemáticas comprobadas basadas en Modelos Anteriores)

5.1. Bases técnicas de un modelo termo-conductivo.

Como ya ha sido expuesto en el capítulo III de esta obra, un material puede llegar a la combustión de múltiples maneras, pero siempre han de requerirse 3 elementos básicos para la ignición, la cual puede ser ignición propiamente dicha o encendido del mismo (nótese la diferencia en que uno se refiere a auto creación del estado de combustión y el otro a la creación del mismo por parte de llamas, según lo planteado en el capítulo III). Estos 3 elementos son el material combustible, el oxígeno y una fuente de calor, lo que forma el triángulo del fuego; y aún un cuarto elemento, la reacción en cadena, permitirá la sustentabilidad del incendio. (Ver capítulo III).

El material combustible puede ser casi cualquier material con carbono u otro elemento reaccionante con un agente oxidante y las condiciones necesarias para una reacción de combustión, que no es nada más que una reacción química oxidante.

Para llegar a esta reacción de combustión, o más precisamente para llegar a su comienzo, la ignición del material combustible, se requieren condiciones adecuadas, las cuales son una temperatura mínima a la cual el material comienza a reaccionar combustionándose, la cual es llamada “temperatura de ignición”, una composición química y una formación física que permitan al material continuar con la combustión (suficiente carbono u otras composiciones adecuadas que sean reaccionantes con oxígeno, y espesores delgados u otras configuraciones físicas que permitan al calor viajar rápidamente a través del material son ejemplos condiciones propicias para mantener la combustión).

Dependiendo de estos y otros elementos aleatorios, como corrientes de aire, variaciones de presión en el medio circundante, variaciones en la composición química del material por causas de la temperatura o en su morfología física, etc.; se verá si el material ignitado es capaz de mantener el fuego. Una propiedad muy ligada a la posibilidad de mantener el fuego en los materiales es el “calor de combustión”, que visto de forma simple, es el calor liberado por la combustión separada de un material, mientras más alto es este calor, más calor tendrá también el material para retroalimentar su combustión. En ingeniería de

protección de incendios no es muy típico hablar del calor de combustión generado por la combustión unipolar de un solo material, sino mas bien de la rata de liberación de calor (HRR), liberado por incendios que incluyen cierta clase de materiales (aunque sean distintos pero varios bajo una misma clase) que se encuentran clasificados en niveles de riesgos.

Como nuestro objetivo no es realmente analizar los materiales combustibles, sino mas bien un determinado grupo de los causantes o “fuentes del incendio”, no profundizaremos en este momento en análisis técnicos y científicos de la forma e implicaciones químicas y físicas de cómo combustionan éstos materiales, pues son desgloses que no nos acercarán más a la respuesta que queremos deducir, pero es necesario tener un entendimiento temático adecuado de las bases de la combustión para poder establecer los criterios bajo los cuales se desglosarán las ecuaciones de comportamiento que conformarán el modelo de una fuente de calor que pueda ser la causante de la ignición de un combustible, y que obtenga su energía de una corriente eléctrica.

Aunque el modelo buscado por este trabajo es hasta ahora inexistente, y las aproximaciones para cálculos son poco precisas, el soporte técnico del mismo como se verá en adelante esta basado en muchos modelos físicos ya demostrados que pueden implementarse para conseguir un modelo de una fuente generadora de calor por causas de la conducción eléctrica a lo largo de un material que presente algún nivel de resistencia por poco que sea.

5.2. Modelos matemáticos actuales que soportan el modelo termo-conductivo.

En esta ocasión presentaremos análisis de teorías y modelos que han sido desarrollados y aceptados como válidos y que sirven como referencias y dan soporte al nuevo modelo presentado. Entre estos se incluyen modelos de *temperatura de ignición*, *ignición en gases*, *ignición en líquidos*, *ignición en sólidos*, *transferencia de calor* y *autoignición*, temas que serán presentados y aplicados de forma concisa, pero con la rigurosidad matemática y física adecuada, en las siguientes páginas.

5.2.1. Modelos de Ignición.

La ignición puede ser definida como el proceso por medio del cual se da una combustión auto-sustentada, o sea que no se requiere de una llama externa para dar comienzo a la combustión de la sustancia que se ignita. Según el investigador Douglas

Drysdale, se le puede dar una definición en base al sentido físico de lo que ocurre cuando se lleva a cabo una ignición, con lo que la define como el proceso por medio del cual se inicia una reacción exotérmica, cuando esta se propaga y causa que los materiales envueltos en la misma entren en cambios, produciendo altas temperaturas con respecto al ambiente.

Existen 2 tipos de ignición, y han sido definidas de acuerdo a como se originan. El primer tipo es la ignición pilotada, en la cual una mezcla de vapores inflamables con aire son inflamados (o encendidos) por medio de una “llama piloto” tal como una chispa eléctrica (el cual como ya se ha mencionado antes en esta obra es el caso mas estudiado hasta la actualidad). El segundo tipo es la ignición espontánea, en la cual la llama se desarrolla espontáneamente, como si fuese “de la nada”, sin la mezcla inflamable ni la llama piloto.

La combustión espontánea tiene en si múltiples modalidades y condiciones por las cuales puede ser originada, el ejemplo mas común de este tipo de combustión son los líquidos inflamables que tienen puntos de ignición por debajo de la temperatura ambiente en la que se encuentran, pero por lo general para todos los otros materiales que pueden ser combustibles ya sea líquidos o sólidos, algún calor externo es requerido para llegar a la combustión y de hecho al punto de ignición de los mismos. De hecho hay un fenómeno en el que bultos sólidos se ignitan luego de ser almacenados en algún lugar incluso luego de tiempo de estar allí, sin aparente fuente de calor; sin embargo los investigadores han descubierto que estos materiales pueden almacenar suficiente calor y han desarrollado modelos por medio del cual se relacionan densidades de masas de acuerdo al tipo de material, y de acuerdo a la distribución en la que son almacenados, viéndose que en ciertas condiciones la misma materia puede funcionar como fuente generadora de calor internamente, hasta llegar al punto de ignición. Por ello es tan importante la distribución de los almacenamientos en las grandes galeras, que se haga tomando en cuenta la mayor cantidad posible de estos parámetros.

Existen en la actualidad muchos modelos de ignición, algunos muy precisos, otros con ciertos niveles de tolerancia de error. Dependiendo del tipo de combustible que se ignita también se han tomado parámetros y características representativas y se han desestimado otras por ser poco relevantes y lograr de esa forma la simplificación de estos modelos, sin embargo aún tomando estas consideraciones, muchos de ellos no tienen soluciones completas, sino solamente parciales o soluciones en ciertos rangos de operación de sus variables.

No es nuestro objetivo objetar ninguno de estos modelos existentes, sino mas bien como ya se ha estipulado presentar un modelo basado en la fuente del calor, que sea por parte de un elemento a través del cual corre la energía eléctrica, de tal forma que cualquiera de estos modelos de ignición pueda en casos eléctricos-térmicos utilizar la salida de calor del modelo de la fuente que presentaremos, como entrada para determinar la ignición dependiendo de sus aplicaciones (rangos de temperatura, tipos de material, fases de estado del material, etc.).

A continuación se presentan algunos de estos modelos a utilizar, en la predicción de la ignición de materiales.

5.2.1.1. Ignición de Mezclas Inflamables de Aire/Vapor.

La reacción entre vapores inflamables y el aire depende de 2 condiciones físicas principales (sin desmeritar ninguno de los elementos dados por el tetraedro del fuego), la primera que exista la concentración necesaria del vapor combustible para que se de la ignición y luego que el HRR (rata de liberación de calor) sea la suficiente para que se mantenga la reacción en cadena.

La rata del proceso de oxidación obedece un modelo de dependencia de temperatura que concuerda con la ecuación de Arrhenius, la cual puede ser escrita como sigue:

$$k' = A \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (\text{e.5.2.1.1.1.})$$

donde k' es el coeficiente de Arrhenius para describir la rata de desarrollo de un proceso;

E_A es la energía de activación expresada usualmente en J/mol;

R es la constante universal del los gases, $8.314 \frac{J}{K \cdot mol}$;

T es la temperatura expresada usualmente en grados Kelvin.;

A Factor pre-exponencial, en este caso con unidades de s^{-1} .

El factor pre-exponencial depende en general de características muy propias para ajustar el modelo a cada proceso, y las energías de activación son derivadas en general de forma experimental para cada material, muchas de ellas se han estipulado en estudios e

investigaciones que tienen ya bastante tiempo (Madorsky, 1964; Williams, 1974; Williams, 1982; etc.).

Por su parte la rata de liberación de calor en un vapor inflamable incipientemente puede ser expresada en función de la rata de oxidación cuando este se quema:

$$\dot{Q}_c = \Delta H_c \cdot V \cdot C_i^n \cdot k' \quad (\text{e.5.2.1.1.2.a.})$$

Donde n, C_i dictamina la concentración en mole/m³.

ΔH_c es el calor de combustión en kJ/mole.

Incluyendo la ecuación e.5.2.1.1.1. en e.5.2.1.1.2.a., obtenemos una ecuación que puede ser utilizada para modelar la rata de liberación de calor para un pequeño volumen de vapor inflamable:

$$\dot{Q}_c = \Delta H_c \cdot V \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (\text{e.5.2.1.1.2.b.})$$

Aquí es importante recalcar que la ecuación anterior dictamina que siempre que exista una concentración de vapor inflamable por pequeña que sea, y ocurra oxidación (lo que es natural bajo casi cualquier condición incluyendo temperatura ambiente), va a existir una rata de liberación de calor, por lo cual es prácticamente imposible que $\dot{Q}_c = 0$. Siempre va a existir una pequeña rata de liberación de calor, que se traduce en un incremento de temperatura también imperceptible, ya que el calor liberado se pierde radialmente hacia los alrededores, perdiendo concentración de forma exponencial con el alejamiento de la fuente de calor.

También es importante destacar que la forma como se libera el calor, no es la misma a como se pierde o transmite éste en los alrededores, de tal forma que el calor bien puede ser liberado en una mayor cantidad de lo que puede ser transmitido a los alrededores causando de esta forma una concentración de calor en las fronteras de la fuente incrementando de esa forma la temperatura, o puede ser que el medio tenga también una mayor capacidad de transmitir calor hacia los alrededores de lo que la fuente puede liberar, con lo que se evitan las concentraciones de calor en los alrededores de la fuente.

La forma mas simple de expresar la rata de calor perdida (la que es transmitida hacia los alrededores) es considerar que el medio es isotrópico o con características constantes a lo largo y ancho de todo su volumen, con lo cual se puede asumir que la

función de la rata de calor perdida es prácticamente lineal y directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el volumen de reacción y los alrededores. De acuerdo a esto la rata de pérdida de calor puede ser expresada de forma simple como:

$$\dot{L} = h \cdot S \cdot \Delta T \quad (\text{e.5.2.1.1.3.})$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor del medio,

S es el área superficial del volumen de reacción a través de la cual el calor es perdido.

ΔT es la diferencia térmica entre la superficie del volumen de reacción y el medio donde se da la pérdida de calor.

En la imagen 5.2.1.1.1. se han presentado comportamientos típicos de la rata de liberación de calor del volumen de reacción, y rata de pérdida de calor linealizada en el medio.

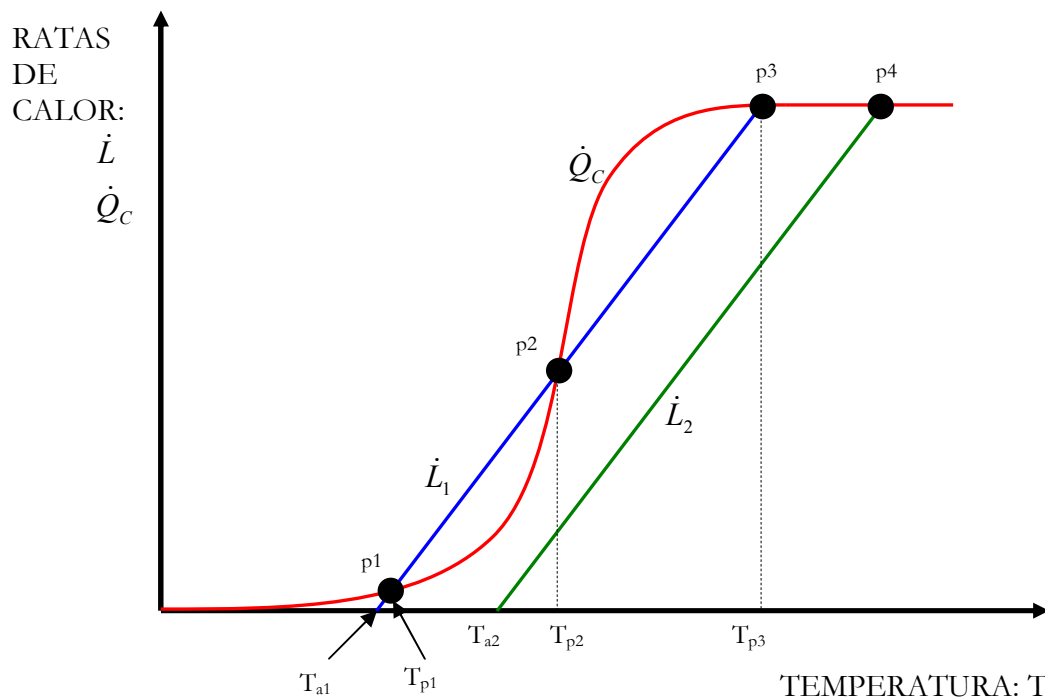


Imagen 5.2.1.1.1. Se han dibujado los comportamientos esquemáticos de la Rata de Liberación de Calor de un volumen de reacción, junto con la Rata de Pérdida de Calor hacia el medio que rodea el volumen de reacción, donde se ven 2 condiciones ambientales para L_1 y L_2 .

En la figura anterior se ven dos condiciones de temperatura ambiental T_{a1} y T_{a2} , donde también se han presentado las Ratas de Pérdida de Calor \dot{L}_1 y \dot{L}_2 , de cada una de las condiciones ambientales presentadas. La Rata de Liberación de Calor \dot{Q}_C es única y sus características dependen de la mezcla aire/vapor inflamable que se ignite. La

condición ambiental 1 representa una condición de temperatura baja con insuficiente capacidad calórica o temperatura circundante para iniciar por si sola la ignición de la mezcla de gases. La condición ambiental 2 representa una condición ambiental con una temperatura lo suficientemente elevada para iniciar por si sola la ignición de la mezcla de gases.

Para evaluar la condición ambiental 1 presentada por la imagen; en el punto p1, se puede escribir en base a la ecuación e.5.2.1.1.3., que:

$$\dot{L}_1 = h \cdot S \cdot \Delta T \quad (\text{e.5.2.1.1.3.1.})$$

y en la intersección dada por el punto p1, $\dot{Q}_c = \dot{L}_1$; lo cual representa un equilibrio entre el calor liberado por el volumen de reacción y el calor perdido hacia el ambiente. Se puede apreciar también que en este primer punto:

$$\Delta T = T_{p1} - T_{a1} \quad (\text{e.5.2.1.1.3.2.})$$

La anterior ecuación representa una diferencia térmica en equilibrio que es casi imperceptible. En la imagen 5.2.1.1.1. ha sido incrementada para que sea apreciable la misma.

Cualquier perturbación pequeña en este punto puede ser rápidamente estabilizada, ya que el sistema se encuentra en un punto estable de equilibrio. Nótese que cualquier incremento en la rata de liberación de calor (\dot{Q}_c) en el punto p1, tenderá a mover el mismo hacia la derecha del gráfico, sin embargo puede verse también que la capacidad del medio para deshacerse de este calor (rata de pérdida de calor \dot{L}_1), es mayor que la rata de liberación de calor del volumen de reacción desde p1 hasta p2, con lo cual un incremento en la liberación de calor del volumen de reacción (que mueve el punto hacia la derecha a través de \dot{Q}_c), será rápidamente disipado (ya que \dot{L}_1 es mayor entre p1 y p2).

Si la rata de liberación de calor \dot{Q}_c , crece lo suficiente para llevar el sistema al punto p2, llegaremos al límite de la zona de equilibrio, pues p2 no es un punto estable.

Analicemos un poco este nuevo punto, aunque en p2, $\dot{Q}_c = \dot{L}_1$, igual que como ocurre en p1; fijémonos que si el sistema está en p2 y la temperatura se reduce un poco (o \dot{Q}_c se reduce aunque sea infinitesimalmente), inmediatamente $\dot{Q}_c < \dot{L}_1$, y el sistema tenderá a enfriarse porque la pérdida de calor hacia el medio es mayor que la liberación del mismo

por parte del volumen de reacción, con lo que tenderá a buscar el punto de equilibrio p_1 , ya que entrará al rango p_1 - p_2 , y se aplicará lo explicado en las líneas de párrafos anteriores con respecto a p_1 .

En el otro caso, si la temperatura se incrementa un poco, o \dot{Q}_c crece aunque sea infinitesimalmente partiendo de p_2 , entonces $\dot{Q}_c > \dot{L}_1$. Aquí el medio no tiene la capacidad de evacuar la cantidad de calor que se esta liberando por el volumen de reacción, con lo que se da una acumulación de calor en las fronteras del sistema, incrementando la temperatura, y en la mayoría de los casos el sistema tiende a buscar rápidamente un nuevo punto de equilibrio el cual hemos señalado como p_3 , al que se llega cuando el medio ambiente se calienta hasta el mismo punto de las fronteras del volumen de reacción.

Este nuevo punto corresponde a un punto estable de alta temperatura de reacción de combustión, el cual se puede propagar como una llama premezclada. Se puede ver que bajo la condición ambiental 1 es necesario agregar calor o incrementar la temperatura para llevar el sistema de la condición de estabilidad p_1 a la condición de inestabilidad p_2 y de allí a su ignición en p_3 .

La temperatura del punto p_3 , nombrada como T_{p_3} es la mínima temperatura a la cual el combustible entra en ignición, sin embargo no hay un límite para una máxima temperatura de combustión y ello solo dependerá de las condiciones ambientales existentes, por causa de la posibilidad de acumulación de calor.

Es fácil pensar que si la temperatura del ambiente es menor que la temperatura mínima de ignición del combustible, la ignición no se llegará a dar; sin embargo esto no es cierto.

Analicemos ahora la condición ambiental 2, donde podemos ver que T_{a_2} tiene un valor que es inferior al valor de la temperatura de ignición T_{p_3} , sin embargo es fácil ver del gráfico que en el punto T_{a_2} , $\dot{Q}_c > \dot{L}_2$; con lo que sucede exactamente lo mismo que ocurre en el caso del análisis anterior cuando se incrementa la temperatura o el calor a partir del punto p_2 ; y el sistema tiende a buscar un nuevo punto de equilibrio a una temperatura superior. En este caso, por la forma de \dot{Q}_c , no habrán mas intercepciones de equilibrio que el punto p_4 , con lo que se ve que aunque esta temperatura ambiental es menor que la temperatura mínima de ignición, por el simple hecho de que el medio no tiene la capacidad de evacuar la cantidad de calor que puede liberar el volumen de reacción ($\dot{Q}_c > \dot{L}_2$), el medio comenzará a elevar su temperatura y al mismo tiempo \dot{Q}_c comenzará a incrementarse,

llegando directamente hasta la ignición en el punto p4. De forma simple, la acumulación de calor es la principal causante de las igniciones espontáneas, sin embargo la teoría de las mismas cuando se trata de combustibles sólidos, incluye análisis mucho más detallados y con muchas más variables que el realizado en ésta literatura.

Es importante aclarar también que el modelo dado es un modelo de ignición debido a incrementos térmicos puros con variaciones no abruptas (cuasiestático). Si bien es cierto la imagen 5.2.1.1.1. es cualitativa, es correspondiente a la mayoría de los casos con mezcla de vapores/aire combustibles, excepto cuando la energía de ignición viene dada por parte de una fuente distinta al calor puro o incremento térmico paulatino. Entonces se utiliza el concepto de energía mínima de ignición, y es cuando la fuente de energía es similar a una chispa eléctrica o una llama. En el caso de una descarga eléctrica, la misma genera transientes de plasma ricos en átomos, iones, cargas y radicales libres. En estos casos la energía de ignición mínima es la que es disipada por la chispa mas pequeña capaz de ignitar una mezcla estequiométrica (en el orden de fracciones de mJ), energía que es capaz de elevar la temperatura de un volumen esférico de un diámetro igual al requerido en el medio para que se extinga el arco (quenching distance), que usualmente es de unos 2 mm, a tan solo unas decenas de grados; pero transmite directamente energía de reacción que induce el proceso químico combustionante, por causa de los radicales libres. Las energías mínimas de ignición varían según los gases y sus concentraciones; muchos investigadores las han tabulado creando bases de datos de esta información. Mientras mas inflamable es el gas menos energía mínima de ignición requerirá; las pruebas de flamabilidad se realizan por medio de un aparato llamado aparato del Bureau de Minas para flamabilidad de los gases; el cual mide la flamabilidad por medio de la distancia de propagación de la llama de un gas ignitado dentro de un tubo especialmente calibrado para esta labor. Zabetakis 1965, tiene hasta hoy la recopilación más consultada de flamabilidad de gases y vapores.

Las temperaturas mínimas de ignición de mezclas combustibles también han sido tabuladas, sobre todo para mezclas estequiométricas, por organizaciones como la National Fire Protection Association en 1981 y British Standards Institute en 1977. Los investigadores han concentrado esfuerzos en determinar también condiciones bajo las cuales pueda ser medido el tiempo que demoran las mezclas en ignitar desde que las condiciones de ignición son conseguidas hasta que se da la misma ignición (o sea hasta que se enciende). A temperaturas cercanas a la temperatura de autoignición y para volúmenes

de unos 0.2 litros o mas en recipientes esféricos, la mezcla es aproximadamente estática, y se ha encontrado que el tiempo de ignición es del orden de 1s o mas.

La existencia de una temperatura de ignición crítica para mezclas inflamables lleva al desarrollo de la teoría de explosiones térmicas, por Semenov, basada en las ecuaciones (e.5.2.1.1.2.b.) y (e.5.2.1.1.3.).

Semenov asumía que la temperatura dentro de todo el volumen de gas de reacción era constante y uniforme y por lo tanto la pérdida de calor del volumen podía ser descrita apropiadamente utilizando la ecuación (e.5.2.1.1.2.b.)

Se puede complementar esto conociendo que la rata de descomposición debe seguir un patrón como el de Arrhenius. La estabilidad térmica puede ser cuantificada determinando como esta rata de descomposición varía con la temperatura, como se da con el proceso de pirolisis en el cual:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = -k' \cdot m \quad (\text{e.5.2.1.1.4.})$$

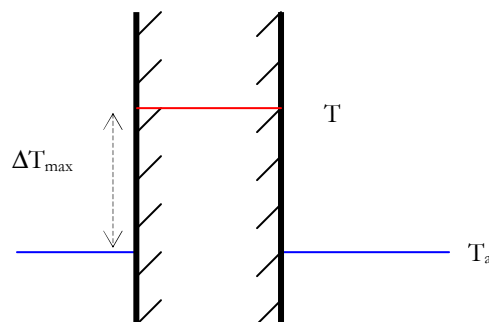


Imagen 5.2.1.1.2. Se representa el perfil de temperatura entre el volumen reaccionante y el medio, propuesto por Semenov en su modelo.

Semenov en su modelo también asumió que el consumo de los reactivos era despreciable y la rata de liberación de calor en base a la dependencia de la temperatura según Arrhenius en la ecuación (e.5.2.1.1.2.b.) puede ser vista gráficamente en la imagen 5.2.1.1.3., bajo esta consideración de Semenov, junto con la rata de perdida de calor a tres condiciones de temperatura ambiente distintas.

En la imagen 5.2.1.1.3. se puede ver que existe una temperatura ambiente crítica, en la cual la curva de la rata de perdida de calor \dot{L}_1 intersecta tangencialmente la curva de liberación de calor \dot{Q}_c . La temperatura ambiente que inicia esta curva \dot{L}_1 es llamada

temperatura ambiente crítica $T_1 = T_{a,cr}$ y es la máxima temperatura ambiente a la cual puede estar la mezcla reaccionante para que no ocurra una autoignición.

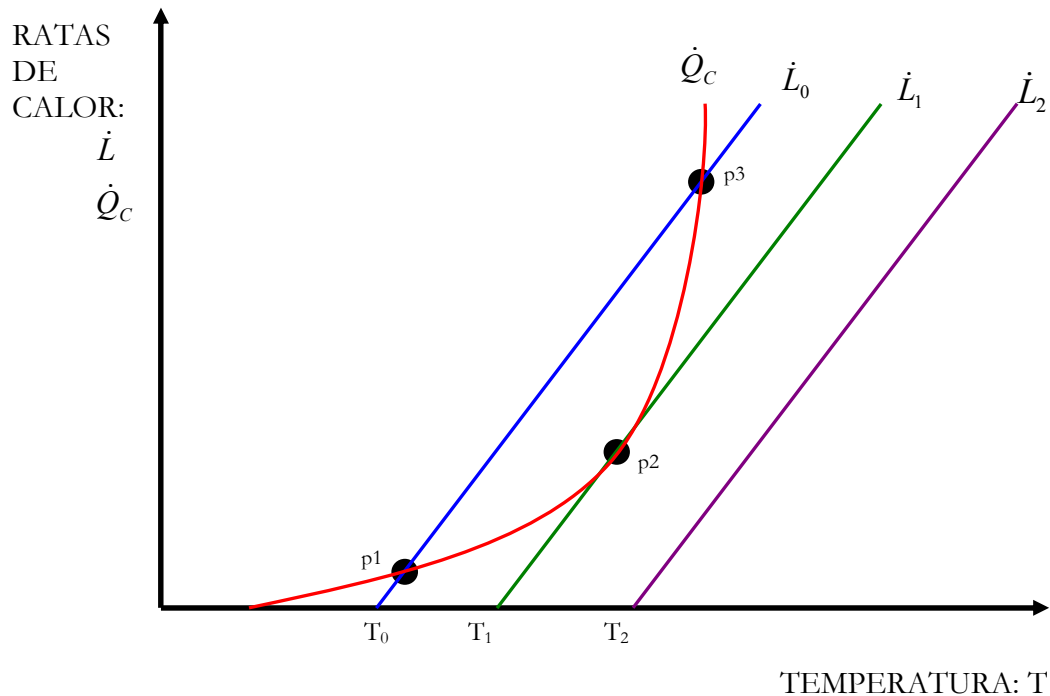


Imagen 5.2.1.1.3. Representación gráfica del modelo de Semenov aplicable a ignición espontánea.

Si la temperatura ambiente es mayor que T_1 como se ve para el caso de T_2 la autoignición ocurrirá irremediablemente tal como se ve en el punto p4 de la gráfica 5.2.1.1.1., que será alcanzado luego de algún tiempo en esta condición. Si la temperatura es menor a T_1 , como se ve en la curva T_0 de la imagen 5.2.1.1.3, el material podrá pasar por el punto p1 el cual es un punto de equilibrio, y cualquier perturbación que trate de sacarlo aumentando la temperatura lo pondrá en un punto donde la capacidad del ambiente de difuminar calor es mayor que la tasa de liberación de calor del material, con lo que retornará al punto p1 de equilibrio; y cualquier perturbación que trate de sacarlo bajando la temperatura, lo pondrá en un punto donde la capacidad del ambiente de difuminar calor es menor que la tasa de liberación de calor del material, con lo que retornará igualmente al punto p1 de equilibrio.

Nótese que en el gráfico 5.2.1.1.3. el punto p2 no representa equilibrio total, pues de superar esta temperatura se entrará en la zona de desequilibrio en la que el sistema tenderá a equilibrarse sólo en el punto de combustión. De hecho la temperatura del punto

p2 es superior a la temperatura crítica del ambiente, pero de llegarse a ella, el sistema puede mantenerse en el punto p2 considerando estrictamente que no existirán perturbaciones.

El análisis de este punto crítico p2 de la imagen 5.2.1.1.3. implica que es un punto tangencial único en el cual:

$$\dot{Q}_c = \dot{L} \quad (\text{e.5.2.1.1.5.})$$

y al mismo tiempo, este es el único punto donde se cumple que:

$$\frac{d\dot{Q}_c}{dT} = \frac{d\dot{L}}{dT} \quad (\text{e.5.2.1.1.6.})$$

ya que las pendientes de ambas curvas son iguales. Si expresamos la ecuación (e.5.2.1.1.5.), en función de las definiciones ya presentadas acerca de cada curva:

$$\Delta H_c \cdot V \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) = h \cdot S \cdot (T - T_{a,cr}) \quad (\text{e.5.2.1.1.7.})$$

y derivando la expresión según la ecuación (e.5.2.1.1.6.):

$$\frac{E_A}{RT^2} \Delta H_c \cdot V \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) = h \cdot S \quad (\text{e.5.2.1.1.8.})$$

Como el punto p2 es válido para ambas curvas interceptadas, todas las ecuaciones son válidas haciendo un juego de ecuaciones en el cual se pueden reducir (e.5.2.1.1.7.) y (e.5.2.1.1.8.). Dividiendo la primera entre la segunda obtenemos:

$$\frac{RT^2}{E_A} = (T - T_{a,cr}) \quad (\text{e.5.2.1.1.9.})$$

donde $T_{a,cr}$ corresponde a la temperatura crítica del ambiente que estamos buscando, y T corresponde a la temperatura en el punto p2 de la imagen 5.2.1.1.3, el cual es el último punto de equilibrio del volumen de reacción (el vapor combustible), sin llegar a la ignición.

El análisis específico de cada sistema tendrá una curva propia que dependerá de la energía de activación E_A de cada sistema, y tendrá soluciones relacionadas para $T_{a,cr}$ y T pues un valor será correspondiente al otro, dependiendo de las condiciones del sistema; estos pueden ser cercanos o lejanos entre si.

Matemáticamente se pueden encontrar soluciones precisas para la ecuación e.5.2.1.1.9. al ver que puede ser considerada una ecuación de segundo grado en función de la temperatura crítica T . La ecuación e.5.2.1.1.9. puede ser arreglada y presentada de la siguiente forma al multiplicarla toda por E_A / R :

$$T^2 - \frac{E_A}{R}T + T_{a,cr} = 0 \quad (\text{e.5.2.1.1.9.1})$$

y encontrando las raíces de e.5.2.1.1.9.1. por cualquier método de solución de ecuaciones cuadráticas llegamos a la ecuación de solución para la temperatura crítica T , en función de la temperatura ambiental $T_{a,cr}$:

$$T = \frac{1}{2} \left[\frac{E_A}{R} \pm \sqrt{\frac{E_A^2}{R^2} - 4 \frac{E_A T_{a,cr}}{R}} \right]; \text{ la cual puede ser desarrollada de la siguiente manera:}$$

$$T = \frac{1}{2} \left[\frac{E_A}{R} \pm \sqrt{\frac{E_A^2}{R^2} \left(1 - 4 \frac{RT_{a,cr}}{E_A} \right)} \right]$$

$$T = \frac{E_A}{2R} \pm \frac{E_A}{2R} \sqrt{1 - 4 \frac{RT_{a,cr}}{E_A}} \quad (\text{e.5.2.1.1.10})$$

La ecuación e.5.2.1.1.10 da como resultado 2 valores; uno de ellos será físicamente imposible de conseguir y consistirá en una temperatura muy alta o baja (dependiendo del rango de operación del sistema); el otro será el resultado mas preciso de la temperatura crítica que se puede obtener a partir del modelo de Semenov.

Algunos investigadores han preferido usar aproximaciones en series de potencias de la solución dada por la ecuación e.5.2.1.1.10, obteniendo el resultado físico posible como:

$$T = T_{a,cr} + \frac{RT_{a,cr}^2}{E_A} + \frac{R^2 T_{a,cr}^3}{E_A^2} + \frac{R^3 T_{a,cr}^4}{E_A^3} + \frac{R^4 T_{a,cr}^5}{E_A^4} + \frac{R^5 T_{a,cr}^6}{E_A^5} + \dots + \frac{R^n T_{a,cr}^{n+1}}{E_A^n} \quad (\text{e.5.2.1.1.11})$$

En la mayoría de los casos, los valores de la energía de activación E_A son grandes con lo que los términos hacia la derecha de la ecuación e.5.2.1.1.11, se van haciendo despreciables. Una gran parte de los investigadores plantean que con los dos primeros términos de la ecuación e.5.2.1.1.11 se logra una aproximación bastante buena, con lo que la ecuación de solución para estas condiciones puede ser aproximada a:

$$T = T_{a,cr} + \frac{RT_{a,cr}^2}{E_A} \quad (\text{e.5.2.1.1.12})$$

Si se retoma la ecuación e.5.2.1.1.9. y se compara con la e.5.2.1.1.12, se podrá ver que la diferencia térmica crítica dada por $(T - T_{a,cr})$ puede aproximarse:

$$\Delta T_{crit} = (T - T_{a,cr}) = \frac{RT^2}{E_A} \approx \frac{RT_{a,cr}^2}{E_A} \quad (\text{e.5.2.1.1.13})$$

La anterior ecuación es una aproximación muy conveniente desde el punto de vista de que para encontrar la temperatura crítica T se requiere de conocer la temperatura ambiente crítica $T_{a,cr}$, la cual en la mayoría de los casos también se mantiene como incógnita, por lo cual se maneja más el concepto de incremento crítico de temperatura ΔT_{crit} , en el cual se consideran aproximadamente las dos anteriores variables T y $T_{a,cr}$.

Se puede verificar también que según la ecuación e.5.2.1.1.13, el valor de T y $T_{a,cr}$ son usualmente bastante cercanos, lo que ha sido corroborado en muchos sistemas de forma experimental.

Douglas Drysdale (1985) plantea una solución numérica aproximada que puede ser provista cuando se considera que $E_A \gg RT$, donde también plantea que para valores típicos de $T_{a,cr} = 700^\circ K$ y $E_A = 200 \frac{kJ}{mol}$; se puede tener una primera aproximación de:

$$\Delta T_{crit} \approx 20^\circ K$$

El valor anterior es solamente un valor aproximado de un máximo incremento de temperatura en el sistema admisible bajo las condiciones presentadas por Drysdale, las condiciones específicas de cada sistema variarán este incremento en alguna magnitud.

Hasta ahora en el modelo de Semenov, se ha considerado que el volumen de reacción mantiene una temperatura que puede ser considerada constante en todo el volumen. Esto es viable cuando se trata de pequeños volúmenes de reacción con funciones de calentamiento cuasi-estáticas con respecto al tiempo. En general muchos investigadores aprueban este modelo pues consideran que la ignición no se da en un volumen muy grande de reacción sino en uno pequeño, con lo que el modelo de Semenov es en general una aproximación bastante adecuada.

Sin embargo cuando tenemos un volumen de reacción mayor, o cuando simplemente tenemos un calentamiento que no puede ser considerado cuasiestático, se generan gradientes térmicos importantes dentro del volumen de reacción, con lo que el modelo de Semenov se aleja un poco de la realidad al ignorar estas diferencias térmicas dentro del volumen de reacción. El modelo de Semenov puede ser utilizado en general cuando se tienen sistemas con “capacidades térmicas amontonadas” con lo que naturalmente se convierte en un modelo del tipo amontonamiento de masas (ver sección 3.2.1.2.1.1.).

Físicamente el modelo de Semenov es aplicable a aquellos sistemas que tienen un bajo número de Biot, el cual es un número adimensional utilizado en transferencia de calor en sistemas de estado transitorio (no estado estable), que da un índice del radio de resistencia a la transferencia dentro del cuerpo con respecto a la superficie del cuerpo. Con este número se determina sistemáticamente si la temperatura dentro del cuerpo variará o no de forma significativa con respecto al espacio que ocupa cuando el cuerpo se calienta o se enfría en procesos transitorios.

Números de Biot inferiores mucho menores a 1 dan como resultado sistemas con temperaturas bastante constantes, mientras que aquellos mucho mayores a 1 dan como resultado gradientes térmicos bien marcados en todo el volumen del cuerpo. Aquellos que son cercanos a 1 podrían o no modelarse como constantes dependiendo de la cantidad de precisión que se requiera en las respuestas y otras características del sistema como las diferencias térmicas dentro y fuera, y el volumen.

El número de Biot está definido formalmente como:

$$Bi = \frac{h \cdot L_C}{k_b} \quad (\text{e.5.2.1.1.14})$$

donde: h , es el coeficiente de película, o coeficiente de transferencia de calor, o coeficiente convectivo de calor, dependiendo del sistema.

k_b , es la conductividad térmica del cuerpo.

L_C , es la longitud característica, la cual esta definida formalmente como el volumen del cuerpo (V_{cuerpo}) entre el área de su superficie ($A_{\text{superficie}}$); expresado matemáticamente:

$$L_C = \frac{V_{\text{cuerpo}}}{A_{\text{superficie}}} \quad (\text{e.5.2.1.1.15})$$

De las dos ecuaciones anteriores se puede ver que mientras mayor es el coeficiente de transferencia h hacia el medio ambiente, mayor es el número de Biot y es fácil imaginar que la superficie al perder calor rápidamente hacia los alrededores se enfriará creando un gradiente térmico más perceptible. Igualmente mientras mayor es el volumen del cuerpo mayor va a ser el factor L_C , incrementando el número de Biot con lo que mayor será el gradiente térmico dentro del cuerpo.

Igualmente se puede apreciar que mientras mayor sea la conductividad térmica interna del cuerpo k_b , mayor acumulación de calor existirá en sus fronteras con lo que las temperaturas dentro del mismo tenderán a uniformarse pareciéndose mas a una constante y decrementando el número de Biot.. De igual forma puede analizarse con un poco mas de imaginación que la única forma de incrementar el área superficial sin incrementar el volumen es achatando el cuerpo en alguna manera, con lo que por efectos geométricos no es difícil observar que cualquier distribución en cuerpos achatados es mucho mas uniforme que en cuerpos redondos (que es el caso contrario cuando se desea obtener mayor volumen y menos área superficial).

En general cuando las capacidades de conducción de calor en las fronteras del cuerpo son inferiores a las capacidades de conducción dentro del cuerpo, se tendrá acumulación de calor interna, lo que propiciará una nivelación de las temperaturas desde adentro hacia las fronteras del cuerpo de una forma mas uniforme, y un bajo número de Biot. Por el contrario cuando las capacidades de conducción de calor en las fronteras del cuerpo sean mayores a las capacidades de conducción dentro del cuerpo; el calor podrá fluir libremente desde adentro hacia afuera del cuerpo (o viceversa), creando gradientes térmicos marcados entre el punto de mas alta generación interno de calor (o receptor), y la superficie; con lo que se obtiene un alto número de Biot.

Para situaciones en las que el número de Biot se vuelve grande, Frank-Kamenetskii (1939) desarrolló un modelo para números altos de Biot ($Bi > 10$), el cual se basa en el modelo de la ecuación general de transferencia de calor, la cual discutiremos un poco en páginas subsiguientes y presentamos preliminarmente aquí como:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.1.16})$$

donde:

k : es la conductividad térmica del material (en unidades métricas $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

\dot{q} : es la energía por unidad de tiempo generada por unidad de volumen ($\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{V}$)

α : es la difusividad térmica del material conformado por $\frac{k}{\rho C}$ donde ρ es la densidad y C es el calor específico.

∇ : Operador diferencial Nabla; para hacer diferenciaciones parciales en coordenadas vectoriales ortogonales; el cual obtiene definición matemática dependiendo del sistema de coordenadas ortogonales utilizado.

En coordenadas cartesianas: $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{u}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{u}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{u}_z$ (Operador diferencial vectorial)

(e.5.2.1.1.17)

$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ (Operador diferencial escalar llamado Laplaciano)

(e.5.2.1.1.18)

por lo tanto:

$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, en coordenadas cartesianas,

(e.5.2.1.1.19)

o tomará la configuración según el sistema de coordenadas a utilizar;

$\nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{1}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, en coordenadas cilíndricas

(e.5.2.1.1.20)

donde:

r : es el radio del cilindro

ϕ : es el ángulo de rotación sobre el eje del cilindro.

$\nabla^2 T = \frac{1}{R^2} \frac{1}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \text{sen} \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\text{sen} \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{R^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2}$, en coordenadas

esféricas

(e.5.2.1.1.21)

donde:

R : es el radio de la esfera

ϕ : es el ángulo de rotación horizontal sobre el eje vertical (matemáticamente es el mismo ángulo de rotación del cilindro).

θ : es el ángulo de rotación vertical partiendo del eje de rotación de ϕ .

$$\nabla^2 T = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\frac{1}{\partial u_1} \left(\frac{h_2 h_3}{h_1} \frac{\partial T}{\partial u_1} \right) + \frac{1}{\partial u_2} \left(\frac{h_3 h_1}{h_2} \frac{\partial T}{\partial u_2} \right) + \frac{1}{\partial u_3} \left(\frac{h_1 h_2}{h_3} \frac{\partial T}{\partial u_3} \right) \right], \quad \text{en coordenadas curvilíneas ortogonales generales} \quad (\text{e.5.2.1.1.22})$$

donde:

u_1, u_2, u_3 : son tres coordenadas curvilíneas ortogonales.

h_1, h_2, h_3 : son las funciones de escala del sistema de coordenadas, las cuales son funciones dependientes de las tres coordenadas curvilíneas.

Al incluir el desglose del factor Laplaciano en la ecuación e.5.2.1.1.16, podrá percibirse del nivel de complejidad de la misma en cualquiera de los casos o sistemas coordenados a utilizar. La solución de una ecuación de este tipo es muy difícil de conseguir, pero esta ecuación podrá ser simplificada bajo ciertas consideraciones de isotropía, isometría e igualdad de condiciones externas del volumen de reacción, a una ecuación unidimensional con calentamiento simétrico como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{K}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.1.23})$$

donde:

r es la dimensión única que se estudia;

K toma valores de 0 para una placa infinita (de espesor $2r_0$), 1 para un cilindro infinito (de radio r_0), y 2 para una esfera (de radio r_0).

Con las condiciones de esta simplificación, implícitamente se asume que la rata de reacción puede ser descrita por una expresión singular del tipo Arrhenius, como se estipula en la ecuación e.5.2.1.1.2.b.; se asume que no hay consumo significativo de reactivos con respecto del tiempo (como lo asumió también Semenov (1928)); se asume que las propiedades térmicas del sistema son constantes e independientes de la temperatura (algunos materiales cambian significativamente sus propiedades térmicas en ciertos rangos de temperatura, sobre todo rangos muy altos); y finalmente que el número de Biot es lo suficientemente grande para la conducción con gradientes térmicos dentro del volumen de reacción, para determinar la rata de pérdida de calor.

Las condiciones de frontera para resolver la ecuación e.5.2.1.1.23 son:

$$T_{r_0} = T_0 \quad \text{en } t \geq 0 \quad (\text{en la superficie})$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{en } r = 0 \quad (\text{en el centro})$$

La rata de flujo de calor en la superficie es: $k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0}$

Y si el volumen de reacción es capaz de alcanzar un estado estable, análogo a la intersección en el punto p1 de la imagen 5.2.1.1.3. o 5.2.1.1.1., la ecuación e.5.2.1.1.23 tendrá una solución cuando la variación de la temperatura en el tiempo es cero o sea cuando:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Para expresar este sistema de una forma más conveniente, introduciremos las siguientes variables de adimensionamiento a forma de cambio de variables:

$$\theta = \frac{(T - T_a)}{\frac{RT_a}{E_A}} \quad (\text{que tendrá unidades de temperatura, que luego serán convenientemente canceladas con la temperatura ambiente, la cual es fácil de tomar en casos prácticos}).$$

(e.5.2.1.1.24)

$$z = \frac{r}{r_0} \quad (\text{que no tendrá unidades})$$

(e.5.2.1.1.25)

reemplazando las variables presentadas en e.5.2.1.1.24 y e.5.2.1.1.25 dentro de la ecuación 5.2.1.1.23, nos queda:

$$\frac{\partial^2}{\partial (zr_0)^2} \left[\theta \frac{RT_a}{E_A} + T_a \right] + \frac{K}{zr_0} \frac{\partial}{\partial (zr_0)} \left[\theta \frac{RT_a}{E_A} + T_a \right] = -\frac{\dot{q}}{k}$$

(e.5.2.1.1.26)

desarrollando la ecuación anterior hasta obtener una nueva ecuación de la forma de e.5.2.1.1.23, pero con las nuevas variables;

$$\frac{RT_a}{E_A r_0^2} \frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{zr_0} \frac{RT_a}{E_A r_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{\dot{Q}}{V}$$

(e.5.2.1.1.27)

expresando la liberación de calor en función de la rata de oxidación con el coeficiente de Arrhenius según lo obtenido en la ecuación e.5.2.1.1.2.b.

$$\frac{RT_a}{E_A r_0^2} \frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{z r_0} \frac{RT_a}{E_A r_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} = - \frac{\Delta H_c \cdot V \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp \left[\frac{-E_A}{R \left(\theta \frac{RT_a}{E_A} + T_a \right)} \right]}{V \cdot k} \quad (\text{e.5.2.1.1.28})$$

por reducción de términos:

$$\frac{RT_a}{E_A r_0^2} \frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{z} \frac{RT_a}{E_A r_0^2} \frac{\partial \theta}{\partial z} = - \frac{\Delta H_c \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp \left[\frac{-E_A}{R \left(\theta \frac{RT_a}{E_A} + T_a \right)} \right]}{k} \quad (\text{e.5.2.1.1.29})$$

factorizando términos semejantes y agrupándolos de una forma conveniente para el sentido físico del modelo:

$$\frac{k}{r_0^2} \left(\frac{RT_a}{E_A} \right) \left\{ \frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{z} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} = - \Delta H_c \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp \left[\frac{-E_A}{R \left(\theta \frac{RT_a}{E_A} + T_a \right)} \right] \quad (\text{e.5.2.1.1.30})$$

La ecuación (e.5.2.1.1.30) contempla una ecuación diferencial entre las llaves, de la misma forma que (e.5.2.1.1.23), contemplando las condiciones de frontera ya señaladas, y es una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden, con derivadas de una función de temperatura θ que guarda relación estrecha con la diferencia térmica entre el volumen de reacción y el ambiente según la ecuación e.5.2.1.1.24 (que al igual que en el modelo de Semenov, en el caso crítico, es lo que se quiere encontrar también con éste modelo) con

respecto del término z , el cual es un número corriente totalmente adimensional (lo que nos ayuda a despreocuparnos de las variables dimensionales de unidades del mismo).

De la anterior ecuación puede verse también que el término dentro del exponencial es igualmente adimensional, facilitando en gran medida el trabajo dimensional para la consecución de las soluciones específicas de cada caso al cual sea aplicado este modelo con difusión de calor y distribuciones térmicas a lo largo del volumen de reacción.

Se puede facilitar aún más la ecuación (e.5.2.1.1.30) al trabajar un poco con el término dentro del exponencial de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{-E_A}{R\left(\theta \frac{RT_a}{E_A} + T_a\right)} &= \frac{-E_A}{\frac{\theta R^2 T_a}{E_A} + RT_a} = \frac{-E_A}{\frac{\theta R^2 T_a + E_A RT_a}{E_A}} = \frac{-E_A}{\frac{\theta R^2 T_a + E_A RT_a}{E_A}} \\ &= \frac{-E_A^2}{\theta R^2 T_a + E_A RT_a} = \frac{-E_A^2}{RT_a(R\theta + E_A)}; \end{aligned}$$

utilizando resolución expandida por medio de fracciones parciales se quiere que:

$$\frac{E_A^2}{RT_a(R\theta + E_A)} = \frac{a}{RT_a} + \frac{b}{R\theta + E_A} \quad (\text{e.5.2.1.1.31})$$

de donde se encuentran los valores de a y b , que puedan lograr la igualdad sugerida por e.5.2.1.1.31; los cuales son:

$$\begin{aligned} a &= E_A \\ b &= -\frac{E_A \theta}{T_a} \end{aligned}$$

los cuales reemplazados en (e.5.2.1.1.31) demuestran la igualdad de la siguiente forma:

$$E_A^2 = a(R\theta + E_A) + b(RT_a)$$

$$E_A^2 = E_A(R\theta + E_A) - \frac{E_A \theta}{T_a}(RT_a), \text{ lo cual demuestra la igualdad.}$$

De esta forma se puede hacer el reemplazo en el exponencial de e.5.2.1.1.30, con la siguiente ecuación:

$$\frac{-E_A^2}{RT_a(R\theta + E_A)} = -\left[\frac{E_A}{RT_a} - \frac{E_A\theta}{T_a(R\theta + E_A)} \right] \quad (\text{e.5.2.1.1.32})$$

la cual puede incluso ser reajustada reordenando y agrupando ciertos términos para simplicidad del modelo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{-E_A^2}{RT_a(R\theta + E_A)} &= -\left[\frac{E_A}{RT_a} - \frac{E_A\theta}{T_a(R\theta + E_A)} \right] = -\frac{E_A}{RT_a} + \frac{E_A\theta}{RT_a\theta + E_AT_a} \\ &= -\frac{E_A}{RT_a} + \frac{\theta}{\frac{RT_a\theta}{E_A} + \frac{E_AT_a}{E_A}} = -\frac{E_A}{RT_a} + \frac{\theta}{\frac{RT_a}{E_A}\theta + T_a} \end{aligned}$$

El término $\frac{RT_a}{E_A}$, ya lo hemos visto salir como un término emergente común en varias situaciones a lo largo de este desglose, siendo este término el denominador de θ , encuentra una posición perfectamente definida y despejada en e.5.2.1.1.30, como coeficiente general de toda la ecuación diferencial, y se repite en varias ocasiones quedando nuevamente en el denominador de la segunda fracción parcial del exponencial multiplicando a la función θ en la cual ha sido definido. Esto tiene un sentido físico muy interesante, pues se puede demostrar claramente que en el denominador de esta función solo quedará la temperatura del sistema de reacción T , cancelando las dimensiones de θ en el numerador, y estableciendo una razón de proporción entre θ y T .

Dando un símbolo específico al término adimensional:

$$\varepsilon = \frac{RT_a}{E_A} \quad (\text{e.5.2.1.1.33})$$

se puede escribir la ecuación (e.5.2.1.1.32) como:

$$\frac{-E_A^2}{RT_a(R\theta + E_A)} = -\frac{E_A}{RT_a} + \frac{\theta}{\varepsilon\theta + T_a} \quad (\text{e.5.2.1.1.34})$$

y

$$\varepsilon\theta = T - T_a \quad (\text{e.5.2.1.1.35})$$

con lo que se llega a la forma:

$$\frac{-E_A^2}{RT_a(R\theta + E_A)} = -\frac{E_A}{RT_a} + \frac{\theta}{T} \quad (\text{e.5.2.1.1.36})$$

Existe un inconveniente con la anterior ecuación y es la variable T , la cual no debe aparecer en conjunto con θ en la ecuación diferencial; sin embargo se ha presentado la ecuación para hacer un doble análisis (un análisis matemático y uno físico) con las ecuaciones e.5.2.1.1.34 y e.5.2.1.1.36.

Tomando la ecuación e.5.2.1.1.34, puede verse que el denominador de ε es E_A , lo que hace a ε muy pequeño y a $\varepsilon\theta \ll T_a$. De hecho $\varepsilon\theta$ es una función de T definida por e.5.2.1.1.35, que tomará un valor dependiendo del lugar del volumen de reacción donde se mida (a diferencia del modelo de Semenov donde era una constante), pero igualmente en éste modelo, $\varepsilon\theta$ puede ser considerado chico en cualquier punto si se compara con respecto de T_a . De acuerdo a esto el valor $\varepsilon\theta$ puede ser considerado despreciable en el denominador de e.5.2.1.1.34, dejando solo a T_a sin caer en un error de consideración.

Tomando la ecuación e.5.2.1.1.36, y en base a lo explicado en el párrafo anterior, se conoce que la diferencia entre T y T_a en general no es muy grande (recordemos que se está considerando el estado crítico definido por la imagen 5.2.1.1.3., donde $T_a = T_1$ y $T = T_{en_p2}$, o uno muy cercano a este estado). Con base en esto, no existe un error muy considerable si se reemplaza la variable T por la constante T_a en e.5.2.1.1.36, lo que es desde el punto de vista físico, la misma consideración que obtuvimos en el párrafo anterior desde el punto de vista matemático.

En base al análisis hecho podemos escribir:

$$\frac{-E_A^2}{RT_a(R\theta + E_A)} \approx -\frac{E_A}{RT_a} + \frac{\theta}{T_a} \quad (\text{e.5.2.1.1.37})$$

Reemplazando en la ecuación e.5.2.1.1.30 el equivalente dentro del exponencial:

$$\frac{k}{r_0^2} \left(\frac{RT_a}{E_A} \right) \left\{ \frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{z} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} = -\Delta H_c \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp \left(-\frac{E_A}{RT_a} + \frac{\theta}{T_a} \right) \quad (\text{e.5.2.1.1.38})$$

La ecuación anterior es un modelo aproximado bastante apegado al modelo exacto dado por la ecuación e.5.2.1.1.16, complementado con las ecuaciones e.5.2.1.1.17 a e.5.2.1.1.22 cuando se dan las condiciones de frontera y estado observadas luego de la ecuación e.5.2.1.1.23. Se ha reducido de este modo por medio de asunciones y aproximaciones lógicas un modelo que esta descrito por una ecuación diferencial en derivadas parciales en cuatro dimensiones (tres dimensiones espaciales y el tiempo), a una ecuación diferencial ordinaria de segundo grado en una dimensión. Las soluciones de distribución térmica aplicadas a cada sistema dependerán de sus condiciones de frontera e iniciales propias, pero aplicar estas condiciones para resolver por medio de una ecuación ordinaria unidimensional es mucho mas fácil que hacerlo con una ecuación diferencial en derivadas parciales.

Los métodos de solución analíticos de una ecuación diferencial en derivadas parciales del tipo presentado en e.5.2.1.1.16 son muy pocos, resumiéndose al método del producto (por separación de variables), y la solución de la búsqueda de funciones armónicas de la ecuación de Laplace por medio del método de Teoría del Potencial, siendo el primero de estos aplicado en general cuando se tienen solo 2 de las 4 dimensiones. Aplicar la Transformada de Laplace a la solución analítica de e.5.2.1.1.16, no será posible cuando existan mas de 2 dimensiones, y en el caso de 2 dimensiones la transformada reducirá igualmente la ecuación diferencial en derivadas parciales a una ecuación ordinaria unidimensional, poniendo una variable dimensional en función de la otra, pero el análisis solo podrá ser hecho con una ecuación en derivadas parciales como máximo de 2 variables dimensionales.

Por otro lado existen varios métodos estándar en los cuales con cierta destreza matemática se puede llegar a una solución analítica de la ecuación e.5.2.1.1.38.

Aún con técnicas avanzadas de resolución de ecuaciones diferenciales, en muchos de los casos las ecuaciones diferenciales resultantes solo tienen solución en ciertos rangos de valores, teniendo soluciones parciales y/o particulares a cada caso; y no una solución general. Llegar a estos casos es bastante común y la mejor forma de llegar a estas soluciones parciales o particulares es por medio de métodos de análisis numérico, tales

como el método de análisis de diferencias finitas, análisis de elementos finitos, y en menor escala o ya cuando han sido aproximadas las ecuaciones en derivadas parciales a ecuaciones diferenciales ordinarias, se pueden usar aproximaciones en base a la serie de Taylor, el método de Runge-Kutta y Runge-Kutta-Nystrom. Se dejan al lector buenas referencias bibliográficas en esta literatura donde pueden encontrarse los desarrollos de cada uno de éstos métodos y sus aplicaciones.

Aunque la ecuación (e.5.2.1.1.38), ya es una buena aproximación que ha partido del modelo de la ecuación general de difusión de calor aplicada a una ignición, Frank-Kamenetskii la desarrolló un poco más, facilitándola al introducir su parámetro, el cual tiene valores ya definidos dependiendo de las condiciones. Recuérdese que la principal diferencia entre el modelo de Semenov y el de Frank-Kamenetskii es la forma como ha sido considerado el volumen de reacción, y el resultado o conclusión general en el modelo de Semenov es una temperatura que se mantiene constante en todo el volumen de reacción como se mostró en la imagen 5.2.1.1.2. (aplicable a modelos con volúmenes de reacción pequeños y bajos números de Biot), mientras que el modelo de Frank-Kamenetskii considera una distribución térmica en el volumen y un alto número de Biot, lo cual puede ser ilustrado con la imagen 5.2.1.1.4.

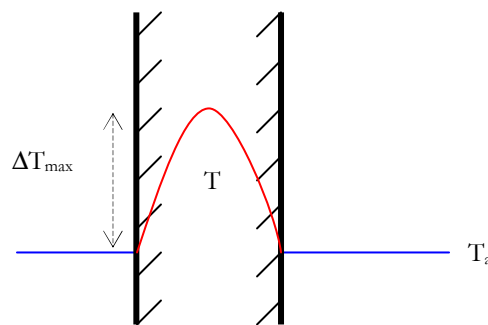


Imagen 5.2.1.1.4. Se representa el perfil de temperatura entre el volumen reaccionante y el medio, propuesto por Frank-Kamenetskii en su modelo.

La ecuación de Frank-Kamenetskii sale al separar los parámetros exponenciales de la ecuación (e.5.2.1.1.38), de la siguiente forma:

$$\frac{k}{r_0^2} \left(\frac{RT_a}{E_A} \right) \left\{ \frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{z} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right\} = -\Delta H_c \cdot C_i^n \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT_a} \right) \cdot \exp\left(\frac{\theta}{T_a} \right) \quad (\text{e.5.2.1.1.39})$$

reordenando y reagrupando:

$$\frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{z} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} = - \frac{r_0^2 E_A \Delta H_c \cdot C_i^n \cdot A}{kRT_a} \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT_a}\right) \cdot \exp\left(\frac{\theta}{T_a}\right) \quad (\text{e.5.2.1.1.40})$$

donde el parámetro de Frank-Kamenetskii se define por

$$\delta = \frac{r_0^2 E_A \Delta H_c \cdot C_i^n \cdot A}{kRT_a} \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT_a}\right) \quad (\text{e.5.2.1.1.41})$$

y $\frac{\partial \theta^2}{\partial z^2} + \frac{K}{z} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}$, es la compresión unidimensional de $\nabla^2 \theta$.

Definiendo a $\varphi = \frac{\theta}{T_a}$, se puede escribir para cualquier caso, y en cualquier sistema coordinado recto o curvilíneo la ecuación general que describe el modelo de Frank-Kamenetskii:

$$\nabla^2 \theta = -\delta \cdot \exp(\varphi) \quad (\text{e.5.2.1.1.42})$$

Para muchos casos, los parámetros críticos están incluso establecidos en modelo de Frank-Kamenetskii, como se resume a continuación al utilizar la ecuación e.5.2.1.1.42 en coordenadas cartesianas, cilíndricas y esféricas, haciendo los respectivos reemplazos por medio de las ecuaciones e.5.2.1.1.19, e.5.2.1.1.20 y e.5.2.1.1.21 respectivamente.

Caso	Ecuación Modelo	δ crítico	φ_{\max} crítico	Dimensión característica
Placa Infinita	$\frac{\partial \theta^2}{\partial l^2} = -\delta \cdot \exp(\varphi)$	0.88	1.19	Mitad del ancho de la placa.
Cilindro Infinito	$\frac{1}{r} \frac{1}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = -\delta \cdot \exp(\varphi)$	2.00	1.39	Radio del cilindro
Esfera	$\frac{1}{R^2} \frac{1}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) = -\delta \cdot \exp(\varphi)$	3.32	1.60	Radio de la esfera

Tabla 5.2.1.1.1. Resumen de ecuaciones según el modelo de Frank-Kamenetskii aplicadas a las condiciones geométricas mas comunes.

5.2.1.2. Ignición de Líquidos.

Los combustibles líquidos están clasificados de acuerdo a su “punto de inflamación” (flashpoint), el cual es la temperatura mas baja en la cual existen mezclas de vapores inflamables sobre la superficie del líquido (estos vapores pueden ser tratados con los modelos dados por la sección 5.2.1.1.). Experimentalmente esto se determina (en la mayor parte de los casos) usando el Aparato de Copa Cerrada de Pensky-Martens (ASTM 1980a). Bajo este sistema, el líquido es calentado lentamente, a unos 5 a 6 grados Celsius por minuto en un envase cerrado, y una llama piloto muy pequeña (tan pequeña que su luminiscencia es imperceptible) se introduce en el espacio del tanque sobre la superficie del líquido (donde se concentrará el vapor), por medio de una ventana obturadora que abre y cierra automáticamente introduciendo la llama piloto a intervalos frecuentes espaciados igualmente entre ellos.

El punto de inflamación es tomado a la temperatura mas baja posible del líquido cuando la mezcla aire/vapores entra en ignición. La concentración de vapor en el aire puede ser calculada por medio de las proporciones de gases, usando ley de presiones parciales, o calculando del equilibrio de la presión de vapor del líquido por medio de la ecuación e.5.2.1.2.1, para líquidos puros, la cual se obtiene del caso particular de la ecuación de Clapeyron-Clausius cuando se logra esta condición de equilibrio.

$$\log_{10} p^{\circ} = \left(-0.2185 \frac{E}{T} \right) + F \quad (\text{e.5.2.1.2.1})$$

donde E es el calor molar de vaporización (constante), F es una constante característica del cada líquido, y T es la temperatura (en grados Kelvin). El valor de p° estará en mmHg o torr. Literaturas citadas en las referencias bibliográficas, como D. Drysdale (Introducción a Dinámica del Fuego), listan tablas de valores de los diferentes líquidos, para las constantes E y F .

Una condición notable en la prueba de Penski-Martens, es que la misma se desarrolla en un recipiente cerrado, y las medidas tomadas del punto de inflamación en

recipientes abiertos no es la misma que la medida en un recipiente cerrado, ya que en el caso abierto los vapores son libres de difundirse y escapar del área sobre la superficie del líquido, dando como resultados gradientes de concentración de vapor que van decreciendo a medida que se gana altura de separación sobre la superficie del líquido. La imagen 5.2.1.2.1. ilustra cualitativamente este proceso.

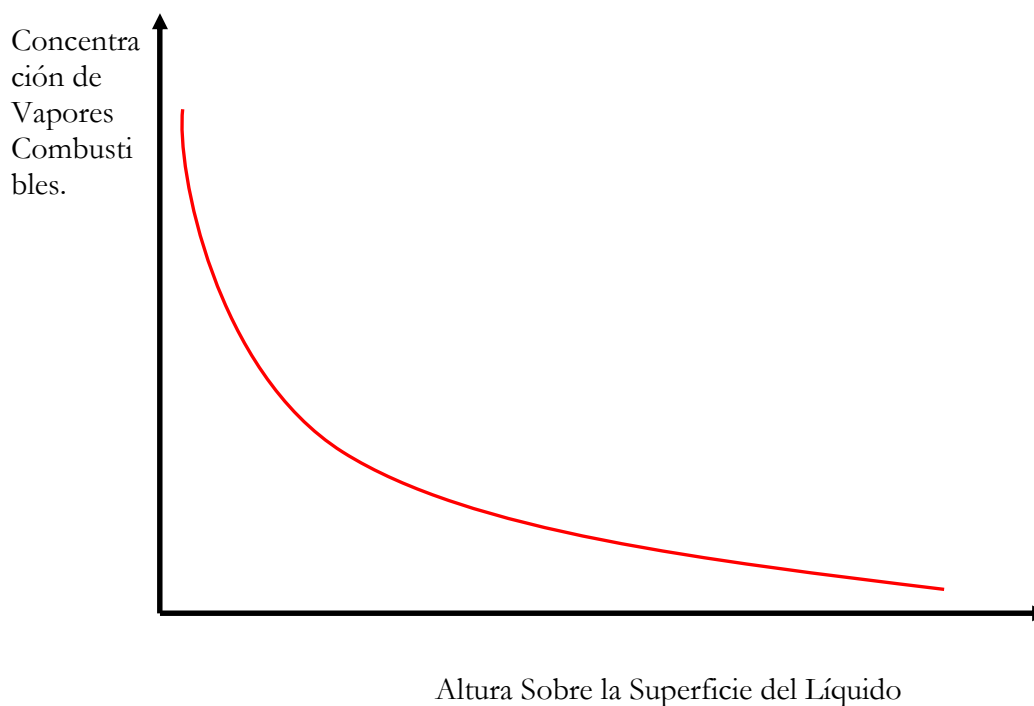


Imagen 5.2.1.2.1. Se muestra la distribución típica de concentración de vapores combustibles sobre la superficie del líquido que los libera con respecto de la distancia en altura a la que se toma la medida de la concentración, cuando el líquido se encuentra en un recipiente abierto tipo piscina.

La imagen 5.2.1.2.1, da un ejemplo más real que la prueba de Penski-Martens. Para solventar las dificultades concernientes a concentraciones mínimas bajo las cuales se puede dar la ignición en un líquido, se ha acordado utilizar “límites de flamabilidad” en lugar de concentraciones; ya que la concentración puede ser en general una constante o una variable dependiendo de las condiciones físicas del medio, pero el límite de flamabilidad está definido como un porcentaje por volumen a presión atmosférica (o a la presión del ambiente donde se encuentre el volumen de líquido), de los vapores combustibles con respecto de la presión ambiental. Esto se hace utilizando la Ley de Presiones Parciales de Dalton.

Incluso para 2 o mas vapores de 2 o mas líquidos combustibles distintos es posible encontrar los porcentajes de concentración o límites de flamabilidad utilizando la Ley de Dalton (1803), siempre y cuando los líquidos sean inmiscibles. Si son miscibles, la relación es más compleja.

Básicamente la Ley de Dalton estipula que la suma de las presiones de cada uno de los gases que se encuentran contenidos en un medio (en un volumen) da la presión total del medio. Las siguientes ecuaciones son modelos matemáticos que representan el enunciado de la Ley de Dalton:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n p_i = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n \quad (e.5.2.1.2.2)$$

$$p_i = P_{total} \cdot m_i \quad (e.5.2.1.2.3)$$

$$p_i = \frac{P_{total} \cdot c_i}{1,000,000} \quad (e.5.2.1.2.4)$$

donde:

P_{total} es la presión total del medio (o volumen que contiene los gases)

p_i es la presión parcial de cada uno de los gases 1, 2, 3, ..., n .

m_i es la fracción molar del i -ésimo componente de la mezcla total de los n componentes.

c_i es la concentración del i -ésimo componente de la mezcla expresada en unidades ppm. (partes por millón).

Se han desarrollado formulaciones mas exactas y especificas para líquidos de interés, como lo son los líquidos de petróleo, para los cuales se utiliza el Método de Reid, descrito en la norma ASTM D323 (Método de Prueba Estándar de Presión de Vapor de Productos de Petróleo), el cual da la presión de vapor en psia (o kPa) a 100°F (37.8°C), la cual difiere un poco de las verdaderas presiones de vapor. Sistemas similares de evaluación de las presiones de vapor para muchas sustancias pueden ser encontrados en los manuales químicos; algunas de estas literaturas han sido apuntadas en nuestras referencias bibliográficas.

Revisando la ecuación de estado del gas ideal puede verse que existe una relación directa entre el número de moles de cada gas y la presión del mismo para un volumen dado, como se ve a continuación;

$$P_g \cdot V_g = n_g \cdot R \cdot T_g \quad (\text{e.5.2.1.2.5})$$

donde el subíndice g indica que P , V , n , T son respectivamente presión, volumen, moles y temperatura absoluta del gas ideal, y R es la constante universal de los gases.

Aunque la ecuación e.5.2.1.2.5 es utilizada como una aproximación, ya que se utiliza en el caso del gas ideal (los gases reales difieren en su comportamiento de la ecuación e.5.2.1.2.5 hasta en un 25% en muchos casos); nos da una buena idea de la relación que existe entre la presión del gas, y la cantidad de masa (dada por la cantidad de moles del mismo) que hay de ese gas. Esta relación en el caso más simple es directamente proporcional. Algunos gases difieren un poco de ella pero el alejamiento no es demasiado; su aproximación es más fiel cuando los gases se encuentran a altas temperaturas y bajas presiones, pues los espacios intermoleculares son muy grandes en comparación con los diámetros moleculares.

Existen una gran variedad de ecuaciones de estado más aproximadas que la ecuación de estado del gas ideal, a la realidad de los diferentes tipos de gases y sus condiciones ambientales diversas; algunas de ellas son la ecuación de Estado de Van Der Waals, la de Beattie-Bridgeman, la de Benedict-Webb-Rubin, la de Strobridge y la ecuación de estado Virial que puede ser moldeada por una cantidad infinita de parámetros a forma de una serie de potencias. El lector puede estar interesado en profundizar en el desarrollo de cada una de estas, para lo cual lo remitimos a la bibliografía relacionada al final de esta literatura; sin embargo lo importante para nosotros en éste punto es que todas estas ecuaciones marcan el mismo tipo de relación que presenta la ecuación de estado del gas ideal (e.5.2.1.2.5), entre la presión y volumen del gas.

Como parte de este hecho se comprueba que las presiones parciales de los gases contenidos en un recinto o volumen son un indicativo directamente relacionado con el porcentaje de ocupación física que tenga el gas en el volumen del recinto. De tal forma puede establecerse un límite bajo el cual el gas puede tener una concentración en el recinto por medio de la presión de vapor del mismo (la cual lo hace salir del líquido combustible o inflamable) y su relación con la presión atmosférica, sabiendo que cuando la presión de

vapor del líquido iguala la presión atmosférica no habrá nada que impida que salgan los gases combustibles del líquido, los cuales son los causantes iniciales del incendio por líquidos combustibles.

NFPA ha definido el límite inferior de inflamabilidad por sus siglas en inglés LFL (Low Flammability Limit), de la siguiente forma:

$$LFL = \frac{100P_{vap}}{P_{atm}} \quad (e.5.2.1.2.6)$$

La anterior ecuación divide la presión de vapor del líquido entre la presión atmosférica (o presión del medio que rodea al líquido), y la multiplica por 100 para dar un porcentaje. Este porcentaje será el porcentaje de concentración de gas combustible inflamable necesario para que pueda generarse la ignición de este combustible de forma exitosa e incluso si las condiciones de presión de vapor y atmosférica no cambian desfavoreciendo la concentración, se puede en muchos casos mantener la combustión, ya que el líquido puede en algunos casos liberar gas a medida que este se consume por las llamas para reponer las concentraciones de gas cuando éste se consuma, y equilibrarlas de acuerdo a la ley de las presiones parciales de Dalton (ya presentada en e.5.2.1.2.2).

Como regla general cuando se trata de líquidos inflamables y combustibles se trata de que las concentraciones de los gases liberados no superen el 25% del LFL, para evitar una ignición.

La temperatura mas baja a la cual el líquido llega apenas a tener este equilibrio en presión de vapor y presión atmosférica (la cual es llamada presión de vapor equilibrada, presión de líquido saturado, o presión de vapor saturado), es la *temperatura o punto de inflamación (flashpoint)*, que es precisamente la temperatura mas baja a la cual se da la ignición como ya se había mencionado bajo una explicación no tan técnica al comienzo de esta sección. Bajo la definición de NFPA, el punto de inflamación (flashpoint) es la temperatura mas baja a la cual la presión de vapor del líquido es apenas suficientemente capaz de producir una mezcla inflamable en el límite inferior de inflamabilidad (LFL).

Este primer punto (flashpoint) es relacionado con un segundo punto llamado "*punto de fuego*" o "*punto de incendio*" (*firepoint*), el cual es resumido por muchos autores al término de "*punto de ignición*". La definición oficial del punto "*firepoint*" según NFPA es: la temperatura mas baja a la cual el líquido combustible puede ser calentado para que libere suficiente

cantidad de vapores al punto de permitir una combustión sustentada de por lo menos 5 segundos, luego de la aplicación de la llama de prueba. Esta definición nos indica que el “firepoint” es la temperatura mas baja a la cual el líquido libera vapor a la misma velocidad que éste se consume por el incendio, con lo que se crea un equilibrio de masas en el volumen de control del vapor que se encuentra sobre el líquido, con lo cual se puede identificar de ésta temperatura de líquido en adelante, el riesgo de una piscina incendiada indefinida en el tiempo.

Muchos líquidos liberan suficiente cantidad de vapor para mantener la combustión desde que llegan al “flashpoint”, esto depende de características químicas propias del líquido y que tan fácil le sea liberar moléculas; sin embargo otros líquidos deben ser calentados un poco más para poder liberar suficientes vapores para mantener una combustión.

Aquellos líquidos que liberan suficiente vapor para sustentar la combustión desde el flashpoint; tienen igual temperatura flashpoint que firepoint; pero aquellos que necesitan ser calentados un poco mas, tendrán por lo ya explicado en esta sección un firepoint más alto que el flashpoint. Este segundo grupo de líquidos combustibles tienen en general también temperaturas de inflamación mas altas, y son agrupados por NFPA en un grupo de “Líquidos de Alta Temperatura de Inflamación” (High Flashpoint Liquids), y los mismos reportan típicamente un firepoint que oscila entre unos 10 a 27 grados Fahrenheit sobre el flashpoint de los mismos.

Si nota el lector he preferido mantener la terminología de estos puntos en el idioma inglés, en vista de que las traducciones al español presentan ciertas confusiones dadas por muchos autores; los cuales han decidido resumir los términos ingleses “firepoint” y “ignition temperature” a un solo término en español, “temperatura de ignición”. La razón de esto es que ellos consideran que el líquido combustible (o sólido combustible puesto que también tienen flashpoint y firepoint), que llega al “firepoint”, ha llegado al punto de ignición puesto que en general ya se encuentra en el punto de combustión autosustentada, lo cual es correcto y se estipuló también en la presente literatura en el punto 3.1.2.23; y realmente toda esta consideración es totalmente correcta si se analiza desde una consideración muy simplista que es la que se considera en éste punto de vista.

Si fuésemos consecuentes con la idea presentada en el párrafo anterior, solo debiéramos tener 2 definiciones; la de “flashpoint” (temperatura de inflamación) y la temperatura de ignición. El “firepoint” sería redundante con el concepto de la temperatura de ignición. NFPA sin embargo estipula el concepto de ignición bajo un

marco general de combustibilidad donde se incluyen sólidos, líquidos y gases; y los gases son los que se han adecuado de mejor forma a éste concepto único de ignición, como ya pudo verse de forma detallada en la sección 5.2.1.1, donde se presentaron los modelos mas aceptados para ignición de gases. Sin embargo cuando pasamos a líquidos y sólidos NFPA (e incluso otras organizaciones), deciden dividir la definición del proceso de ignición y separarla de la definición del proceso de inflamación, puesto que ya no depende solamente de un elemento único (como en el caso del gas), sino que depende de el elemento a combustionarse (o sea el vapor liberado) y la producción del mismo por parte de la fuente de combustible principal, ya sea líquido o sólido.

Bajo estas condiciones el ya definido “punto de ignición” se volvería muy confuso, e incluso dejaría de ser un punto específico para convertirse en un “rango de temperaturas” que dependiendo de las condiciones del medio que rodea el combustible darán distintas temperaturas para este punto, tal como se vio al principio de 5.2.1.2, donde se explicó cómo se realiza la prueba de Pensky-Martens de Copa Cerrada para determinar el una ignición primaria a la mínima temperatura posible, que no necesariamente es autosustentable, a la cual NFPA da el nombre de flashpoint; pero también se estipuló que si el recipiente es abierto a medida que se aleja de la superficie del líquido la concentración de gases liberados se difumina más con el ambiente, como lo muestra la imagen 5.2.1.2.1, incrementando de esta forma la temperatura necesaria para el flashpoint.. La imagen 5.2.1.2.1 es medida bajo parámetros de NFPA en el Aparato de Copa Abierta de Cleveland.

Fuera de todo esto, ninguna de las medidas de “flashpoint” corresponde necesariamente a una temperatura en la cual el combustible líquido o sólido primario libera suficientes cantidades de gas como para autosustentar la combustión; sin embargo si este gas fuese acumulado por bastante tiempo en un recipiente o volumen, de forma que cuando se de una posible llama piloto ignitora se encienda, el mismo podría arder por un tiempo considerable, el cual dependerá de la cantidad de gas acumulado, aunque el combustible primario líquido o sólido no se encuentre a una temperatura en la cual libere gases a la misma velocidad a la que estos combustionan. Bajo éste punto de vista podríamos considerar un “punto de ignición” bien definido en ésta condición, pero si se acaba el gas acumulado se extingue el incendio por insuficiencia de combustible.

A forma de evitar estas ambigüedades NFPA define el “firepoint” como ya se vio como el punto en el que hay un equilibrio en liberación de gases por parte del combustible primario líquido o sólido, y consumo de los mismos por parte del incendio.

Como se ve, definir una “ignición” en un combustible líquido o sólido, es realmente muy complicado con un solo término, por lo cual básicamente lo que se pretende es definirla por medio de los términos “flashpoint” y “firepoint”, el último de los cuales tiene mucho en común en su definición con el concepto de “temperatura de ignición”, pero no es totalmente claro bajo el más estricto y técnico de los conceptos, en base a lo que he explicado en párrafos anteriores, de esta forma cuando hablamos de ignición de gases, hablamos de un concepto único, sin embargo, cuando hablamos de ignición en líquidos y sólidos, de una forma muy técnica y profunda, hablamos de un proceso mucho más complejo, que no puede ser definido en función de una sola variable, por lo cual se releva de su puesto el término simple de “temperatura de ignición” para ser bien definido por las temperaturas “flashpoint” y “firepoint”. Incluso en base a las pruebas de copa cerrada y copa abierta de NFPA podríamos hablar de “closed cup flashpoint”, “open cup flashpoint” y “firepoint”, como se estipula en las literaturas ingenieriles más técnicas de NFPA. Como ejemplo simple para compuestos de combustibles tipo n-decano ($n-C_{10}H_{22}$), las temperaturas “closed cup flashpoint”, “open cup flashpoint” y “firepoint” son respectivamente 46°C, 56°C, y 64°C aproximadamente según listas de pruebas de NFPA.

Los líquidos combustibles tienen bien definida también la “temperatura de autoignición”, la cual es la temperatura del ambiente externo al líquido mínima posible que puede iniciar una combustión sin la presencia obvia de una fuente de ignición, como una chispa o una llama. Esta temperatura es determinada en un recipiente cerrado (o casi cerrado), el cual es calentado hasta el punto en que espontáneamente el vapor que se libera y llena el recipiente ignita y comienza la combustión. Los modelos aplicables para este tipo de ignición son los mismos ya presentados en 5.2.1.1., de los cuales el más sencillo es el de Semenov.

Como ya se definió, existe una condición de Límite Inferior de Inflamabilidad (LFL), dado por la ecuación e.5.2.1.2.6, que describe la mínima concentración de vapores bajo las cuales un “encendido” puede darse en presencia de una fuente de ignición; pero existe también un máximo límite de concentración de vapores, para que se pueda dar esta ignición; el cual es llamado Límite Superior de Inflamabilidad, (Upper Flammable Limit), o UFL por sus siglas en inglés, que es la condición de concentración de vapores sobre la cual no se dará una ignición debido a que la mezcla aire/combustible se hace muy rica, por lo cual no se encontrarán suficientes átomos de oxígeno para reaccionar con la cantidad de átomos de combustible que existan en la mezcla.

Si bien es cierto, estar sobre el UFL es una condición “segura” contra un incendio, cuando esta concentración se va diluyendo, cae dentro del rango de inflamación que existe entre el LFL y el UFL, rango que al ser plasmado perpendicularmente contra un eje de temperatura que comience en las temperaturas límites inferiores de inflamabilidad de los gases dentro de la línea de vapor saturado del combustible (línea de temperatura-presión donde el líquido y el gas se encuentran en equilibrio), crea una región que denominaremos “*región de inflamabilidad*” donde se reúnen las condiciones necesarias para que el combustible entre en ignición al encontrar una fuente piloto como una llama o chispa.

Esta temperatura mínima para la región de inflamabilidad no es necesariamente el firepoint del líquido o sólido combustible, pero si corresponde con el flashpoint del combustible primario, y la sustentabilidad del incendio dependerá de 2 posibilidades que ya fueron expuestas; la consecución del firepoint y/o la acumulación de suficientes vapores combustibles liberados para mantener concentraciones sobre el LFL. Una vez el líquido combustible llegue al firepoint, definitivamente el incendio será autosustentado y no se extinguirá.

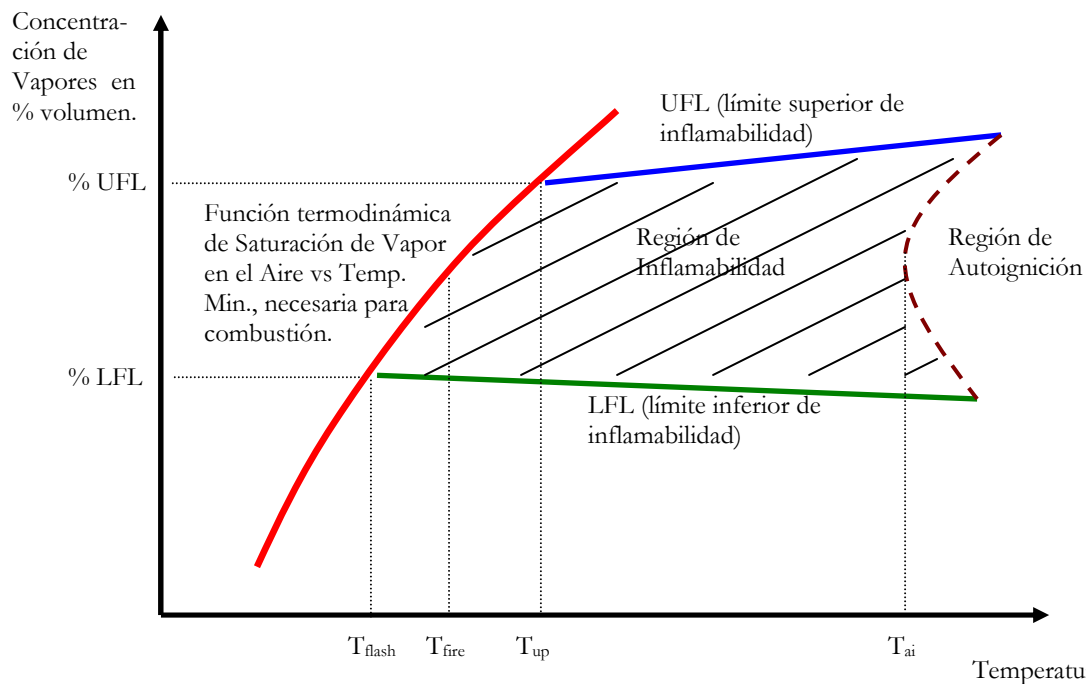


Imagen 5.2.1.2.2. Muestra gráficamente la forma como se comportan los fenómenos de ignición de líquidos combustibles, donde se muestran las denominadas “región de inflamación” y “región de auto ignición”. Las temperaturas indicadas corresponden a T_{flash} =flashpoint, T_{fire} =firepoint, T_{up} =temperatura mínima donde se alcanzara el UFL, T_{ai} =temperatura de autoignición.

Si las concentraciones antes de la posible ignición son superiores el UFL, el combustible no comenzará la ignición, sin embargo una vez comenzada la ignición pueden existir regiones donde las concentraciones superen el UFL y extinguir parcialmente el incendio por insuficiencias de la cadena química al no existir suficiente oxígeno, pero es poco probable que se tenga una extinción total sobre toda el área del incendio que por lo general se encuentra formando una película sobre la superficie del líquido.

Si bien es cierto en la imagen 5.2.1.2.2, se pueden identificar 2 grandes regiones, las cuales son la “*región de inflamabilidad*” y la “*región de autoignición*”, es importante destacar que la imagen es una representación típica del comportamiento de un combustible líquido a base de hidrógeno y carbón que ha sido estudiado en condiciones muy controladas y en un espacio cerrado. Este comportamiento nos sirve como guía para la comprensión de causas y efectos de incendios con combustibles líquidos, sin embargo la dinámica de los mismos es tan grande que no puede tomarse como una verdad absoluta.

La región de autoignición por ejemplo no tiene una forma definida, pues es muy difícil estudiar el proceso una vez ha comenzado el incendio en si, por lo cual solo esta definido el límite izquierdo de la región, el cual típicamente se adentra a la región de inflamación buscando una temperatura mínima en la que se reúnan las condiciones de transferencia de calor hacia una concentración de vapores inflamables-aire adecuada para comenzar a combustionar. Este punto puede ser modelado con las ecuaciones ya vistas en 5.2.1.1.

Tendría lógica pensar también que el combustible líquido por si solo nunca llegará a la región de autoignición por causas de un incremento térmico, ya que primero pasará por la temperatura donde podrá conseguirse el UFL y luego cuando esté en la temperatura de autoignición, lo mas seguro ya el recipiente este completamente por encima del UFL; sin embargo, dependiendo del vapor liberado y sus propiedades puede existir mas de una posibilidad de autoignición; como por ejemplo, esta región de autoignición podría entrar profundamente en la región de inflamación, formando una ensenada en la misma tan profunda que la temperatura mínima de autoignición sea mas baja que la temperatura donde se logra el UFL; también podría darse el caso de un vapor combustible con una función termodinámica de saturación de vapor tan oblicua (o con un UFL tan alto) que el UFL se alcanza a una temperatura mayor que la temperatura de autoignición; o simplemente podría darse el caso de un combustible en un recipiente que no es cerrado totalmente sino que deja escapar los vapores, con lo cual la temperatura se incrementa

pero al escaparse los vapores no se logra la concentración del UFL, por lo cual se llega a la temperatura de ignición con un riesgo inminente de dar comienzo al incendio.

Este último caso es el ejemplo clásico de los tanques de combustible de automóviles y estaciones de despacho de combustible; mientras los tanques de combustible están cerrados, las concentraciones en los mismos son altas superando el UFL, pero cuando están abiertos en un solo punto y sin ventilarse de inmediato (ya sea por llenado de los mismos o despacho por medio de una manguera), las concentraciones dentro del tanque forman en realidad un gradiente de concentraciones de gases desde el espacio que esta en contacto con el aire libre hasta el espacio que esta directamente en contacto con el líquido combustible, propiciando en algún punto de esta línea de gradiente de concentraciones, la concentración necesaria para que en caso de alcanzar la temperatura de autoignición, la misma se lleve a cabo propiciando luego una explosión por incremento de presiones dentro del tanque y siguiendo el modelo ya expuesto en esta misma literatura en 4.9.6.

Si no se tiene la temperatura de autoignición, pero se esta por encima del flashpoint, cualquier llama piloto, o chispa puede igualmente dar inicio a la explosión porque estaremos dentro de la región de inflamación. El modelado de incendios y explosiones de líquidos combustibles es sumamente importante para prevenir fuentes de ignición eléctricas, pues básicamente éstas son perfectas tanto para pilotar la ignición dentro de la región de inflamación, por medio de una chispa eléctrica muy pequeña (hasta por los contactos de las teclas de un celular en una estación de combustible); como para propiciar las temperaturas y generación de calor adecuadas para llevar el combustible a la región de autoignición, por medio de la generación de potencia eléctrica transformada en calor; (sin necesidad de generar chispas por ningún tipo de switcheo o corto eléctrico) lo que es un riesgo mucho mas oculto y será modelado en el siguiente capítulo, como punto cumbre de ésta obra.

Lo que se quiere dejar claro ante todo, es que la posibilidad de tener diferentes condiciones con combustibles líquidos es mucho mas grande que cuando se tienen simplemente gases, y como ya se ha visto, las posibilidades con los gases ya son extensas, a tal punto que hay que asumir ciertas condiciones, controlándolas y estipulándolas prácticamente (lo que en la vida real no es del todo correcto), y despreciar otras variables con menos repercusión, a fin de simplificar los modelos, que de por si ya son suficientemente complicados.

Una de las opciones de modelado que se ha tomado con los líquidos combustibles en base a la intensa dificultad que representa llegar a soluciones confiables y no tan complejas matemáticamente, es la utilización de modelos físicos a escala (sección 3.2.1.1.1.), con los cuales se han determinado muchas ecuaciones que salen de experiencias controladas y gráficos de comprensión de procesos, similares a los presentados en esta sección.

Una de las posibles interpretaciones del proceso de un líquido combustible que llega a su temperatura de autoignición de forma directa, propiciando una explosión, se muestra como ejemplo en la imagen 5.2.1.2.3., y se ha presentado aquí como un ejemplo de aplicación, desarrollado virtualmente en ésta investigación, sin embargo es importante que el lector tenga presente que es una de las múltiples posibilidades de solución de un modelo que pueden llevar a un incendio por autoignición en un líquido combustible.

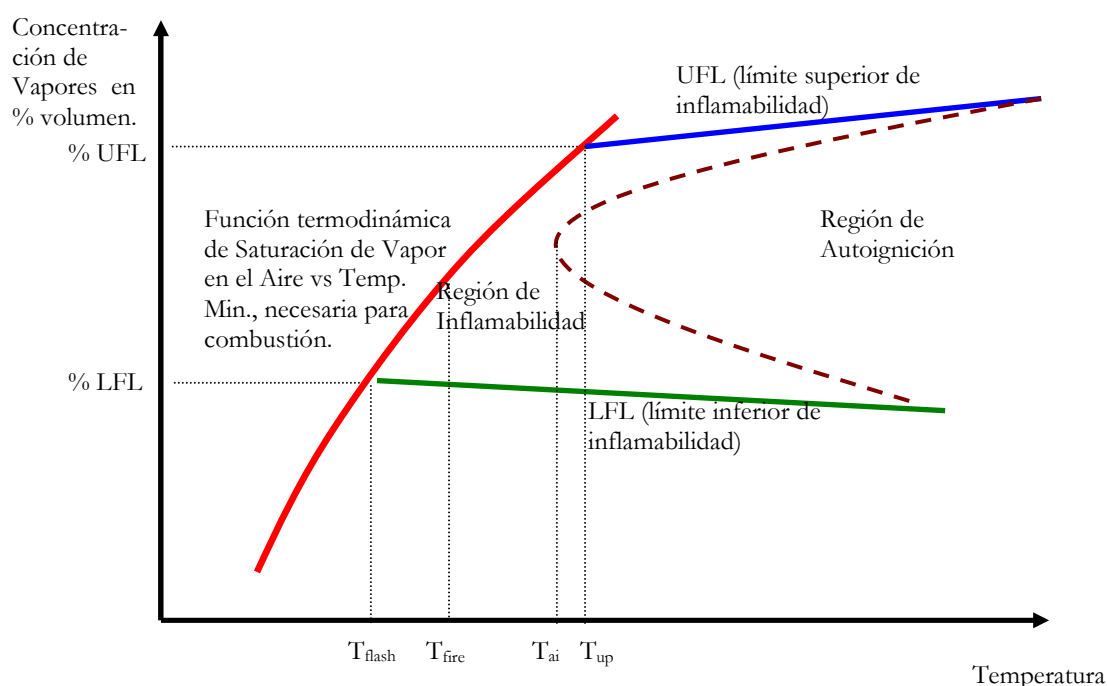


Imagen 5.2.1.2.3. Muestra gráficamente una condición de comportamiento de los fenómenos de ignición de líquidos combustibles, donde se puede llegar a la temperatura de autoignición antes de llegar a cualquier condición posible de UFL.

La imagen 5.2.1.2.3. da un ejemplo gráfico donde se puede ver que la condición del UFL requiere de una concentración mas alta que la planteada por 5.2.1.2.2., y la región de autoignición tiene una temperatura mínima mas baja que la planteada anteriormente

también, propiciando las condiciones necesarias para que éste combustible llegue a la autoignición sin siquiera pasar por el UFL.

Se debe estar claro también en que los límites UFL y LFL, son considerados constantes o cuasiconstantes; sin embargo como se ha visto en las representaciones gráficas anteriores, los mismos son realmente funciones dependientes de la temperatura y su variabilidad dependerá del comportamiento que tengan las moléculas del vapor combustible liberado al adquirir temperatura, pues las mismas se cargan de energía y expanden o disminuyen su diámetro dependiendo de la posibilidad de reacciones internas o simples ganancias y reducciones de la energía cinética de sus componentes atómicos.

5.2.1.2.1. Clasificación de Líquidos Inflamables y Líquidos Combustibles

La ignición de los líquidos inflamables y combustibles es tan importante que la mayor parte de los cuerpos y organizaciones de seguridad grandes del mundo basan la clasificación de los mismos en base a la facilidad con la que pueda darse la ignición de los mismos. La sensación medular de la “división” entre líquidos inflamables y líquidos combustibles, es el hecho de que en esencia un líquido inflamable tiene mucho mayor riesgo de autoignitar bajo las condiciones ambientales presentes en el medio que lo rodea que un líquido combustible; lo que puede ser expresado de otra forma diciendo que un líquido combustible ignita generalmente por un medio pilotado de ignición (una llama, una chispa), mientras un líquido inflamable puede ignitar tanto pilotadamente como por las simples condiciones que presente el medio que lo rodea en un momento dado. De aquí la razón de que los líquidos inflamables sean de mucho más cuidado que los líquidos combustibles.

El punto más bajo de riesgo en la ignición de cualquier líquido como ya se ha visto es el flashpoint, y dependiendo del aparato que se utilice para medirlo puede tener algunas variantes en su valor, como también se ha visto previamente. Los niveles de temperaturas ambientales también influyen en el riesgo de ignición de un líquido inflamable o combustible por lo cual también se encuentran ciertas variantes entre los rangos de líquidos clasificados por causa de las temperaturas y consideraciones regionales; como por ejemplo, en los Estados Unidos se clasifican como líquidos inflamables a aquellos que tienen flashpoint por debajo de los 100°F (37.8°C), mientras que en el Reino Unido, se clasifican como líquidos inflamables a aquellos que tienen flashpoint por debajo de los 140°F (60°C).

En lo siguiente presentaremos 2 de las clasificaciones más importantes y utilizadas a nivel mundial, las cuales son la de la NFPA y la clasificación Británica.

5.2.1.2.1.1. Clasificación según la NFPA.

La NFPA divide los líquidos inflamables y combustibles en 3 clases y 5 subclases. Las clases son denominadas Clase I, Clase II y Clase III, de las cuales la Clase I encierra a los líquidos inflamables y las Clases II y III encierra a los líquidos combustibles. Las subclases son A, B y C para la Clase I, y B y C para la clase III.

La clasificación de NFPA es una de las más completas pues toma en cuenta condiciones de flashpoint de los líquidos y también puntos de ebullición de los mismos (donde están propiamente en la región termodinámica de saturación del líquido-vapor). En lo siguiente podemos ver una tabla donde se estipulan todas las condiciones de clasificación de estos líquidos según NFPA.

Tipo de Líquido	Clase	Sub-clase	Flashpoint	Ebullición	Presión de Vapor
Inflamable	Clase I	IA	por debajo de 73°F (22.8°C)	por debajo de 100°F (37.8°C)	hasta 40 psig @ 100°F (2,068.6 mm Hg @ 37.8°C)
		IB	por debajo de 73°F (22.8°C)	igual o mayor que 100°F [37.8°C -)	
		IC	desde 73° hasta debajo de 100°F, [22.8°C-37.8°C)	-	
Combustible	Clase II	-	desde 100° hasta debajo de 140°F, [37.8°C-60°C)	-	-
	Clase III	IIIA	desde 140° hasta debajo de 200°F, [60°C-93.4°C)		
		IIIB	igual o mayor que 200°F [93.4°C -)		

Tabla 5.2.1.2.1.1.1. Resumen de la clasificación de líquidos inflamables y combustibles de la NFPA.

5.2.1.2.1.1. Clasificación según la norma Británica

En el Reino Unido el British Standards Institution (1982), ha clasificado los líquidos con flashpoint inferiores a 32°C (89.6°F) como “altamente inflamables”. El aparato de

medida de este flashpoint es la “Copa Cerrada de Abel” (nótese que hay distintos aparatos de copa cerrada con diferencias dimensionales entre ellos). De allí se ha adjuntado a la legislación que utilizan de forma general para líquidos inflamables y combustibles (la cual incluye gases licuados del petróleo), para establecer una clasificación bastante más sencilla que la utilizada por NFPA, que presentamos a continuación:

- *Líquidos Altamente Inflamables*: aquellos con un flashpoint menor a 32°C (89.6°F).
- *Líquidos Inflamables*: aquellos con flashpoint entre 32°C (89.6°F) y 60°C (140°F).
- *Líquidos Combustibles*: aquellos con flashpoint sobre los 60°C (140°F).

Como puede verse la clasificación británica es mucho mas sencilla, pero aún conserva un nivel técnico que puede considerarse adecuado. Para los efectos de un estudio muy técnico, será mas adecuada la clasificación de la NFPA, por el rigor técnico que impone.

5.2.1.3. Ignición de Sólidos.

La ignición de sólidos tiene mucho parecido con la de los líquidos, aunque por el hecho de ser sustancias con partículas sumamente comprimidas su análisis se hace en algunos sentidos muy complejo. Los fenómenos de “flashpoint” y “firepoint” se dan igualmente en los sólidos como en los líquidos; nuevamente es fácil imaginar que el oxígeno difícilmente puede tener contacto directo con los átomos o moléculas dentro de los sólidos, y que es mas fácil que exista contacto con las superficiales y mas aún cuando las mismas se desprenden del sólido por sublimación, y se combinan con el oxígeno gaseoso.

Muchas veces la generación de éstos volátiles inflamables por parte de un sólido envuelve descomposiciones químicas con procesos irreversibles; además no hay un equilibrio de presión de vapor equivalente como en el caso de los líquidos, con lo cual era posible calcular de una forma sencilla el flashpoint en el caso de los combustibles líquidos; en los sólidos no se puede de esta forma.

El firepoint causa igualmente comprensiones de concepto controversiales en el caso de los sólidos por causa de las intrincadas estructuras atómicas y/o moleculares de los mismos; se podría suponer como una aproximación que el firepoint de un sólido puede ser definido en términos simples de temperatura superficial del sólido; pero lógicamente ésta

concepción tiene una validez limitada a las circunstancias de ignición del sólido; y en muchos casos se requiere de una definición detallada basada en un balance de calor en la superficie del sólido, que requieren de modelos diferenciales con respuestas sumamente complejas.

Los modelos tanto deterministas como probabilistas han sido desarrollados para sólidos considerando diversas situaciones y condiciones; cada uno es aplicable a un rango de condiciones para el cual ha sido investigado. Por ejemplo, en el caso de un flujo de calor continuo sin abrupciones, la condición “firepoint” puede ser caracterizada por una temperatura mínima de superficie en la cual el sólido desprende suficientes gases volátiles para dar oportunidad a una llama. Es posible a un investigador identificar un número de variables bajo las cuales se logra esta condición; por ejemplo efectos de la reacción química, acumulación de gases pelicularmente en la superficie, difusión de los gases, principios convectivos; y muchas otras variables que determinan en ése modelo específico cuando y como se llegará a la ignición. No significa que el modelo puede ser aplicado como un caso general para ese sólido; con simplemente transportar el mismo sólido y llevarlo a Alaska donde el clima es sumamente frío, todas las condiciones consideradas inicialmente cambiarán; igualmente sucederá si se lo lleva al desierto del Sahara; el modelo sólo será válido para las condiciones manipuladas y controladas durante la investigación del modelo.

Todo esto nos hace ver que a medida que se avanza en la “compresión de las moléculas” (gases-líquidos-sólidos), los modelos de ignición se complican. A los gases realmente no les interesa mucho donde estén; los modelos de ignición presentados en ésta literatura son perfectamente aplicables bajo la mayoría de las condiciones ambientales existentes en la tierra. Con los líquidos ya se vio que existen diferencias causadas por el medio y las circunstancias (se habló de temperaturas de flashpoint con copa abierta, con copa cerrada, con ventilación, por separación de superficie, etc.; también se vieron las diferencias en criterios investigativos y normativos entre Reino Unido. y U.S.A. por causas ambientales, etc.). Los sólidos dependen prácticamente del medio y de las circunstancias de cada caso, para encenderse; igualmente el medio y las circunstancias de cada caso nos darán un modelo válido que tiene que ser estudiado por separado en cada caso. Se dejan al lector interesantes referencias de famosas investigaciones como la de Steward en 1974; Sims en 1963 y Kanury en 1972; donde se pueden ver ejemplos de modelos con sólidos en base a lo que asume cada investigador acerca de las condiciones circundantes.

Existe un modelo que es ampliamente utilizado dentro del modelado de ignición en los sólidos; y es el modelo de difusión de calor, el cual ya ha sido visto en aplicación en

e.5.2.1.1.16 bajo el concepto de “ecuación general de transferencia de calor” y ahora desglosaremos brevemente en la siguiente sección, pues nos ayudará grandemente a entender el comportamiento del flujo de calor y de los modelos de ignición en sólidos.

5.2.1.3.1. La ecuación general de difusión de calor.

El modelo básico de la ecuación de difusión de calor en un objeto sólido fue propuesto por el francés Joseph Fourier en 1807, en las memorias de un estudio que realizó sobre la propagación del calor en los cuerpos sólidos. En el mismo estudio se encontraba la base de lo que luego en 1822 pasaría a ser conocido como la Teoría de las Series de Fourier, herramienta matemática que se usa ampliamente en muchas disciplinas hasta el día de hoy.

Fourier estipuló 3 conceptos básicos para su modelo:

1. Que la energía necesaria para llevar una masa a una temperatura T , es directamente proporcional a esa temperatura; lo que matemáticamente puede expresarse como:

$$e = K \cdot T \quad (\text{e.5.2.1.3.1.1})$$

donde e es la densidad de energía, T la temperatura del cuerpo y K es la constante de proporcionalidad (en algunos casos función) y relación de unidades que puede ser definida dependiendo de las características y unidades del modelo al cual quiera aplicarse. Tomará una definición propia en nuestro modelo en lo que sigue.

2. La energía fluye de las áreas con mayor temperatura a las áreas con menor temperatura, lo que puede expresarse como:

$$q(r) = -k \cdot \nabla T \quad (\text{e.5.2.1.3.1.2})$$

donde $q(r)$ es la función de flujo de energía o calor por unidad de volumen en la dirección r (dirección cualquiera, en coordenadas cartesianas puede ser x , y o z); k es una constante de relación que será característica de cada material que es llamada la *conductividad térmica*, la cual se considera constante en la mayor parte de los casos; y ∇T es la divergencia de la función de temperatura T , que no es nada mas que aplicar el operador nabla, que ya ha sido visto en e.5.2.1.1.17, a la función de temperatura.

En coordenadas cartesianas: $\nabla T = \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} + \frac{\partial T_z}{\partial z}$ (e.5.2.1.3.1.2.2)

3. La energía se conserva aún en los límites de frontera del cuerpo y en las condiciones iniciales y finales temporales. Esto puede ser ejemplificado al pensar en una barra unidimensional de la cual tomamos un elemento de análisis muy pequeño, con una longitud $\Delta L = x_2 - x_1$, donde x_1, x_2 son los puntos inicial y final del elemento de análisis. Se podrá observar que la energía contenida en ΔL en el instante t_2 será igual a la energía que tenía ΔL en el instante t_1 más lo que haya podido entrar en algún “flujo de energía” que penetre en los extremos x_1, x_2 en el intervalo de tiempo que se da de t_1 a t_2 .

Los conceptos 1 y 2 estipulados por Fourier son relaciones estáticas, o lo que se denomina también *relaciones o leyes constitutivas*, las cuales establecen relaciones de comportamiento puntuales e independientes del tiempo, entre sus variables, incluso en las derivadas de las funciones. El tercer concepto estipulado por Fourier, es una relación dinámica, es una *ley de conservación*, que establece una dependencia de las variables con el tiempo, por lo cual todo varía de un momento al siguiente, sin embargo ciertas cantidades (energía y masa en la mayor parte de las ocasiones) se conservan a través del tiempo a medida que se lleva a cabo un proceso. Este tercer concepto es el que hace que la ecuación de difusión de calor pueda ser aplicada con ciertos ajustes, a objetos o sustancias con cambio de masa y energía, como lo son los gases y líquidos en su mayor parte. Básicamente lo que se hace es postular la existencia de una o varias variables conservadas dentro de un proceso, y uno o varios flujos (funciones) que las satisfagan.

El ejemplo de la barra unidimensional del postulado 3, podría verse físicamente como:

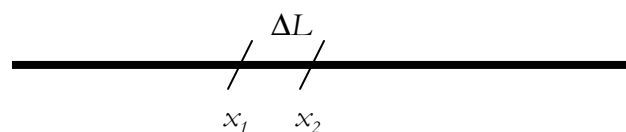


Imagen 5.2.1.3.1.1. Barra unidimensional donde se muestra un pequeño elemento de longitud para análisis de difusión de calor en un instante.

Como se expresó en el postulado 3, existe una variación de la energía en el intervalo diferencial en x , a medida que transcurre el tiempo de t_1 a t_2 . Esta variación energética puede ser calculada restando uno de otro los niveles de energía en t_1 y t_2 . Al tener una función de densidad de energía o potencial energético, integrando la misma a lo largo de la longitud física unidimensional en x : obtendremos la energía de ese tramo y restando esa función de ella misma integrada en 2 tiempos distintos obtendremos la variación energética en el tiempo:

$$\Delta e = \int_{\Delta L} (e(x, t_2) - e(x, t_1)) dx \quad (e.5.2.1.3.1.3)$$

Sin embargo al tener 2 estados distintos de tiempo, el análisis deja de ser estático y pasa a ser dinámico; y por Ley de la Conservación de la Energía, se conoce que es necesario que la diferencia energética calculada por la ecuación e.5.2.1.3.1.3, sea igual al “cambio en el flujo de energía o calor” que pasa de x_1 a x_2 en el intervalo de tiempo de t_1 a t_2 , el cual se expresa como:

$$\Delta q = \int_{t_1}^{t_2} (-q(x_2, t) + q(x_1, t)) dt \quad (e.5.2.1.3.1.4)$$

De acuerdo a esto la ecuación e.5.2.1.3.1.3, debe ser igual a la ecuación e.5.2.1.3.1.4, con lo que generamos una forma de ecuación de conservación de energía como:

$$\int_{t_1}^{t_2} (-q(x_2, t) + q(x_1, t)) dt = \int_{x_1}^{x_2} (e(x, t_2) - e(x, t_1)) dx \quad (e.5.2.1.3.1.5)$$

Si se pone atención la ecuación e.5.2.1.3.1.5 es igualmente dinámica en el tiempo al igual que la ecuación e.5.2.1.3.1.4; por lo cual el esquema dado por la imagen 5.2.1.3.1.1. se vuelve insuficiente, primeramente por la falta de dimensiones, pues la ecuación e.5.2.1.3.1.5 es bidimensional dinámica, mientras que la imagen 5.2.1.3.1.1. da una representación unidimensional estática.

La comprensión de la ecuación e.5.2.1.3.1.5, comienza incluyendo en la imagen 5.2.1.3.1.1., la dimensión faltante la cual es el tiempo t , lo cual en dados casos representa un

problema de entendimiento al no ser una dimensión espacial, y sugiere trabajar con teoría de la relatividad. Sin embargo en un análisis simple, el lector podrá darse cuenta que el tiempo es una dimensión siempre perpendicular a las dimensiones lineales (o curvilíneas) espaciales, un eje transversal sobre el cual la función cualquiera $f(t)$ dependiente del tiempo dará su dictamen del valor de la variable dependiente $f(t)$, en cada punto de las dimensiones espaciales con respecto al valor que tenga t . Adjudicando el eje perpendicular de forma gráfica a la imagen 5.2.1.3.1.1., tendremos:

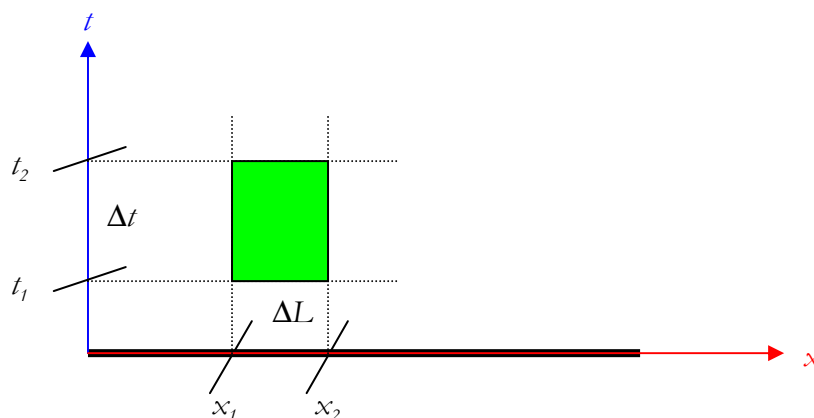


Imagen 5.2.1.3.1.2. Barra unidimensional donde se muestra un pequeño elemento de longitud para análisis de difusión de calor y se representa el dominio de análisis en un lapso de tiempo.

Si vemos bien la imagen 5.2.1.3.1.2. veremos que el rectángulo representa el dominio de la ecuación e.5.2.1.3.1.5, donde se da la combinación de los dominios de las ecuaciones e.5.2.1.3.1.3 y e.5.2.1.3.1.4, los cuales son los recorridos en los ejes x y t respectivamente. También se puede ver aquí que los dominios de las ecuaciones e.5.2.1.3.1.3 y e.5.2.1.3.1.4, son conjuntos simples unidimensionales (sobre una línea recta) mientras que el dominio de e.5.2.1.3.1.5, es un área que incluye todos los puntos y combinaciones posibles de puntos entre los conjuntos de los dominios de e.5.2.1.3.1.3 y e.5.2.1.3.1.4., con lo que se vuelve un dominio bidimensional. De esta forma aunque no lo parezca, e.5.2.1.3.1.5 es efectivamente una ecuación bidimensional cuyo dominio está formado por $\Delta L \times \Delta t$.

Para poder escribir la ecuación e.5.2.1.3.1.5, de una forma diferencial que podamos trabajar bidimensionalmente en ambos lados de la ecuación, podemos analizar que para un elemento muy pequeño en un intervalo muy pequeño de tiempo:

$$\int \frac{\partial}{\partial t} e(x, t) \cdot dt = \Delta e(x, t)_t = (e(x, t_2) - e(x, t_1)) \quad (\text{e.5.2.1.3.1.6})$$

lo que también puede expresarse como:

$$\int_t D_t e(x, t) dt = (e(x, t_2) - e(x, t_1)) \quad (\text{e.5.2.1.3.1.7})$$

De igual forma por medio de un análisis similar puede observarse que matemáticamente:

$$\int \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) \cdot dx = \Delta q(x, t)_x = (q(x_2, t) - q(x_1, t)) \quad (\text{e.5.2.1.3.1.8})$$

lo que también puede expresarse como:

$$\int_t D_x q(x, t) dx = (q(x_2, t) - q(x_1, t)) \quad (\text{e.5.2.1.3.1.9})$$

Utilizando las ecuaciones e.5.2.1.3.1.7 y e.5.2.1.3.1.9 para bidimensionar ambos lados de la ecuación e.5.2.1.3.1.5 al incluir los reemplazos pertinentes de sus resultados donde son encontrados en la ecuación e.5.2.1.3.1.5; obtenemos que:

$$\iint_{\Delta t \times \Delta x} -D_x q(x, t) dx \cdot dt = \iint_{\Delta t \times \Delta x} D_t e(x, t) dx \cdot dt \quad (\text{e.5.2.1.3.1.10})$$

Como el elemento es un rectángulo diferencial muy pequeño, puede verse que los integrandos (dx y dt), son diferenciales iguales entre sí, por lo cual se cancelan en la ecuación, dando por resultado:

$$-D_x q(x, t) = D_t e(x, t) \quad (\text{e.5.2.1.3.1.11})$$

la cual es una ecuación de forma diferencial puntual; que reemplazando por las ecuaciones definidas en e.5.2.1.3.1.1 y e.5.2.1.3.1.2, da por resultado:

$$D_x(k \cdot D_x T) = D_t(K \cdot T); \quad (\text{e.5.2.1.3.1.12})$$

lo cual desarrollamos

$$k \cdot D_{xx} T = K \cdot D_t T \quad (\text{e.5.2.1.3.1.13})$$

expresando en notación de derivadas parciales propiamente dichas:

$$k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = K \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.14})$$

(ecuación de conducción de calor unidimensional)

Ahora puede verse el sentido físico de los lados izquierdo y derecho de la ecuación e.5.2.1.3.1.14, la cual es la *ecuación de conducción de calor en una dimensión*. Partiendo de la ecuación e.5.2.1.3.1.11, la cual es la misma que e.5.2.1.3.1.14, es muy fácil ver que el lado izquierdo de e.5.2.1.3.1.14, es la “razón de cambio en x ” (D_x), de la función flujo de calor de Fourier definida por e.5.2.1.3.1.2, o sea que tanto varía ese flujo a medida que se mueve el punto de observación en la coordenada x .

El lado derecho e.5.2.1.3.1.14 da, igualmente prestando atención a e.5.2.1.3.1.11, es la “razón de cambio en t ” (D_t), del nivel de energía en el objeto en observación; o sea que tanto varía la energía interna total de este cuerpo a medida que pasa el tiempo. Como puede observarse la razón de cambio de éste nivel de energía da como resultado lo que llamamos un “almacenamiento de energía” el cual físicamente tendrá relación con la capacidad de almacenamiento calórico del cuerpo (o sea lo que comúnmente se conoce en ingeniería como calor específico, en este caso considerando invariable la presión, el cual denotaremos por C_p), y lógicamente con la característica del material de tener masa en un espacio dado o sea su densidad (la cual denotaremos en esta sección como ρ).

Aplicando lo anterior puede definirse para nuestro modelo de forma propia, la constante K presentada por la ecuación e.5.2.1.3.1.1, como:

$$K = \rho C_p \quad (\text{e.5.2.1.3.1.15})$$

con lo que puede escribirse la ecuación de conducción de calor unidimensional como:

$$k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.16})$$

(ecuación de conducción de calor unidimensional)

Para expresar una ecuación más general (multidimensional), es fácil ver que haciendo un desarrollo matemático similar al presentado, incluyendo las dimensiones y y z , podemos llegar a una ecuación análoga a (e.5.2.1.3.1.11), pero donde se incluyan las dos dimensiones nuevas:

$$-D_x q(x, y, z, t) - D_y q(x, y, z, t) - D_z q(x, y, z, t) = D_t e(x, y, z, t) \quad (\text{e.5.2.1.3.1.17})$$

y de aquí desarrollando análogamente se llega a:

$$k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.18})$$

la cual puede ser resumida como:

$$k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.19})$$

(ecuación de conducción de calor tridimensional en coordenadas cartesianas)

y utilizando la ecuación e.5.2.1.1.19, ya demostrada, escribimos:

$$k \cdot \nabla^2 T = \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.20})$$

(ecuación de conducción de calor tridimensional en cualquier sistema coordenado)

La ecuación anterior puede ser expresada en cualquier sistema coordenado, simplemente reemplazando el operador Laplaciano por su definición en el sistema coordenado que se desee.

Es importante hacer notar que dentro de las infinitas posibilidades del modelo, está la opción de que el cuerpo no solamente reciba calor del exterior en sus tres dimensiones espaciales; sino que podría ser que además de esto el mismo genere calor desde su interior;

con lo que se supone que el cuerpo podría tener una “fuente generadora de calor”. Lo dicho anteriormente no es un caso muy extraño; y en la vida real, es hasta bastante común. Como ejemplo tenemos una bombilla de luz, un carbón encendido que ha sido calentado por mucho tiempo y es sacado de su horno, o un elemento conductor eléctrico (cables, barras, etc.). La posibilidad de tener este ente generador de energía dentro del cuerpo sumaría cargas energéticas al lado izquierdo de la ecuación e.5.2.1.3.1.20, puesto que al final todas las energías que fluyen desde y hacia la masa del cuerpo tienen que tener un balance que las obliga a ser iguales a el cambio energético total de toda la masa del cuerpo; puesto que la sumatoria energética debe ser constante. De esta forma, la ecuación e.5.2.1.3.1.20 puede ser modificada para incluir una función de “*generación interna de energía*” la cual por ahora denotaremos por g , y aporta sumativamente a la ecuación de la siguiente manera:

$$k \cdot \nabla^2 T + g = \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.21})$$

(*ecuación general de conducción de calor con generación interna*)

El término o función de generación g , se define por medio de modelos de acuerdo a las características de la fuente generadora. El objetivo principal de éste trabajo es definir g , para una fuente generadora eléctrica cualquiera que libere calor por termoconducción. Este tema será desarrollado ampliamente en el siguiente capítulo.

La ecuación e.5.2.1.3.1.21 se conoce como ecuación general de conducción de calor, o ecuación general de difusión de calor, ya que contempla de manera general todos los elementos que podrían aportar en un momento dado a la conducción de calor en una sustancia o cuerpo. Su aplicación es sumamente amplia y su entendimiento conduce a un gran número de desarrollos posteriores, de modelos aplicados donde se utiliza ésta ecuación como una de las bases; incluyendo nuestros modelos.

En ingeniería energética y mecánica, es común encontrar la ecuación e.5.2.1.3.1.21 expresada en función de una característica llamada “*difusividad térmica*”, que tiene dimensiones de [longitud²/tiempo], la cual no es mas que un arreglo de las características del material en una sola constante de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.22})$$

k es la conductividad térmica con dimensiones de [energía/(tiempo-longitud-temperatura)] ó [potencia/(longitud-temperatura)]

ρ es la densidad del cuerpo con dimensiones de [masa/volumen]

C_p es el calor específico a presión constante con dimensiones de [energía/(masa-temperatura)].

Dividiendo toda la ecuación e.5.2.1.3.1.21 entre k , y reemplazando en el lado derecho por la difusividad térmica α :

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.23})$$

(ecuación general de conducción de calor)

Haciendo el análisis dimensional pertinente veremos que g es [energía/(tiempo-volumen)] ó [potencia/volumen], con lo que se puede definir a g como la energía o calor por unidad de volumen generada en un tiempo dado; y si el flujo de calor por volumen fue definido como q , entonces:

$$g = \frac{q}{t} = \dot{q} \quad (\text{e.5.2.1.3.1.24})$$

Muchos libros y literaturas de ingeniería ofrecen el desglose de esta ecuación partiendo del análisis dimensional de un elemento diferencial finito muy pequeño; estas literaturas se muestran en nuestras referencias, entre ellos libros de transferencia de calor cuyos autores son los que más hacen uso de este tipo de demostraciones. Yo he preferido ofrecer un análisis más físico y rigurosamente matemático, que dimensional para llegar a la misma respuesta, ya que me interesa que el lector este inmerso en la forma como llego a aplicar técnicas de modelado de una forma sencilla, pero sin dejar cabida a ambigüedades matemáticas y geométricas que en ocasiones surgen en la mente de los lectores, al tratar de interpretar figuras volumétricas que deben ser expresadas en un plano como es el papel, a forma de figuras isométricas. No quiero decir con esto que las demostraciones a partir de un cubo diferencial son inválidas; son igualmente válidas, y el lector puede consultarlas si

de hecho llega con ellas a un mejor entendimiento del modelo; para ello están las referencias bibliográficas que recomendamos en el área de transferencia de calor.

5.3 Bibliografía Relacionada del Capítulo V

Drysdale Douglas (1985). *Fire Dynamics (An Introduction to)*. John Wiley and Sons, St. Edmundsbury, 424 pp.

Fire Protection Handbook 20 edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.

Frank-Kamenetskii. *Thermal Ignition Tutorial: Frank-Kamenetskii Theory - Frank-Kamenetskii's Model*, URL: www.leeds.ac.uk/fuel/tutorial/frank/model.html
[consulta: 5 julio 2009]

McCaffrey, B (1981). *Some Measurements of the Radiative Power Output of Diffusion Flames*, Western States Section Meeting of the Combustion Institute, U.S.A., Paper WSS/CI 81-15.

NFPA 30: *Líquidos Inflamables y Combustibles.*, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

NFPA 54: *Código Nacional de Gases Combustibles.*, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2009.

NFPA 58: *Código de Gases Licuados de Petróleo.*, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

NFPA 68: *Estándares de Protección de Explosiones por medio de Compuertas de Deflagración.*, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007.

NFPA 221: *Standard for Fire Walls and Fire Barrier Walls*, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 251: Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 255: Standard Method of Test of Surface Burning Characteristics of Building Materials , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2000.

NFPA 259: Standard Test Method for Potential Heat of Building Materials , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 1998.

NFPA-921: Guide for Fire and Explosion Investigations , National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008

Quintiere, James (2006). Fundamentals of Fire Phenomena, John Wiley & Sons LTD, Chichester, England, 439 pp.

Rohsenow, W.; Hartnett, J.; Cho, J. (1998). Handbook of Heat Transfer, McGraw – Hill, U.S.A., 1344 pp

Rudin, Walter (1964). Principles of Matematical Análisis, McGraw – Hill, New York, 270 pp.

Semenov. Thermal Ignition Tutorial: Semenov's Theory - Semenov's Model, URL: www.leeds.ac.uk/fuel/tutorial/semenov/model.html
[consulta: 10 julio 2009]

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002.

Welty, James (1978). Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería, Limusa, México, 545 pp.

Welty, James (2001). Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa, Limusa – Wiley, México, 929 pp.

CAPÍTULO VI

Deducción de un Modelo Matemático para una Fuente Generadora de Incendios Eléctricos por Termoconducción (Desarrollo del Modelo)

EN ESTE CAPÍTULO:

- 6.1 Consideraciones introductorias a la deducción del modelo.
- 6.2 Deducción de un modelo que relacione el Voltaje y la Corriente en un Conductor, cuando el mismo se encuentra fuera de su rango normal de operación.
 - 6.2.1 La composición de la materia y su relación con la energía
 - 6.2.2 El movimiento de cargas y la materia.
 - 6.2.3 Formación de la Corriente en un Conductor.
 - 6.2.4 Continuidad de la Corriente en un Conductor.
 - 6.2.5 Un punto de vista simple acerca de la cinemática de las cargas.
 - 6.2.6 Buscando la forma general de la Ley de Ohm a partir de la forma puntual.
 - 6.2.7 Corrección de la Ley General de Ohm; su dependencia con la temperatura.
 - 6.2.8 Encontrando un modelo que reemplace a la Ley de Ohm y que tome en cuenta funciones variables con la temperatura sin necesidad de aproximarlas a constantes.
 - 6.2.9 Análisis físico y geométrico de un conductor lineal.
 - 6.2.10 Encontrando un modelo que reemplace a la Ley de Ohm, que tome en cuenta funciones variables con la temperatura y que considere el análisis físico y geométrico del conductor.
- 6.3 Relación entre la Energía Eléctrica y el Calor Disipado, adaptada a nuestro modelo.
 - 6.3.1 La ley de Joule aplicada.
 - 6.3.2 El modelo de la fuente generadora de potencia eléctrica en forma de calor.
- 6.4 Bibliografía Relacionada del Capítulo VI.

CAPITULO VI

Deducción de un Modelo Matemático para una Fuente Generadora de Incendios Eléctricos por Termo-conducción. (Desarrollo del Modelo)

6.1. Consideraciones introductorias a la deducción del modelo.

Con el objetivo de presentar ahora un análisis físico-matemático formal por medio del cual se puede llegar a relaciones matemáticas que modelan una fuente generadora de calor para un elemento que conduce corriente eléctrica, se desglosará en este capítulo un modelo matemático que pueda ser utilizado como base general para futuras adecuaciones, introducción de variables y constantes de modelado dependiendo de cada caso particular y modificación de factores de comportamiento con respecto del tiempo. El modelo general es un concepto propio y totalmente nuevo, sin embargo está basado en hechos físicos y modelos físico-matemáticos demostrados, los cuales ya han sido presentados en el capítulo anterior; y bajo la cobertura de la presente investigación se realizaron experimentos de prueba a un nivel general, y se utilizaron eventos reales de incendios eléctricos para dar un nivel de corroboración a la validez del modelo.

Como se pudo ver en la sección 5.2.1.3.1., se ha demostrado que puede modelarse de forma general la conducción de calor de un objeto con generación interna por medio de la ecuación:

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{e.6.1.1})$$

En la sección citada, se indicó también de donde salen cada una de las variables y constantes de esta ecuación, que en general para todos los eventos de termoconducción tienen definiciones similares, excepto por el termino de generación interna de calor por unidad de volumen g , el cual está supeditado a la forma como puede darse esta generación, pero no puede ser incluida en el modelo descrito por e.5.2.1.3.1.23, pues el modelo propio de g tendrá que ver con las causas que producen este calor.

También se vio que g puede ser expresado como:

$$g = \frac{q}{t} = \dot{q} \quad (\text{e.6.1.2})$$

lo que es el calor disipado por unidad de volumen por unidad de tiempo. Si se encuentra el calor disipado por unidad de tiempo, y si el mismo fuera constante en todo el volumen del cuerpo, al dividirlo entre el volumen total del cuerpo, ya se tendría el valor de g . Este calor disipado por unidad de tiempo es la potencia que se gasta generando calor; y en muchos casos no es tan simple como dividir constantes pues los cuerpos reales no tienen comportamientos isovolumétricos (iguales en todo su volumen), para los movimientos de energía que en ellos se producen.

Nuestro objetivo específico en éste momento será alcanzar un modelo por medio del cual se pueda definir el comportamiento de gasto de potencia, que básicamente busca definir el tamaño real (dependiente de variables y condiciones específicas) del bloque de energía en un rango de tiempo, que produce una potencia que puede ser ingresada en el lugar de g para completar un modelo de termoconducción tipo campo, que considere una fuente generadora de calor eléctrica con sus variables. La innovación en el modelo estará volcada a la definición de una potencia generada, que pueda ser definida y modelada determinísticamente, de forma que considere todos los factores que bajo la luz de la presente investigación marcaron importancia, en la concepción de un modelo de fuente de potencia eléctrica que se transforme en el calor que puede producir un incendio por termoconducción, y no por arco.

Comenzaremos nuestro análisis físico-matemático estipulando condiciones que ya han sido estudiadas y definidas por la Teoría Electromagnética, como lo son las condiciones clásicas del movimiento electrónico en un material conductor cualquiera, formación de campos y densidades de corrientes, la Ley de Ohm y sus expresiones en forma puntual, general y particular por medio de la definición de campos tensoriales eléctricos; luego estableceremos relaciones de dependencia con la temperatura entre los materiales y sus cargas, verificaremos y estableceremos los primeros vínculos de comparación con modelos de termoconducción que han sido propuestos antes y nuestro modelo ya mejorado y con mas variables de dependencia; se deducirán nuevas relaciones de voltajes y corrientes nunca antes presentadas, dependientes de las condiciones del medio para poder modelar térmicamente las variaciones de éstos parámetros; se corrobora la relación entre la energía eléctrica y el calor disipado por medio de la Ley de Joule, la cual es

incluida en el desarrollo de nuestro modelo, y por último se concluye esta sección con la presentación del modelo de potencia disipada en calor, dependiente de todas las variables estudiadas y consideradas a lo largo del estudio realizado.

6.2. Deducción de un modelo que relacione el Voltaje y la Corriente en un Conductor, cuando el mismo se encuentra fuera de su rango normal de operación.

6.2.1. La composición de la materia y su relación con la energía

Toda la materia esta compuesta en su definición mas finita de partículas estables por átomos, los cuales forman moléculas y éstas a su vez forman grandes cadenas que enlazan grandes cantidades de las mismas dando lugar a las masas y cuerpos. Los átomos tienen a su vez partículas subatómicas, dentro de las cuales, la física clásica estipula tres principales, que son a saber los protones, los neutrones y los electrones. Los últimos estudios de física de la partícula han definido a los quarks que componen protones y neutrones, al igual que partículas producidas por procesos radioactivos y de dispersión como los fotones, neutrinos y muons; en el caso de los fotones se ve desde hace ya algún tiempo el enlace con la física cuántica, y la definición de la onda-partícula.

El enfoque electrónico más sencillo, lógicamente se vuelca a la definición dada por la formación de los átomos con un núcleo (con los protones y neutrones) y los electrones girando alrededor. El núcleo atómico tiene todas las cargas positivas del átomo (en sus protones); mientras que las cargas negativas que le dan el equilibrio eléctrico, giran alrededor del mismo en los electrones. Un átomo (o molécula) es eléctricamente neutro cuando tiene igual cantidad de protones que de electrones, lo que es común, sin embargo, también es común que muchas clases de átomos o moléculas pierdan o ganen electrones; creando un desequilibrio eléctrico en la estructura de la partícula.

También están los positrones, llamados también “electrón positivo”, que son partículas con una masa igual al electrón pero con carga igual a la del protón. Estos últimos están libres muy raras veces, y resultan de la desintegración atómica de los materiales radioactivos artificiales, donde se cree que de los protones salen, neutrones, positrones y neutrinos, pero el positrón parece tener una vida media muy corta, de solo milésimas de microsegundo, pues transcurrido ese tiempo ya habrá chocado por atracción con un electrón, realizando su unión y mutua aniquilación al convertir sus masas en energía radiante en forma de rayos γ .

Hoy en día, ya conocemos que también puede darse el proceso inverso, es decir obtener partículas cargadas como positrones y electrones a partir de energía radiante como lo son los rayos γ . Si una radiación de energía suficientemente alta atraviesa la materia, se generan positrones y electrones. La sustancia material de las partículas se crea por transformación de la energía en masa, de acuerdo con la ecuación de Einstein:

$$E = m \times c^2 \quad (\text{e.6.2.1.1.})$$

donde E es la cantidad de energía, m es la cantidad de masa relacionada y c^2 es la velocidad de la luz al cuadrado.

El neutrino, anteriormente mencionado, es una partícula que nació hipotéticamente, sin carga, y masa casi nula. Su existencia fue postulada porque era necesario introducir una energía y cantidad de movimiento convenientes en el balance de la ecuación de la desintegración del protón, con el único objeto de que siga verificándose la ley de la conservación de la energía y la cantidad de movimiento mientras se efectúa el proceso; de lo contrario no se puede balancear la ecuación, lo que nos daría cabida a una discusión mucho mas amplia, la cual sería la suposición de que la energía total del universo realmente no sea una constante; en la cual no deseamos entrar en éste momento pues no es necesaria para el cumplimiento de nuestros objetivos en éste proyecto.

Hay diferentes clases de neutrinos, actualmente hay bien definidos por lo menos tres, los cuales son el neutrino electrón, neutrino muon y el neutrino tauon; y cada tipo tiene también su antineutrino que son sus antipartículas correspondientes al momento de las transformaciones materia-luz y viceversa.

Los primeros neutrinos en teorizarse, fueron los neutrinos electrón, propuestos por Wolfgang Pauli en 1930; al final de los `40, fue propuesto el neutrino muon y a mediados de los `70 el neutrino tauon. Al día de hoy, los tres tipos de neutrinos tienen experimentos realizados que indican su existencia real.

El modelo por medio del cual se representa la existencia de los distintos tipos de neutrinos se conoce como Modelo Standard, y el mismo está compuesto de dos grandes grupos de partículas elementales llamadas Fermions; los mismos son los Quarks y los Leptons. Los tres tipos de neutrinos explicados entran dentro del grupo de los Leptons, y el tipo de interacción que llevan a cabo se conoce como “interacción débil y gravitación”,

ya que los Fermions en general son clasificados de acuerdo a como interactúan entre ellos (lo que es equivalente a analizar que tipo de carga transportan). Están estipuladas tres generaciones de Fermions, formando pares de partículas por cada clasificación, de acuerdo a como exhiben comportamientos físicos similares.

Los Quarks son las partículas representadas en el Modelo Standard como de interacción fuerte; igualmente que con los Leptons (donde se encuentran los neutrinos), hay seis clases de Quarks; los cuales son de arriba, de abajo, encantado, extraño, cumbre y de fondo, (son mas conocidos por sus denominaciones inglesas: up, down, charm, strange, top, bottom); igualmente agrupados en pares de acuerdo a sus interacciones. La propiedad principal que define los Quarks es que transportan carga de color, y por esto interactúan bajo “interacción fuerte”.

Es muy difícil detectar Leptons (en general neutrinos) por su tipo de interacción débil, pero los Quarks, son mucho más fáciles, por su interacción fuerte. En la actualidad se cree que el comportamiento de limitación infrarrojo de la fuerza fuerte causo quarks que existieron permanentemente (o al menos desde muy poco después el principio de la Gran Explosión) con lo que se ató el uno al otro, formando partículas en color neutras compuestas (llamadas hadrons) conteniendo quark y un antiquark (llamados mesons) o tres quarks (llamados baryons). Los ya familiares “protones” y “neutrones”, que son el modelo más sencillo y ampliamente aceptado de la composición atómica, son descritos según el Modelo Standard como dos baryons con masa muy pequeña. De aquí que en principio hablamos de que los protones y neutrones están compuestos de Quarks. Los Quarks, además de transportar carga eléctrica, también tienen giros débiles sobre sus propios ejes (isospín). De allí que ellos pueden interactuar con otros Fermions, tanto por la vía electromagnética como por la vía de interacciones nucleares débiles.

En la siguiente tabla puede verse la organización de los Fermions, según el Modelo Standard, aceptado por la física moderna.

Organización de Fermions

	Carga	Primera Generación		Segunda Generación		Tercera Generación	
Quarks	+2/3	Up	u	Charm	c	Top	t
	-1/3	Down	d	Strange	s	Bottom	b
Leptons	-1	Electron	e ⁻	Muon	μ ⁻	Tauon	τ ⁻
	0	Electron neutrino	ν _e	Muon neutrino	ν _μ	Tauon neutrino	ν _τ

Tabla 6.2.1.1. Organización de las tres generaciones de partículas elementales (Fermions) contempladas en el Modelo Standard.

Cada miembro de una generación de partículas elementales, tiene mayor masa que la correspondiente partícula de de generaciones inferiores. La primera generación está compuesta de partículas que no decaen, de allí que toda la materia ordinaria que conocemos (baryonica), esta formada por estas partículas; es decir, todos los átomos como los conocemos, están conformados por electrones, orbitando núcleos atómicos que ultimadamente vienen a estar constituidos por Quarks tipo “up” y “down”. La segunda y tercera generación de partículas cargadas decaen o desaparecen después de vidas medias muy cortas, y son partículas que pueden ser observadas solamente en ambientes muy altamente energizados. Los neutrinos de todas las generaciones no decaen; incluso se cree que están por todo el universo, pero muy rara vez interactúan con partículas baryonicas de la materia.

El fotón, aunque no es una de las partículas que intervienen en la constitución de la materia, tiene para nosotros gran importancia; podemos imaginarlo como un pequeño paquete de energía radiante. El mismo no tiene masa o sustancia material alguna, pero al utilizar la ecuación e.6.1.3., puede asociársele una masa equivalente a su energía. El valor de la energía del fotón depende de la frecuencia o color de la radiación. El calor, la luz, las ondas de radio, rayos X y otras ondas electromagnéticas están constituidos por grupos o racimos de fotones. Se puede imaginar la propagación de estas ondas como un tren de partículas, y al mismo tiempo como una onda. Una vez que la energía sale de la materia en general puede considerarse que viaja en fotones. Estos fotones pueden llegar a otros

cuerpos de energía, interactuando con ellos nuevamente. En el caso del calor, el mismo puede viajar en el vacío en forma de fotones; y calentar otros cuerpos a distancias considerables de la fuente de energía de donde salió el calor. Este hecho es una de las bases fundamentales que sustenta una de las hipótesis medulares de éste proyecto, de que el calor producido por una fuente de energía tal como un conductor eléctrico puede calentar por radiación algún otro cuerpo que no esté necesariamente en contacto con el conductor; hasta llegar a la ignición del mismo.

6.2.2. El movimiento de cargas y la materia.

En la sección anterior hemos dado un pantallazo general muy rápido de las teorías mas aceptadas en la actualidad, acerca de la composición de la materia; para que podamos entender de una forma adecuada el tema que tratamos. Se mencionaron varias tendencias y sistemas lógicos que explican la composición de la materia desde sus partículas mas pequeñas; de las cuales, la mas novedosa es el Modelo Standard; sin embargo es casi seguro que, como lo ha sido hasta ahora, estas teorías de la composición física de la materia, seguirán siendo modificadas, evolucionando según se vayan dando nuevos descubrimientos que nos lleven a una explicación mas precisa de la estructura de las partículas elementales.

Aunque en la composición de la materia se encuentra la base física fundamental que sustenta nuestra investigación; nosotros en particular no necesitamos seguir profundizando acerca de la estructura de partículas elementales; ya que con lo que tenemos hasta ahora, tenemos base suficiente para generar un modelo muy preciso que pueda ser utilizado exclusivamente como modelo de movimiento de cargas; sin la necesidad detenerse por causa de ambigüedades o misterios sin resolver, propios de otras características de la composición de la materia. Esto se puede hacer porque en todos los modelos físicos solo hay una situación en las que están totalmente de acuerdo; y la misma es que hay dos tipos de cargas; las positivas, y las negativas; y la ausencia total de cargas le llaman carga neutra. Con base en esto, e independientemente del valor del módulo de la carga que seleccionemos (o sea la magnitud de la carga elemental); podemos establecer un modelo de cargas; donde de hecho, siempre existirá un nivel de carga mas positivo que el otro; por lo tanto, uno puede ser definido como el positivo y el otro como negativo en el sistema de referencia estudiado; aunque el negativo de este sistema de referencia sea positivo con respecto de algún otro sistema. En lo que sigue explicamos la sencillez de nuestro punto; tomando como base incluso, el modelo mas sencillo de la composición de la materia; el

modelo atómico (protones y neutrones en el núcleo y electrones girando alrededor); pues no es necesario utilizar algo más preciso en identificación de masas, ya que la precisión con respecto de cargas eléctricas continúa siendo la misma (cargas positivas y negativas); y en los modelos más avanzados, las cargas libres comunes siguen siendo idénticas a las del modelo atómico (los electrones), a excepción de procesos que involucran niveles energéticos transitorios muy elevados que no se encuentran dentro del marco de análisis de nuestra investigación.

La teoría que mejor explica estas condiciones es la de los “*electrones de valencia*”, la cual estipula que los átomos tienen niveles de cohesión con sus electrones que se llaman niveles de valencia que forman capas alrededor del núcleo. Aquellos niveles que están más alejados del núcleo son los de aquellos electrones que tienen menor cohesión con el núcleo, por lo tanto en esos niveles se pueden perder o ganar electrones con facilidad. Según esta teoría se pueden explicar los enlaces químicos de los átomos (formando moléculas o enlaces simples atómicos para formar materia), conociendo que los átomos pueden compartir en sus últimas capas de valencia, electrones en común, con lo cual se mantienen unidos por la formación de lo que llaman un enlace. Estos enlaces pueden darse también por intercambio de electrones en lugar de compartición de los mismos. Según sea el número de los electrones que pueden ser intercambiados o compartidos; será el número de enlaces que puede formar éste átomo con otros.

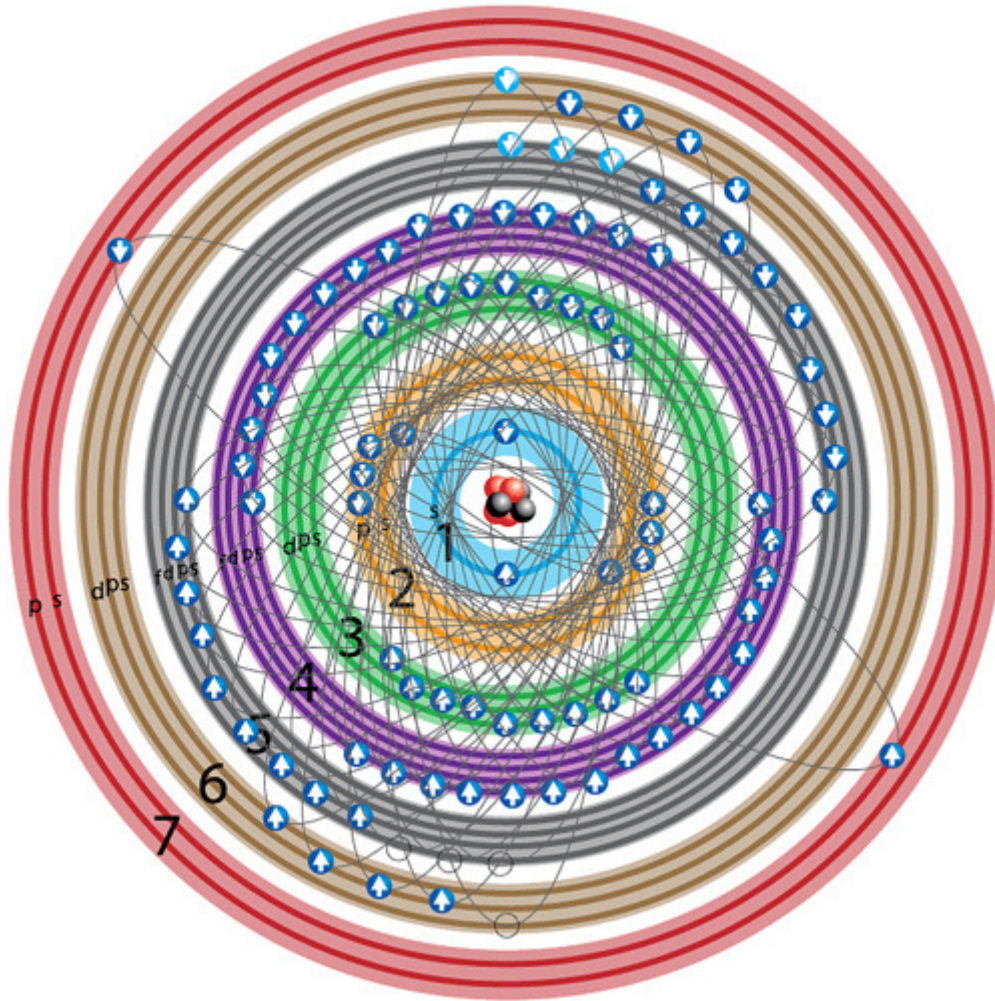


Imagen 6.2.2.1. Representación gráfica de la estructura atómica de un átomo de uranio, donde se aprecian las capas de electrones de valencia; aquellas capas más alejadas del núcleo son las que tienen la posibilidad de perder o ganar electrones. (Tomado de http://farm2.static.flickr.com/1346/579773096_91204c86a5.jpg)

Para nosotros en éste trabajo es importante el último tipo de enlace explicado. Cuando los átomos se enlazan compartiendo electrones; al enlace se le da nombre de *enlace iónico*, y si los comparten de tal forma que logran estabilidad se le da el nombre de *enlace covalente*; pero cuando se enlazan por medio de intercambio de electrones libres se le da nombre de *enlace metálico*. Existen otros enlaces como los de Van der Waals, aparte de los ya mencionados, sin embargo para nuestros objetivos no requerimos de mayores explicaciones acerca de la estructura atómica y sus posibles enlaces que la que ya se ha dado, pues solo nos interesan aquellos materiales que tienen *enlaces metálicos* donde hay una buena cantidad de electrones libres, lo que facilita la conductividad eléctrica; por lo cual a éste tipo de materiales se los llama *conductores eléctricos*. El lector interesado podrá encontrar

mucha mas información de estructura atómica, y enlaces químicos en la bibliografía relacionada.

De ahora en adelante nos concentraremos para nuestro análisis y demostraciones en las cargas libres de la materia; lo cual físicamente ha sido explicado por medio de los “electrones libres”. Sin embargo es bueno hacer la salvedad desde éste momento que en las ciencias de la electricidad, las cargas son consideradas polarmente, es decir; si tienes cargas libres negativas (en caso de los electrones), cuando esta carga se mueve de su posición, en su lugar quedará lo que ha correspondido a llamarse un hueco (seguramente por el hecho de pensar que existía una pequeña materia en ese lugar que era el electrón y el mismo se movió, dejando el espacio vacío); y si bien es cierto este hueco ya no tiene masa, y no la tendrá a menos que venga otro electrón a llenarlo; mientras el mismo esta vacío tampoco tiene carga negativa; por lo que su potencial se incrementa.

Este hecho da como resultado que se interprete al hueco como una carga de la polaridad contraria o sea positiva (aunque de hecho si por ejemplo un positrón tomara esta posición, entonces nivel de potencial del hueco sería negativo con respecto del potencial del positrón). Es importante recalcar que esto no quiere decir que “un protón” sale de su núcleo y llena el hueco; esto es falso; el hueco queda libre y queda con un potencial de referencia que es mayor que el potencial del electrón. Seguramente de poder ubicar un protón en el hueco, el potencial eléctrico del mismo se incrementaría aún más, con lo que tendríamos 3 niveles de potenciales; los de los electrones, los de los huecos y los de los protones. Pero como comúnmente los protones no son cargas libres (y en el caso de los positrones ya se ha visto que tienen un tiempo de vida muy corto), por lo cual no están incluidos en nuestro análisis de movimiento de cargas. Es importante que el lector tenga presente esto, pues un tema que parece sencillo podría llevar a una gran confusión cuando se hable de flujo de cargas positivas de aquí en adelante; pues nos estaremos refiriendo al “flujo de los huecos”; el cual es similar y en dirección contraria al flujo de los electrones; con lo que se consigue “polarizar” el modelo de los sistemas eléctricos, y realmente es de esta forma como se dan los hechos.

Luego de esto puede verse que para analizar cualquier sistema eléctrico solo es necesario considerar un solo tipo de portador de carga (positiva o negativa) pues el tipo contrario a la carga seleccionada tendrá el mismo comportamiento, en igual magnitud y dirección vectorial, pero sentido contrario a la carga analizada, y esto es incluso independiente del sistema o teoría de partículas elementales que se haya utilizado para definir la materia estudiada.

6.2.3. Formación de la Corriente en un Conductor.

Con base en lo analizado previamente, consideramos un medio con un solo tipo de portador de carga en movimiento, y denotaremos:

N = número de portadores por unidad de volumen

\bar{v} = velocidad media de deriva de los portadores

dA = diferencial de área

dt = diferencial de tiempo

\bar{n} = vector unitario perpendicular a la superficie dA

Durante un tiempo dt , cada portador recorrerá en promedio una distancia $\bar{v} \cdot dt$. Cuando el material está eléctricamente neutro, todas las velocidades de deriva de los portadores son aleatorias y en general se mueven en una cantidad infinita de direcciones, con lo que es fácil ver por conceptos de probabilidad estándar que se cancelarán unos con otros y la suma de los desplazamientos totales de los portadores es cero.

En un material sometido a una diferencia de potencial entre sus extremos (un voltaje), los portadores de carga se alinearán para moverse todos en una misma dirección, (por el mismo efecto físico que mantiene a los átomos amarrados, aquellas cargas iguales se atraen y las diferentes se repelen); donde las cargas se alejarán del polo con cargas más similares a ellas y se acercarán al polo con cargas opuestas a ellas.

Es muy posible que la dirección del movimiento de las cargas no sea perfectamente perpendicular a la sección del material que nos venga fácil de analizar, por lo que un esquema general de este movimiento de cargas sería el que muestra la imagen 6.2.3.1.

Analizando las magnitudes geométrica y vectorialmente, se puede ver que realmente la distancia perpendicular de recorrido de cargas respecto de la superficie dA , será la proyección de $\bar{v} \cdot dt$ sobre el vector unitario direccional \bar{n} . En la imagen, se muestra un análisis gráfico de esta situación, y se resuelve por medio de los productos escalares $\bar{n} \cdot \bar{v} \cdot dt$.

En general esta distancia recorrida será menor que la distancia que realmente viaja la carga y solo se logrará recorrer la distancia máxima $\bar{v} \cdot dt$, si y solo si la línea de polarización dada por el campo eléctrico que empuja las cargas tiene exactamente la misma dirección que el vector direccional \bar{n} .

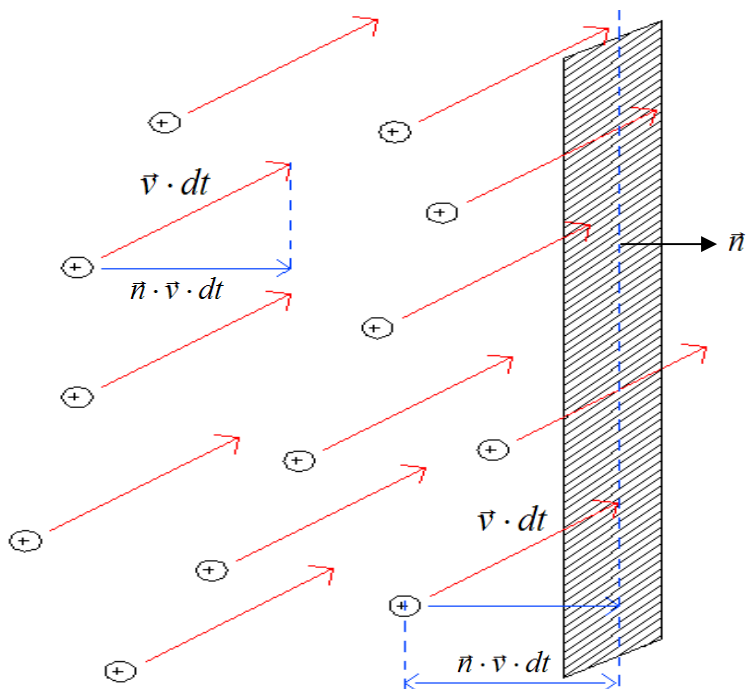


Imagen 6.2.3.1. Representación gráfica de un flujo de cargas uniformes, a través de un elemento diferencial de superficie dA .

La cantidad de portadores de carga por unidad de volumen N , presentes en el volumen de control analizado, me dará la carga total que pasa por el área representada por dA , en el tiempo dt , al ser expandidos a todo el volumen de control. Si esa cantidad de portadores de carga fuese modelada por una distribución volumétrica de portadores de cargas, llamémosle ρ , dada en unidades de Coulomb por metro cúbico (C/m^3), entonces se podría definir un “elemento diferencial de carga”, que podría funcionar como un portador de carga estandarizado, modelado matemáticamente por medio de una ecuación diferencial. Esto nos será de gran ayuda puesto que es muy difícil determinar la distribución física real de los portadores de carga en los materiales, por lo cual en base a sus efectos se pueden aproximar distribuciones paralelas, definidas en base a elementos diferenciales de carga de la siguiente forma:

$$dQ = \rho \cdot dV \quad (\text{ecuación general del elemento diferencial de carga}) \quad (\text{e.6.2.3.1.})$$

donde dV representa un elemento diferencial del volumen analizado, que para el caso de la imagen 6.2.3.1. sería:

$$dV = \bar{v} \cdot \bar{n} \cdot dt \cdot dA \quad (\text{e.6.2.3.2.})$$

y para el mismo caso de la imagen 6.2.3.1., la distribución de carga ρ , podría ser modelada de acuerdo a los elementos ya definidos como:

$$\rho = q \cdot N \quad (\text{densidad de carga de la imagen 6.2.3.1.}) \quad (\text{e.6.2.3.3.})$$

donde el valor de q , será el valor de la carga elemental, el cual como ya se vio en la sección 6.2.2., puede ser el valor que queramos, de acuerdo al sistema de composición de la materia que estemos utilizando; y los resultados no variarán. Por lo general, y por mucho tiempo, se ha utilizado como valor elemental, la carga de un electrón (o de un protón); la cual es de 1.6×10^{-19} Coulombs; y a este valor se le ha dado el nombre de “carga eléctrica elemental”, y se ha denotado como “ e ”. A pesar de que como ya se ha visto, los Quarks tienen cargas de $1/3$ y $2/3$ de la carga e ; hasta hoy no se ha conseguido verlos estables, libres en el ambiente, ni en ninguna fase común en la naturaleza o el universo; por lo que la carga del electrón sigue siendo el valor más aceptado; pero en nuestro modelo, se podría utilizar cualquier otro valor como referencia de carga elemental, sin variaciones en los resultados, ya que se referenciarían los mismos al valor que tomemos para q .

Utilizando las ecuaciones e.6.2.3.3. y e.6.2.3.2., se puede escribir e.6.2.3.1. en función de la carga elemental y su estado de movimiento (o velocidad), de la siguiente forma:

$$dQ = q \cdot N \cdot \bar{v} \cdot \bar{n} \cdot dt \cdot dA \quad (\text{e.6.2.3.4.})$$

Como queremos establecer una rata continua (aunque no necesariamente constante) de flujo de cargas, definimos la corriente I como la función de flujo de carga Q por unidad de tiempo t a través de la superficie A . De esta forma podemos definir una cantidad infinitesimal de corriente dI , con la siguiente ecuación:

$$dI = \frac{dQ}{dt} = \frac{q \cdot N \cdot \bar{v} \cdot \bar{n} \cdot dt \cdot dA}{dt} = q \cdot N \cdot \bar{v} \cdot \bar{n} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.3.5.})$$

Si se quisiera presentar una expansión general de la ecuación anterior, tendríamos que tomar en cuenta la sumatoria general de todas las cargas presentes en el cuerpo analizado como un macro, y no solo las que están presentes en el pequeño volumen de control diferencial, presentado por la imagen 6.2.3.1. Es importante considerar que el número de portadores por unidad de volumen N puede variar dependiendo del punto donde se encuentre en el cuerpo macro analizado; pues en muchos casos la distribución de portadores, no es isotrópica ni constante en todo el cuerpo, por lo que se podría caer incluso en varias sumatorias, o incluso funciones de sumatorias para representar el valor de N . Igualmente sucede con las velocidades; no necesariamente todos los portadores del cuerpo están igualmente excitados; con lo que se cae en distintos niveles de velocidad a lo largo y ancho del cuerpo real que quiera analizarse.

Una ecuación representativa general de esto sería:

$$dI = \sum_{i=1}^n [q_i \cdot N_i \cdot \vec{v}_i] \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.3.6.})$$

La ecuación e.6.2.3.5. representa un modelo aplicable para cualquier movimiento de cargas (incluso el aleatorio), no tiene que ser un movimiento ordenado; y se ve de esta forma debido al factor de sumatoria infinitesimal encerrado entre corchetes. Lo cierto es que este factor puede ser conceptualizado y resumido a otra función representativa y más fácil de utilizar en los casos de movimientos ordenados de cargas (que son los que nos interesan). La función específica ya ha sido utilizada por la física clásica en el estudio de campos electromagnéticos, y recibe el nombre de “densidad volumétrica de corriente” o simplemente “densidad de corriente”, y su representación esta dada por el tensor \vec{J} , siendo definido matemáticamente como:

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \cdot \vec{v}_i \quad (\text{e.6.2.3.7.})$$

donde en la mayoría de los casos, $n = \infty$, por lo cual se hacen aproximaciones modeladas por funciones vectoriales.

Es importante notar que igualmente a lo que se analizó con la imagen 6.2.3.1., puede verse que la magnitud de \vec{J} que tendrá efecto de forma efectiva para el aporte de corriente, será solo aquella parte que es perpendicular al área transversal representada en la imagen por el elemento dA , o sea aquella parte que sea paralela al vector \vec{n} . Si toda la distribución de densidad de corriente, fuese perpendicular a \vec{n} , aunque exista \vec{J} , no habrá corriente.

Ahora podemos establecer una relación entre la densidad volumétrica de corriente \vec{J} , y la distribución volumétrica de cargas ρ ; conociendo la ecuación e.6.2.3.3., la cual aplica para el elemento diferencial dado por la imagen 6.2.3.1.; podemos expandirlo a una aplicación macro, general como

$$\rho = \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \quad (\text{densidad de carga global de un macro cuerpo}) \quad (\text{e.6.2.3.8.})$$

donde no hemos establecido diferencias entre los símbolos de la ecuación 6.2.3.3. y el de la 6.2.3.8., porque realmente pueden ser representados por la misma función de densidad de carga ρ , pues la misma representa la cantidad de cargas por unidad de volumen, y realmente mientras más pequeña sea la muestra en volumen, mas precisa será la función de densidad de carga y nos dará una distribución de cargas más exacta.

Pero para efectos de unificación matemática puede verse de la ecuación e.6.2.3.7., que la misma puede ser escrita en función del ρ , presentado por la ecuación e.6.2.3.3., solo para un punto infinitesimal, lo que nos daría la escritura de una ecuación para un $d\vec{J}$ de la siguiente forma:

$$d\vec{J} = \rho_{e.6.2.3.3} \cdot \vec{v}_i = d\rho_{e.6.2.3.8} \cdot \vec{v}_i \quad (\text{e.6.2.3.9.})$$

donde se representa que el ρ de la ecuación e.6.2.3.3. es una pequeña parte del ρ de la ecuación e.6.2.3.8.; aunque a fin de cuentas vienen a ser la misma distribución de cargas del cuerpo en cuestión, con lo que al integrar obtenemos:

$$\vec{J} = \int d\rho \cdot \vec{v}_i = \rho \cdot \vec{v}_i \quad (\text{e.6.2.3.10.})$$

Considerando el caso que nos interesa en el que \vec{J} va aproximadamente en la misma dirección de \vec{v}_i , lo que nos indica también que ρ sea uniforme con respecto de las velocidades \vec{v}_i , y que éstas velocidades sean parecidas, con lo que se puedan resumir a una sola velocidad representativa de la carga \vec{v} ; se puede escribir:

$$\vec{J} = \rho \cdot \vec{v} \quad (\text{e.6.2.3.11.})$$

Para cualquiera que sea la presentación del tensor \vec{J} , entre las ecuaciones dadas desde su presentación en e.6.2.3.7., hasta ahora; se podrá escribir la ecuación diferencial de corriente presentada inicialmente en e.6.2.3.5. como:

$$dI = \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.3.12.})$$

Haciendo un análisis dimensional de \vec{J} , en el Sistema Internacional, sus unidades serán: $[\vec{J}] = \left[\frac{\text{Coulombs}}{m^3} \right] \left[\frac{m}{\text{seg}} \right] = \frac{\text{Coulombs}}{\text{seg} \cdot m^2} = \frac{\text{Amps}}{m^2}$

Ahora resolviendo la ecuación e.6.2.3.12. para I , obtenemos:

$$I = \iint \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (\text{función general de corriente en un cuerpo}) \quad (\text{e.6.2.3.13.})$$

La ecuación e.6.2.3.13. es un modelo que representa la función de corriente en un cuerpo cualquiera, y es una de las funciones que incluiremos en nuestro esquema general para el modelado de una fuente generadora de calor por termoconducción. Nótese que modificando solo tres parámetros, obtenemos un modelo sumamente preciso, comparado con el modelo de distribución de cargas puntuales, y que puede ser ajustado por medio de funciones tensoriales simples o complejas, que representen cada uno de los parámetros a controlar. Nótese también que la integral es de tipo superficie ya que se integra sobre el valor y posición de la superficie representada por dA .

Haciendo un análisis dimensional de I , en el Sistema Internacional, sus unidades serán: $[I] = \left[\frac{\text{Amps}}{m^2} \right] [m^2] = \text{Amps}$

Los amperios (*Amps*), son la unidad internacional de corriente y un amperio se define como un Coulomb por segundo, viajando a través de un material.

6.2.4. Continuidad de la Corriente en un Conductor.

Como se ha visto, hay una relación determinante y definitiva entre la densidad de carga ρ y la densidad de corriente \vec{J} , y esta relación se cumple en el nivel macroscópico como en cada punto del elemento. De aquí se puede deducir que existe una relación de continuidad, la cual podría ser expresada en un modelo matemático por medio de una “ecuación de continuidad”, corroborando hasta cierto sentido el hecho de que la carga como parte de la energía universal no se crea, ni se destruye; y en nuestro caso, solo analizaremos el hecho de que se transporta y se transporta continuamente.

Analizaremos ahora lo que sucede cuando una densidad de corriente pasa a través de un volumen V , que esta encerrado o delimitado por una superficie cerrada S , tal como se ve en la imagen 6.2.4.1.

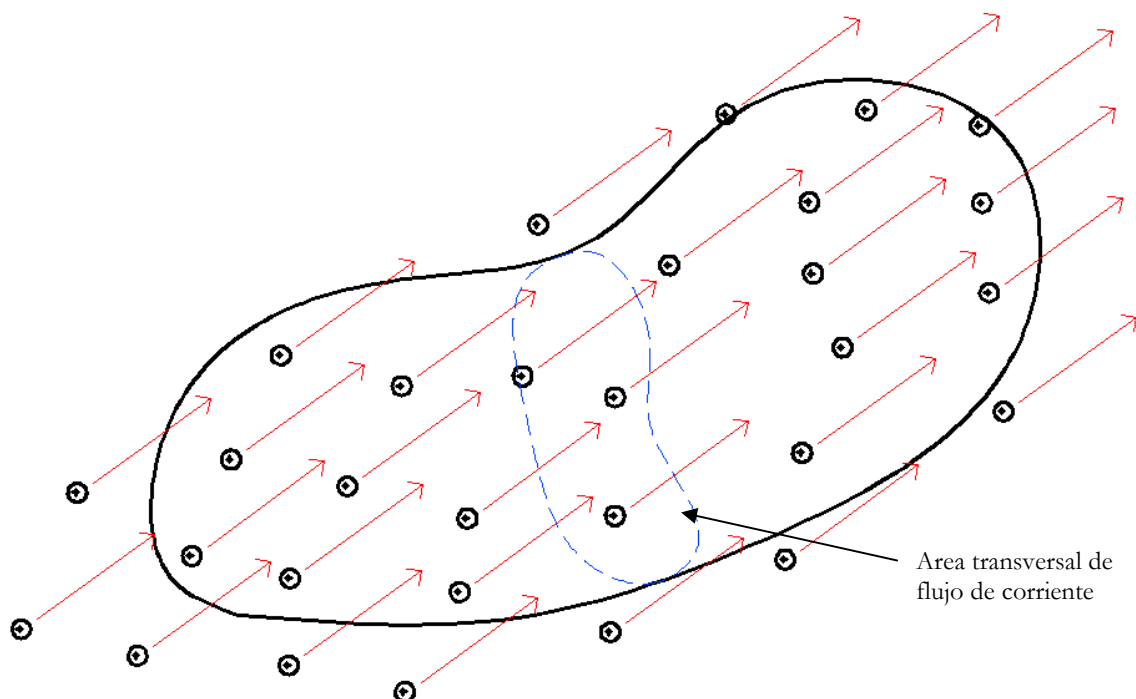


Imagen 6.2.4.1. Representación gráfica de una densidad de corriente fluyendo a través de un volumen cualquiera.

La corriente eléctrica que entra al volumen V , puede calcularse matemáticamente por medio de la ecuación e.6.2.3.13., al calcular la totalidad de la corriente que pasa a través de la superficie cerrada que delimita el volumen; de tal forma que en este caso, el elemento diferencial dA , estaría en la superficie del volumen y la integral de superficie sería una integral cerrada como se muestra en e.6.2.4.1.

$$I = -\oiint \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.4.1.})$$

Se hace notar también el signo negativo delante de la integral a causa que estamos considerando a I entrando al volumen, y por convención común en ingeniería eléctrica, la corriente que entra es negativa y la que sale positiva.

Aplicando el Teorema de la Divergencia, llamado también Teorema de Ostrogradsky en honor a su máximo colaborador Mikhail Vasilievich Ostrogradsky, el cual enuncia básicamente lo siguiente:

$$\oiint \vec{A} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \nabla \cdot \vec{A} \cdot dV \quad (\text{Teorema de Ostrogradsky o de la Divergencia}) \quad (\text{e.6.2.4.2.})$$

donde la integral derecha es una integral volumétrica de V ; \vec{A} es cualquier campo de vector; y $d\vec{S}$ en la integral izquierda representa cualquier superficie direccionada vectorialmente, por lo tanto en nuestro caso:

$$d\vec{S} = \mathbf{n} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.4.3.})$$

En el capítulo cinco de éste trabajo donde se trataron con suficiente detalle las particularidades de los fundamentos teóricos ya demostrados; se vio también la definición de nabra de forma general y un ejemplo de su resultado en el sistema de coordenadas cartesianas que es el mas utilizado por medio de la ecuación e.5.2.1.1.17, la cual repetimos en la siguiente ecuación:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{u}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{u}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{u}_z \quad (\text{Operador diferencial vectorial Nabla en coordenadas cartesianas}) \quad (\text{e.6.2.4.4.})$$

El mismo puede ser expresado en cuales quiera otros sistemas coordenados. Considerando para el desarrollo propuesto, la expresión del campo vectorial \vec{A} , en coordenadas cartesianas:

$$\vec{A} = A_x \vec{u}_x + A_y \vec{u}_y + A_z \vec{u}_z \quad (\text{e.6.2.4.5.})$$

realizando el producto escalar de ambas funciones vectoriales, puede verificarse que la función triple-integrada por el Teorema de Ostrogradsky, tendrá el valor de:

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (\text{en coordenadas cartesianas}) \quad (\text{e.6.2.4.6.})$$

Basándonos en la demostración de Ostrogradsky podemos transformar directamente la ecuación e.6.2.4.1. en una ecuación integral volumétrica como la siguiente:

$$I = -\oiint J \cdot \vec{n} \cdot dA = -\iiint_V \nabla \cdot J \cdot dV \quad (\text{e.6.2.4.7.})$$

De la ecuación e.6.2.3.5., $dI = \frac{dQ}{dt}$; definiendo las variables en función de sus volúmenes diferenciales:

$$dQ = \rho \cdot dV \quad (\text{e.6.2.4.8.})$$

y para la carga total del volumen analizado

$$Q = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (\text{e.6.2.4.9.})$$

Como en la ecuación e.6.2.4.8. estamos ante un caso volumétrico de un cuerpo global, sucederá con la representación de ρ , lo mismo que se explicó en ese momento, de que tanto global como diferencialmente, ρ puede ser representado matemáticamente por la misma función; ya que la densidad de carga ρ representa la cantidad de cargas por unidad de volumen independientemente de si hablamos de un punto infinitesimal como si hablamos de un cuerpo macroscópico. Aquí se puede ver también que si esto es así, entonces un pequeño elemento diferencial de corriente, tendrá el mismo valor que la corriente total que circula por el cuerpo, siempre y cuando el elemento diferencial de corriente tome toda el área transversal del cuerpo, a través de la cual se esta midiendo el flujo de corriente, y no un pequeño diferencial de esa área, tal como se muestra demarcado en la imagen 6.2.4.1. En otras palabras, la corriente total que fluye a través del cuerpo será la misma corriente que fluye a través de una película delgada que represente la totalidad del área de paso de la corriente. Esto mismo puede verse matemáticamente escrito, en las ecuaciones e.6.2.3.12 y e.6.2.3.13; donde la primera representa el elemento diferencial puntual de corriente (aquella que fluye solo por un punto del área transversal), y la segunda representa la totalidad de la corriente (aquella que fluye por toda el área transversal), pero en el caso de cuerpos, como es el nuestro ahora, también es el elemento diferencial pelicular de corriente, lo que nos da como resultado que sea igual a la corriente misma que se esta considerando, pues lo que se mide es su intensidad.

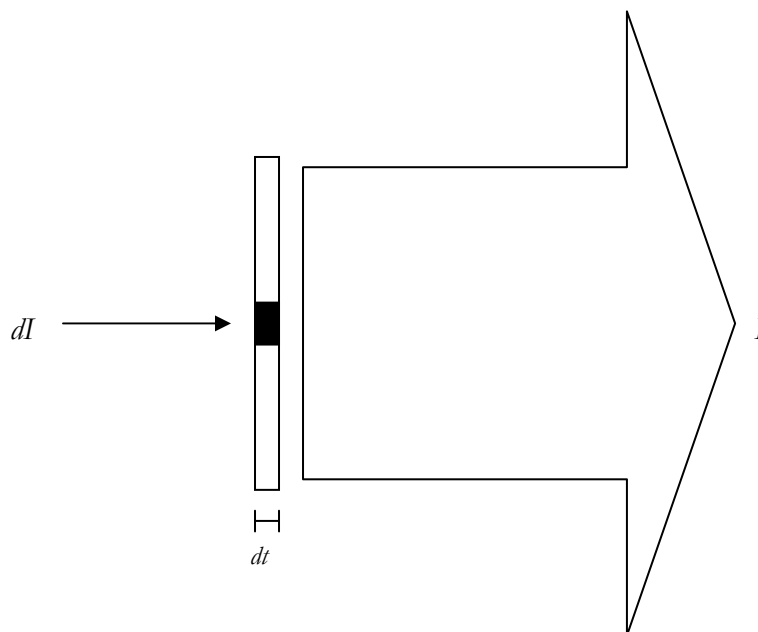


Imagen 6.2.4.2. Representación de una vista de perfil de los valores de dI , (corriente en un punto) y I (corriente sobre toda el área transversal del cuerpo). Al ser multiplicados cualesquiera de los 2 valores por dt , se obtiene un elemento infinitesimal de carga dQ .

Como se explica de manera gráfica en la imagen 6.2.4.2., puede verse que por los efectos explicados, la validez de la intensidad de corriente se dará tanto en un punto infinitesimal como en una película delgada infinitesimal que represente un área transversal de un cuerpo macroscópico cualquiera como el de la imagen 6.2.4.1. De esta forma, el diferencial de corriente tiene un valor equivalente a la intensidad de corriente misma, con lo que se puede hacer una función dependiente del tiempo para Q , que represente su distribución en el volumen entero, y la corriente estará definida por:

$$I = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{e.6.2.4.10.})$$

utilizando la ecuación e.6.2.4.8.:

$$I = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \cdot dV \quad (\text{e.6.2.4.11.})$$

lo que resulta directamente en:

$$I = \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV \quad (\text{e.6.2.4.12.})$$

La ecuación e.6.2.4.11., a pesar que ha sido obtenida desde un elemento diferencial, ha sido expandida a un volumen macroscópico, por lo que su valor es igual en todo punto y momento al valor de la ecuación obtenida para el volumen macroscópico por e.6.2.4.1. Dado el caso, matemáticamente si igualáramos las ecuaciones e.6.2.4.1. con la e.6.2.4.12, su valor sería idéntico, sin embargo físicamente una es de área y la otra de volumen por lo cual nos será muy útil en este momento sustituir la ecuación e.6.2.4.1. por su valor volumétrico dado por el teorema de Ostrogradsky según se encontró en e.6.2.4.7.

Igualando entonces e.6.2.4.7. con e.6.2.4.12:

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV + \iiint_V \nabla \cdot \vec{J} \cdot dV = 0 \quad (\text{e.6.2.4.13.})$$

como ambas integrales son volumétricas, se puede resolver la ecuación de la siguiente forma:

$$\iiint_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot + \nabla \cdot \vec{J} \right) dV = 0 \quad (\text{e.6.2.4.14.})$$

Como el volumen que hemos señalado es completamente arbitrario, la única forma de que la ecuación e.6.2.4.14. tenga validez absoluta es que se cumpla de forma puntual en cada parte del volumen, de forma que se pueda integrar luego a cualquier volumen. De esta forma derivando e.6.2.4.14. volumétricamente en sus coordenadas ortogonales:

$$\frac{d}{dV} \left[\iiint_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot + \nabla \cdot \vec{J} \right) dV \right] = 0 \quad (\text{e.6.2.4.15.})$$

obtenemos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot + \nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{e.6.2.4.16.})$$

la cual es la buscada ecuación de continuidad de la corriente.

6.2.5. Un punto de vista simple acerca de la cinemática de las cargas.

Hasta ahora se han analizado distintas teorías de gran aceptación y profundidad científica, acerca de la composición de la materia y los distintos portadores de cargas que existen. Se ha visto también como estos portadores pueden ser modelados por medio de ecuaciones continuas para la mayor parte de los casos, que son los que estudiamos; pero conocemos que físicamente, lo que sucede es que estos portadores de carga, se mueven en alguna dirección, y este movimiento en principio es aleatorio; por lo que forman una nube

de portadores de carga, con una densidad de carga que hemos llamado ρ en cada punto de la nube.

Hemos visto también que para modelar el efecto de corriente eléctrica solo se necesita utilizar una sola clase de portador de carga; mas de esto sería superfluo; y los mismos pueden modelarse como una densidad de corriente \vec{J} , que esta conformada por las cargas (sumadas por clase), multiplicadas por la “velocidad media” a la que se mueven y por lo tanto íntimamente relacionadas con la densidad de carga ρ .

En el caso más general (cuando son incluso distintos tipos de carga) se vio en las ecuaciones e.6.2.3.7. y 6.2.3.8. lo que se rescribimos en las siguientes dos ecuaciones:

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \cdot \vec{v}_i \quad (\text{e.6.2.5.1.})$$

$$\rho = \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \quad (\text{e.6.2.5.2.})$$

de donde se llegó en ese momento a demostrar que para el caso de un solo tipo de portador de carga el modelo adecuado sería el expresado por e.6.2.3.11., reescrito a continuación:

$$\vec{J} = \rho \cdot \vec{v} \quad (\text{e.6.2.5.3.})$$

Pero es fácil analizar en base a lo ya demostrado que si tuviésemos por alguna razón múltiples clases de cargas \vec{J} , la resultante total de la densidad de corriente sería la sumatoria vectorial de cada uno de los productos $q_i \cdot N_i \cdot \vec{v}$, de la ecuación e.6.2.5.1., que de manera general global se puede escribir como las sumatorias de las \vec{J}_i existentes, lo que expandiendo la ecuación e.6.2.5.3. nos resulta:

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \vec{v}_i \quad (\text{densidad de corriente resultante cuando existen varias densidades de carga distintas o varios tipos de portadores de cargas con distintas velocidades y direcciones}) \quad (\text{e.6.2.5.4.})$$

En el movimiento aleatorio de cargas se producen choques entre ellas a las velocidades \bar{v}_i . Podríamos sacar una media de recorrido de las cargas antes de chocar nuevamente entre ellas por medio de un análisis estocástico, con lo que obtendríamos un valor de recorrido medio L_i .

Con esto podríamos también obtener el tiempo medio que transcurre entre choques, el cual sería:

$$\Delta t_i = \frac{L_i}{v_i} \quad (\text{tiempo medio transcurrido entre choques de cargas}) \quad (\text{e.6.2.5.5.})$$

donde el v_i , es el valor de la magnitud de \bar{v}_i .

Hasta ahora, hemos asumido portadores de carga moviéndose aleatoriamente pues no hemos considerado la complejidad de una fuerza externa sobre los mismos; solo hemos analizado su movimiento natural aleatorio, pero cuando sobre el medio conductor de los portadores se aplica un campo eléctrico (denotado generalmente por \vec{E}), sobre los portadores de carga actuará una fuerza que seguirá un modelo matemático demostrado por la Ley de Coulomb en honor a uno de sus descubridores, Charles-Augustin de Coulomb, quien fuese el primero en publicarla; la cual puede escribirse a nuestra conveniencia como:

$$\vec{F}_i = q_i \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.5.6.})$$

donde \vec{F}_i será la fuerza resultante en el portador de carga, o sea la que genera su movimiento a causa del campo eléctrico \vec{E} .

Si existen fuerzas externas actuando sobre la partícula portadora de carga, inmediatamente entra a regir el modelo propuesto por la segunda ley de Newton, en honor a su gestor Isaac Newton; la cual nos indica que la fuerza impresa sobre la partícula será proporcional a su cambio de movimiento (aceleración) y masa; de tal manera que si la masa de la partícula es m_i , podríamos escribir:

$$\vec{F}_i = m_i \cdot \frac{\Delta \vec{v}_i}{\Delta t_i} \quad (\text{e.6.2.5.7.})$$

Igualando las ecuaciones e.6.2.5.6. y e.6.2.5.7., obtenemos:

$$m_i \cdot \frac{\Delta \vec{v}_i}{\Delta t_i} = q_i \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.5.8.})$$

y de esta ecuación podemos despejar la varianza de la velocidad a causa del campo eléctrico:

$$\Delta \vec{v}_i = \frac{q_i \cdot \Delta t_i}{m_i} \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.5.9.})$$

podríamos utilizar la ecuación e.6.2.5.5., para reemplazar a Δt_i , con lo que e.6.2.5.9. nos resultaría:

$$\Delta \vec{v}_i = \frac{q_i \cdot L_i}{m_i \cdot v_i} \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.5.10.})$$

La ecuación anterior introduce un pequeño error, al utilizar un valor Δt_i , que fue calculado sin tomar en cuenta la existencia de fuerzas externas ni el efecto propio de \vec{E} , en un cálculo de una variable cuando existe \vec{E} . Sin embargo podremos volver a la exactitud matemática considerando que cuando \vec{E} actúa, las velocidades medias podrían ser estimadas junto con su variación debida a \vec{E} por medio de $(v_i + \Delta v_i)$, y los recorridos medios igualmente pueden ser un poco diferentes; estimados junto con su variación como $(L_i + \Delta L_i)$; de forma que la ecuación e.6.2.5.10. se lleva a la exactitud matemática escribiéndola como:

$$\Delta \vec{v}_i = \frac{q_i \cdot (L_i + \Delta L_i)}{m_i \cdot (v_i + \Delta v_i)} \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.5.11.})$$

ya que cuando existe el campo \vec{E} :

$$\Delta t_{i\vec{E}} = \frac{(L_i + \Delta L_i)}{(v_i + \Delta v_i)} \quad (\text{e.6.2.5.12.})$$

Ahora analizamos que de hecho, la densidad de carga del material no varía con la existencia o no del campo \vec{E} , puesto que la misma depende solo de las propiedades del material conductor; por lo tanto, aquella longitud de recorrido entre choques que se extienda o se alargue por efectos de la aparición de un campo \vec{E} que antes no existía en el material, será compensada con otras longitudes de recorrido que deberán acortarse para llegar a tener los mismos choques en número por unidad cúbica de material conductor, ya que tenemos el mismo número de portadores de carga por unidad cúbica, con o sin el campo \vec{E} , y por lo tanto una probabilidad similar de choques.

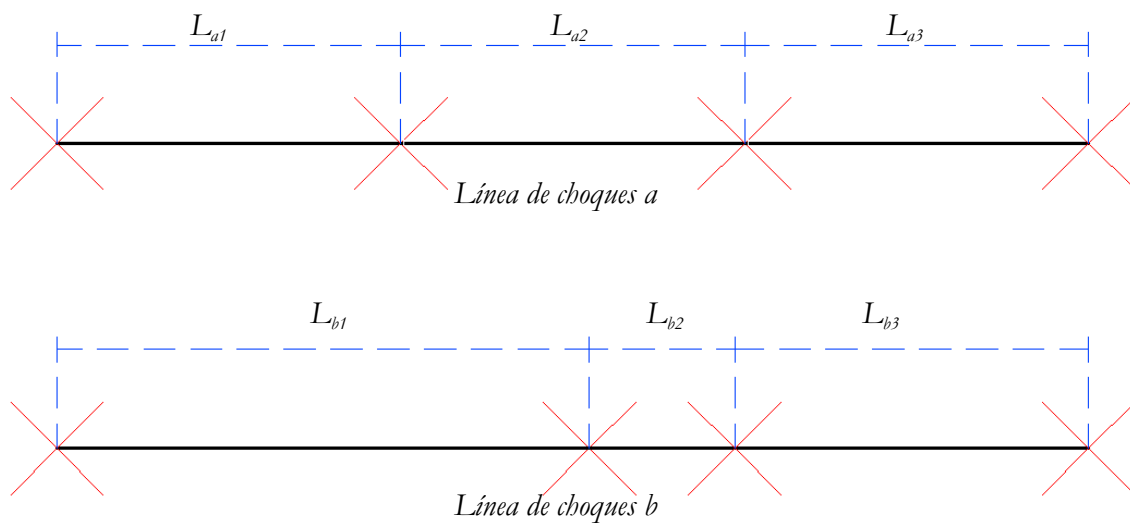


Imagen 6.2.5.1. Representación gráfica sencilla de un espacio con 3 portadores de carga, y cuatro posibles choques entre ellos desde que un portador externo a la izquierda de este espacio choca con el primero hasta que el tercero choca con otro a la derecha. Se representan 2 posibilidades de choques y distancias de recorrido entre choques, la posibilidad de la línea de choques a y la de la línea de choques b. Las cruces representan los choques.

La imagen 6.2.5.1., nos da un sencillo ejemplo visual de lo explicado; supóngase que en la imagen la línea de choques a representa los choques dentro del espacio donde se encuentran 3 portadores de carga cuando no existe el campo \vec{E} ; y en un momento se da la existencia del campo \vec{E} , mas sin embargo en este espacio no varía la densidad de carga ρ .

De hecho la cantidad de choques es la misma y se ven representado por la línea de choques b. Como se ve, las distancias de recorrido de choque a choque pueden variar, mas sin embargo puede utilizarse un análisis geométrico sencillo para determinar que tanto en la línea de choques a (que representa choques sin campo \vec{E}) como en la línea de choques b (que representa choques con campo \vec{E}), la longitud promedio de recorrido será la misma; ya que:

$$\frac{L_{a1} + L_{a2} + L_{a3}}{3} = \frac{L_{b1} + L_{b2} + L_{b3}}{3} = L_{ia} = L_{ib} = L_i \quad (\text{e.6.2.5.13.})$$

Se puede ver también por simple inspección, que las variaciones de las longitudes medias de recorrido ΔL_i cuando aparece el campo eléctrico, son algunas positivas y otras negativas considerando la dirección del recorrido, y en direcciones arbitrarias, opuestas, por lo que al final de cuentas se eliminan entre ellas. Si no fuera así, la ecuación e.6.2.5.13., no podría cumplirse pues, las longitudes L_{bn} serían en general mayores o en general menores que las longitudes L_{an} ; pero algunas son mayores y otras menores, con lo que queda representado lo que ha sido analizado acerca de las variaciones ΔL_i .

Dado este hecho, la ecuación e.6.2.5.12. puede facilitarse al ser escrita como:

$$\Delta t_{iE} = \frac{L_i}{(v_i + \Delta v_i)} \quad (\text{e.6.2.5.14.})$$

La ecuación anterior deja ver que si todos los portadores de carga fueran en una sola dirección, y el incremento de velocidad debido a \vec{E} , es en esa única dirección de tal forma que la magnitud escalar del mismo pueda ser imputada totalmente a Δv_i sumándose a v_i (recuérdese que como esta ecuación es escalar solo pueden sumarse directamente aquellos incrementos de velocidad y desplazamiento que estén en la misma dirección; de no ser así habría que sacar los incrementos proporcionales por cada una de las tres direcciones ortogonales del sistema de coordenadas utilizado); el tiempo entre choques se reduce. Al reducirse el tiempo entre choques, de la ecuación e.6.2.5.7. puede verse que se incrementara la fuerza de Newton al reemplazar a Δt_i por un Δt_{iE} que tiene una magnitud menor (o en dados casos triviales por lo menos igual con lo que la fuerza de Newton no se afecta).

$$\Delta t_i \geq \Delta t_{iE} \quad (i.6.2.5.1.)$$

con lo que:

$$m_i \cdot \frac{\Delta \bar{v}_i}{\Delta t_i} \leq m_i \cdot \frac{\Delta \bar{v}_i}{\Delta t_{iE}} \quad (i.6.2.5.2.)$$

donde el lado derecho de la inecuación anterior representa un valor mas preciso de la ecuación e.6.2.5.7.; que puede ser dada como:

$$\bar{F}_i = m_i \cdot \frac{\Delta \bar{v}_i}{\Delta t_{iE}} \quad (e.6.2.5.15.)$$

aunque como estos valores son tan pequeños, sus varianzas lo son aun mucho mas, de forma que e.6.2.5.15. y e.6.2.5.7. podrían ser utilizadas casi que indistintamente sin introducir errores de consideración en el modelo, pero posiblemente si mucha facilidad de adaptación en el proceso de cálculo.

Reescribiendo la ecuación e.6.2.5.11., al considerar los efectos de \bar{E} sobre la velocidad pero también la cancelación de los cambios de longitudes medias de recorrido:

$$\Delta \bar{v}_i = \frac{q_i \cdot L_i}{m_i \cdot (v_i + \Delta v_i)} \cdot \bar{E} \quad (e.6.2.5.16.)$$

con lo que se puede resolver sencillamente:

$$\Delta \bar{v}_i \cdot m_i \cdot (v_i + \Delta v_i) = q_i \cdot L_i \cdot \bar{E} \quad (e.6.2.5.17.)$$

$$\Delta v_i \cdot m_i \cdot v_i + (\Delta v_i)^2 \cdot m_i = q_i \cdot L_i \cdot E \quad (e.6.2.5.18.)$$

$$m_i \cdot (\Delta v_i)^2 + m_i \cdot v_i \cdot (\Delta v_i) - q_i \cdot L_i \cdot E = 0 \quad (e.6.2.5.19.)$$

de donde queda despejado el valor escalar de la magnitud de $\Delta\vec{v}_i$ como:

$$\Delta v_i = \frac{-m_i v_i \pm \sqrt{(m_i v_i)^2 + 4 \cdot m_i q_i L_i E}}{2 \cdot m_i} \quad (\text{e.6.2.5.20.})$$

La ecuación e.6.2.5.20. determina el efecto que produce la aparición del campo \vec{E} , por medio de su efecto en el cambio de velocidad, y es mucho más sencilla de utilizar que e.6.2.5.16. y e.6.2.5.11., desde el hecho de que $\Delta\vec{v}_i$ no depende de su mismo valor Δv_i , sino de las otras variables involucradas en el evento; pero como puede verse por la nomenclatura utilizada, es una ecuación puramente escalar donde solo puede ser determinada la magnitud de $\Delta\vec{v}_i$; sin embargo su dirección es fácil de determinar al utilizar e.6.2.5.16. y e.6.2.5.11.; pues es la misma dirección vectorial de \vec{E} . Al combinar el uso de las ecuaciones convenientes, vemos que e.6.2.5.20. nos da el módulo o magnitud del cambio de velocidad y las ecuaciones e.6.2.5.16. y e.6.2.5.11., nos dan dirección y sentido.

Este cálculo es muy preciso desde el punto de vista de la teoría del movimiento electrónico, sin embargo, en la mayor parte de los casos, las proporciones de Δv_i con respecto de v_i , son tan bajas que no valdrá la pena considerarlo; pero siempre existen casos triviales, (sobre todo donde los campos electromagnéticos son muy intensos y repentinamente variables), donde Δv_i es un factor determinante del modelo.

En los casos donde no tengamos niveles demasiado intensos de energía electromagnética con condiciones variables de formas cuasi-instantáneas; podremos utilizar la ecuación e.6.2.5.10. como solución, y en los demás casos la podemos utilizar como una aproximación inicial.

De la ecuación e.6.2.5.16. puede verse que cuando $\vec{E} = 0$, $\Delta\vec{v}_i = 0$; por lo tanto las fuerzas externas calculadas por la ecuación de Newton en e.6.2.5.15. serán también nulas, ya que $\vec{F}_i = 0$; lo que puede ser reconfirmado con la ecuación e.6.2.5.8., ya al postular que $\vec{E} = 0$ a la derecha de la misma, el lado izquierdo también debe ser nulo; y ni la masa ni el

tiempo pueden serlo, por lo que la única posibilidad que queda es que necesariamente cuando $\vec{E} = 0 \Rightarrow \Delta \vec{v}_i = 0$.

Sin embargo, de la ecuación e.6.2.5.20., se puede ver que cuando $\vec{E} = 0$, hay 2 posibilidades, una concuerda con lo anterior de que $\Delta v_i = 0$; pero la otra indica que $\Delta v_i = v_i$. Esto se puede explicar conociendo que e.6.2.5.20. es una ecuación escalar que ha surgido a partir de una ecuación de condición vectorial. En el caso general, e.6.2.5.20. siempre tiene dos soluciones, una físicamente correcta y la otra matemáticamente incorrecta pero físicamente imposible; y es una condición que ya conocemos de las soluciones de tipo cuadrático; por lo que hay que tener un muy buen sentido común y lógica física para determinar cual de las dos soluciones es la adecuada; y en eso nos ayudarán las ecuaciones e.6.2.5.16. y e.6.2.5.11., pues nos dan la dirección y sentido de la respuesta. Pero en el caso trivial que $\vec{E} = 0$, me permito decirle al lector que ambas soluciones son correctas; y mi análisis lo sugiero desde el punto de vista de que cuando $\vec{E} = 0$, ambas ecuaciones e.6.2.5.16. como origen y e.6.2.5.20., tienen condiciones escalares; por lo cual deben ser idénticas en todo sentido, y sus resultados estando en un dominio escalar deben ser válidos. La condición descrita lo único que indica es que cuando no existe cambio los cambios de velocidad son cero, cuando los portadores de carga viajan libres y v_i , cuando se dan los choques entre ellos; pues como no hay fuerzas externas involucradas, este modelo estima que el choque será totalmente elástico creando un movimiento nuevo en otra dirección, con lo que se crea un nuevo valor escalar (otra línea infinita de movimiento), donde el nuevo valor de la velocidad es $\Delta v_i = v_i$. Por tanto:

$$\Delta v_i = \frac{-m_i v_i \pm m_i v_i}{2 \cdot m_i} = \begin{cases} 0 & (\text{mientras no hay choques entre portadores}) \\ v_i & (\text{en los momentos de choque entre portadores}) \end{cases} \quad (\text{e.6.2.5.21.})$$

Ecuaciones como e.6.2.5.16., también expresan que el cambio de velocidad es en un punto (pues son vectoriales), por lo tanto en cada partícula. En las condiciones normales de operación de un conductor eléctrico, no hay cambios energéticos exagerados de forma instantánea, por lo que se podría conservar la utilización de la ecuación e.6.2.5.10. sin temor

alguno caer en un error de consideración. Ante la existencia de un campo eléctrico en ésta condición, la ecuación e.6.2.5.20. es casi igual a la e.6.2.5.21., puesto que el valor L_i es infinitamente pequeño, al igual que el término m_i ; haciendo del término $4 \cdot m_i q_i L_i E$, un término perfectamente despreciable en el modelo. La única forma en que éste término tenga efecto es que q_i o E tengan valores tan enormes que puedan compensar lo infinitesimal de L_i y m_i multiplicados entre ellos; lo cual no es para nada la condición de un conductor eléctrico estándar instalado en un proyecto de edificación como los que analizamos en el presente trabajo.

Teniendo esto presente, la ecuación e.6.2.5.20. nos da una información adicional muy importante; ya que se puede ver que la variación de Δv_i va aproximadamente desde cero hasta v_i , similar a lo que ocurre en e.6.2.5.21. cuando no existe E .

De esta forma si quisiéramos sacar una media del cambio Δv_i ; sería sumar puntualmente todos los cambios Δv_i y dividirlos entre la cantidad de cambios que son, los cuales serán idénticos a la cantidad de portadores incluidos en el volumen de control analizado.

Deterministicamente sería un trabajo casi imposible, pero estocásticamente, es fácil por medio de un modelo de probabilidades donde se tienen 2 posibles respuestas, las cuales son exactamente las mismas que las encontradas en la ecuación e.6.2.5.21. No hay que resolver muchos problemas estadísticos para conocer que la mitad de la probabilidad estará en que la respuesta sea cero y la otra mitad estará en que la respuesta sea v_i ; y como los portadores son tantos que pueden ser considerados infinitos, pueden expresarse:

$$v_{iE} = \Delta v_i = \frac{\infty(0) + \infty(v_i)}{2\infty} = \frac{\infty(0 + v_i)}{2\infty} = \frac{(0 + v_i)}{2} = \frac{v_i}{2} \quad (\text{e.6.2.5.22.})$$

usando e.6.2.5.10. a fin de mantener sencillez se puede expresar de igual forma en base a la primera igualación de la ecuación e.6.2.5.22.:

$$\bar{v}_{iE} = \Delta \bar{v}_i = \frac{1}{2} \left(\frac{q_i \cdot L_i}{m_i \cdot v_i} \right) \cdot \bar{E} \quad (\text{e.6.2.5.23.})$$

donde \bar{v}_{iE} se refiere a la velocidad adquirida por los portadores de carga por causa única del campo eléctrico, la cual es igual al promedio de las variaciones de velocidad que existen cuando no el campo no está presente según e.6.2.5.22., y es un valor que tiene una sola dirección y sentido, que es dado por el campo eléctrico según e.6.2.5.23.

Si se quisiera tener el valor de v_{iE} de la forma más precisa posible hasta ahora, sería:

$$v_{iE} = \frac{-m_i v_i \pm \sqrt{(m_i v_i)^2 + 4 \cdot m_i q_i L_i E}}{4 \cdot m_i} \quad (\text{e.6.2.5.24.})$$

pero no será muy distinto de lo obtenido en e.6.2.5.22.

De acuerdo a e.6.2.5.1., cuando existe un flujo de portadores ordenados, como en este caso obtenemos una densidad de corriente \vec{J} , que ahora esta ordenada a causa del campo \vec{E} y puede expresarse como:

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \cdot \bar{v}_{iE} \quad (\text{e.6.2.5.25.})$$

reemplazando con e.6.2.5.24.:

$$J = \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \cdot \left[\frac{-m_i v_i \pm \sqrt{(m_i v_i)^2 + 4 \cdot m_i q_i L_i E}}{4 \cdot m_i} \right] \quad (\text{e.6.2.5.26.})$$

La ecuación e.6.2.5.25. establece una forma de relación directa entre la densidad de corriente, el campo que la produce y los portadores de carga, o sea una forma íntegra de la ya conocida Ley de Ohm en electricidad; y la ecuación e.6.2.5.26., nos da su valor en magnitud. Sin embargo si queremos llegar a una forma mas sencilla, reemplazamos con e.6.2.5.23. en lugar de e.6.2.5.24. en la ecuación e.6.2.5.25., con lo que llegamos a:

$$\vec{J} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \cdot \left(\frac{q_i \cdot L_i}{m_i \cdot v_i} \right) \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.5.27.})$$

Muchos autores encuentran aun demasiada complejidad en la ya simplificada ecuación e.6.2.5.27., y realmente toda la complejidad restante es por el hecho de que sigue siendo una ecuación de sumatorias infinitas en un volumen determinado; por lo que han decidido definir un factor llamado **conductividad**, el cual es válido en materiales homogéneos e isotrópicos; y matemáticamente esta descrito como:

$$\sigma_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \cdot N_i \cdot \left(\frac{q_i \cdot L_i}{m_i \cdot v_i} \right) \quad (\text{e.6.2.5.28.})$$

Véase en la ecuación anterior que m_i , q_i , y N_i dependen exclusivamente del material; mientras que v_i y L_i dependen de la temperatura. Esto nos indica que podrían determinarse ecuaciones de soluciones parciales (o temporales) para σ_c , de donde sus valores puedan ser obtenidos por la vía experimental y modelados dentro de una ecuación mas sencilla que nos sirva como aproximación a la solución dentro de un rango de valores independientes dado que nos interese analizar; ya que la complejidad de e.6.2.5.27., esta igualmente representada en e.6.2.5.28. Si se pudiera simplificar e.6.2.5.28., simplificaríamos también a e.6.2.5.27.; puesto que en vista de la definición de e.6.2.5.28. puede escribirse e.6.2.5.27. como:

$$\vec{J} = \sigma_c \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.5.29.})$$

donde σ_c puede tomar el valor dado por e.6.2.5.28., como un valor simplificado calculado bajo algún otro método matemáticamente menos riguroso o bajo condiciones experimentales, que nos sirva dentro de un rango de valores controlado a analizar. La gran mayoría de los autores concuerdan incluso en que para la mayor parte de los casos, la conductividad del material σ_c , puede ser reemplazada por un valor constante, debido a que la dependencia de v_i y L_i con la temperatura no se ve muy afectada pues los rangos de variación de la misma en estudios técnicos controlados es muy poca. En el caso de un incendio eléctrico el rango de variación de la temperatura es mucho mas amplio, con lo que

no podemos considerar que siempre se dará ésta condición, sin embargo si se justifica una buena aproximación considerando a σ_c como una constante en el caso de conductores eléctricos; puesto que aunque son rangos amplios de variación térmica, los conductores eléctricos (generalmente metales) no varían sus propiedades originales de forma significativa hasta no variar su estado; con lo cual tendría que considerarse la fundición del metal, situación en la que en la mayor parte de las veces se extingue el arco.

La ecuación e.6.2.5.29. a la que hemos llegado simplificando nuestra ecuación original es también la forma puntual mas conocida del modelo de la **Ley de Ohm**.

6.2.6. Buscando la forma general de la Ley de Ohm a partir de la forma puntual.

Nos interesa en esta parte demostrar al lector como se obtiene la forma general de la Ley de Ohm, a partir de su forma puntual; ya que es mucho mas fácil trabajar con ella cuando se trata de cuerpos macroscópicos; y una vez obtenida pueden reemplazarse todas las funciones similares que fueron encontradas en la forma puntual, a fin de obtener precisión o exactitud.

De la sección anterior, en la ecuación e.6.2.5.29. obtuvimos:

$$\vec{J} = \sigma_c \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.6.1.})$$

De la teoría de la formación de la corriente en un conductor obtuvimos como resultado la función general de corriente en un cuerpo; ecuación e.6.2.3.13., que expresamos nuevamente:

$$I = \iint \vec{J} \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (\text{función general de corriente en un cuerpo}) \quad (\text{e.6.2.6.2.})$$

De la sección de cinemática de cargas; vimos la presentación de la fuerza generada en un portador de carga en presencia de un campo eléctrico, la cual fue representada en la ecuación e.6.2.5.6., y reescribimos aquí para una carga puntual cualquiera

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (\text{e.6.2.6.3.})$$

De la física clásica conocemos que el trabajo realizado es equivalente a la fuerza que realiza el trabajo por la distancia recorrida; de forma general, la integral del campo de vector de fuerza por el elemento vectorial de longitud diferencial que aplique según el sistema de coordenadas ortogonales utilizado.

$$W = -\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (\text{ecuación general de trabajo realizado}) \quad (\text{e.6.2.6.4.})$$

El negativo delante de la integral es por la consideración de que se esta viendo el trabajo realizado sobre una masa y no el elemento que realiza el trabajo sobre la masa.

De la física clásica conocemos que el potencial es la capacidad de realizar un trabajo sobre la masa; sin que necesariamente la masa esté presente; solo evaluando la capacidad de hacerlo. De la teoría electromagnética podemos definir este potencial sobre una carga como el trabajo realizado sobre la carga sin que la carga esté presente, o sea dividiendo entre la carga; lo que común mente recibe el nombre de **potencial eléctrico** o **voltaje** entre los puntos A y B .

$$V_{AB} = \frac{W}{q} \quad (\text{voltaje entre los puntos } A \text{ y } B) \quad (\text{e.6.2.6.5.})$$

Las cinco ecuaciones anteriores, son expresiones a las que hemos llegado por la vía deductiva, partiendo de las teorías de composición elemental de la materia y definición de cargas, hasta ciertas simplificaciones que nos hace llegar a la expresión puntual de la Ley de Ohm; o han sido tomadas de la física clásica, como modelos aceptados que representan eventos universales, por lo cual no variarán los resultados de la ecuación de Ohm, ya sea que se represente en forma puntual o en forma general.

Ahora nos disponemos a transformar la forma puntual presentada en e.6.2.6.1. en la forma general conocida por todos los estudiosos de electricidad. De hecho la capacidad de llevar esta ecuación, que ha sido deducida por medios propios en éste trabajo, a la forma

general, es una demostración adicional de que los métodos matemáticos utilizados, han sido correctos, pues ambas ecuaciones deben ser equivalentes y por lo tanto debe existir equivalencia con ecuaciones anteriores que representan el mismo proceso pero en diferentes instancias, como lo son e.6.2.3.7., e.6.2.3.11., e.6.2.5.4., e.6.2.5.26 y e.6.2.5.27, por dar algunos ejemplos.

Tomando e.6.2.6.4., para introducirla en e.6.2.6.5.:

$$V_{AB} = -\int_A^B \frac{\vec{F}}{q} \cdot d\vec{l} \quad (\text{e.6.2.6.6.})$$

Sustituyendo con e.6.2.6.3.

$$V_{AB} = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{e.6.2.6.7.})$$

nótese que si \vec{E} va en contra de $d\vec{l}$ el voltaje se considera por convención positivo.

De forma genérica:

$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{e.6.2.6.8.})$$

Si se asume que \vec{E} es un campo conservativo y uniforme (recuérdese que la forma general de la ley de Ohm es uniforme, conservativa y lineal), se podría reducir e.6.2.6.8. a:

$$V = E \cdot L \quad (\text{e.6.2.6.9.})$$

donde L es la longitud de camino resultante de la integración, con lo que el valor de E :

$$E = \frac{V}{L} \quad (\text{e.6.2.6.10.})$$

el negativo de la integración se ha asumido como cancelado, puesto que por convención, para adquirir potencial eléctrico, se lleva la carga de un punto de menor potencial a uno con mayor potencial, por lo que se camina en la integración de $d\vec{l}$, en dirección contraria a \vec{E} , y tal como se observó en e.6.2.6.7., el resultado de la operación será positivo en ese caso.

Introduciendo ahora e.6.2.6.1. en e.6.2.6.2.:

$$I = \iint \sigma_c \cdot \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.6.11.})$$

utilizando la ecuación e.6.2.6.10.:

$$I = \iint \sigma_c \cdot \left(\frac{V}{L} \right) \cdot \vec{n} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.6.12.})$$

resolviendo el punto vectorial:

$$I = \iint \sigma_c \cdot \frac{V}{L} \cdot dA \quad (\text{e.6.2.6.13.})$$

Como la forma general de la Ley de Ohm considera la función de conductividad σ_c como una constante dependiente solo del material, debemos hacerlo así en este momento (aunque no necesariamente nuestro modelo la considerará de la misma forma). Con ello se consigue simplificar la ecuación anterior.

$$I = \sigma_c \cdot \frac{V}{L} \cdot \iint dA \quad (\text{e.6.2.6.14.})$$

$$\iint dA = A_p \quad (\text{e.6.2.6.15.})$$

donde A_p es la sección total perpendicular al paso de \vec{J} , y por lo tanto la sección del conductor que es perpendicular también al paso de la corriente, con lo que se escribe:

$$I = \sigma_c \cdot \frac{V}{L} \cdot A_p \quad (\text{e.6.2.6.16.})$$

De la ecuación e.6.2.6.16., se puede ver ya un factor conocido en electricidad con el nombre de **conductancia**; el cual esta definido por:

$$G = \sigma_c \cdot \frac{A_p}{L} \quad (\text{e.6.2.6.17.})$$

La conductancia es una magnitud característica del tramo de conductor (o material en general) por donde pasa la corriente I , que relaciona y simplifica en un solo factor a toda una serie de valores que ya habían sido simplificados en σ_c con la ecuación e.6.2.5.28., y ahora se incluyen en búsqueda de algo mas simple, a los valores simplificados del área o sección transversal A_p , y la longitud total de conductor L .

De esta forma la ecuación e.6.2.6.16 puede ser expresada como:

$$I = G \cdot V \quad (\text{Forma General de la Ley de Ohm, con Conductancia}) \quad (\text{e.6.2.6.18.})$$

o en su defecto en la forma inversa, donde se aplica también un factor extensamente conocido como **resistencia**, el cual es inverso a la conductancia:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{L}{\sigma_c \cdot A_p} \quad (\text{e.6.2.6.19.})$$

$$V = R \cdot I \quad (\text{Forma General de la Ley de Ohm, con Resistencia}) \quad (\text{e.6.2.6.20.})$$

Existen igualmente ecuaciones en electricidad que determinan la relación entre voltaje y corriente cuando las direcciones vectoriales de estos no son iguales; por lo cual existe desfase entre ellos; por ejemplo la siguiente:

$$\vec{V} = Z \cdot \vec{I} \quad (\text{e.6.2.6.21.})$$

donde Z es una magnitud compleja llamada impedancia, (con valores reales e imaginarios), que surge por el desfase entre voltajes y corrientes, y puede ser representada por:

$$Z = R + jX \quad (\text{ecuación de impedancia}) \quad (\text{e.6.2.6.22.})$$

donde jX es llamado **reactancia** y aunque representa un impedimento temporal al paso de la corriente, se encuentra en el eje imaginario (por lo tanto irreal o fuera de la línea del tiempo analizada); y en consecuencia de esto, no representa ningún aporte significativo a la generación de calor por causa del paso de la corriente, pues lo único que hace es retrasar (o adelantar) un despacho energético con respecto del punto temporal analizado, pero no hay conversión de energía eléctrica a calor por culpa de las reactancias.

El inverso de Z es llamado **admitancia** y se representa por Y (hay discrepancia desde que algunos autores le han llamado también conductancia, sobre todo en el idioma inglés), y esta conformado igualmente por un valor real (que será el mismo que hemos definido como conductancia en esta literatura) y uno imaginario que recibe el nombre de **susceptancia** y se representa por jB .

$$Y = G + jB \quad (\text{ecuación de admitancia}) \quad (\text{e.6.2.6.23.})$$

Por la misma razón que la reactancia, la susceptancia no es de nuestro particular interés en esta investigación, pues no tiene efectos de generación de calor por causa del paso de la corriente a través del conductor.

Como pudo verse también el factor inicial de conductancia, fue definido a partir de un factor de conductividad que representa las características del material sin tomar en cuenta su forma. De hecho lo que hace la conductancia es simplemente considerar la geometría macroscópica del conductor. Esto intrínsecamente nos indica que si existe un factor de conductividad que dio origen a la conductancia, también hay un factor de resistividad que represente las características intrínsecas del material, y que sea inverso a la conductividad. Este factor se representa por ρ_c y se define por:

$$\rho_c = \frac{1}{\sigma_c} \quad (\text{e.6.2.6.24.})$$

Reemplazando la ecuación anterior en e.6.2.6.19., podemos obtener una ecuación de resistencia en función de la resistividad.

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho_c \cdot L}{A_p} \quad (\text{e.6.2.6.25.})$$

y por lo tanto también podemos obtener la ecuación de Ohm en función de la resistividad:

$$V = \frac{\rho_c \cdot L}{A_p} \cdot I \quad (\text{e.6.2.6.26.})$$

la cual es comúnmente encontrada hasta en los libros de texto de electricidad más básicos, y la razón es porque la resistividad promedio de muchos materiales ya ha sido definida en un amplio rango de valores de temperatura, haciendo que el cálculo de la resistencia sea muy simple.

6.2.7. Corrección a la Ley General de Ohm; su dependencia con la temperatura.

En la ecuación e.6.2.5.28., se vio que la conductividad σ_c de un material, es una función que depende de la cantidad de movimiento que exista entre sus portadores de carga, de que tan cerca estén unos de otros y de que tantos sean en el volumen del material. Este movimiento de portadores de carga es característico en cada material, pero en el caso particular de los metales (que son los conductores que son generalmente utilizados en proyectos eléctricos), guarda mucha relación con la temperatura a la que esté sometido el conductor. En la ecuación e.6.2.6.24., se definió la resistividad ρ_c como el inverso de la conductividad; y es un parámetro comúnmente utilizado en ingeniería eléctrica; y al ser el inverso de la conductividad el mismo se verá igualmente afectado por la temperatura pero en sentido inverso a la afección que tiene la temperatura sobre la conductividad.

Muchos investigadores se han planteado ya proyectos de investigación para encontrar modelos específicos para funciones de ρ_c en diferentes conductores; sobre todo las compañías que fabrican conductores eléctricos han generado tablas de información fáciles de entender, donde indican los niveles de resistividad de los conductores que fabrican, o en su defecto las capacidades conductivas en niveles de amperaje. De aquí que para cada material será necesario experimentar para encontrar un modelo de función para ρ_c , que lo describa como variable dependiente de la temperatura T ; sin embargo ante la suposición de que ésta pueda ser representada por una función analítica continua (aunque sea en un rango de valores delimitado a estudiar); podría ser modelada desarrollándola de forma simple como una serie de potencias, donde los términos de grado 2 o superior puedan ser en primera instancia despreciados; o simplemente imaginándonos la función ρ_c dependiente de la temperatura T , linealizada en el rango de estudio, y comenzando en una resistividad inicial ρ_{ci} para una temperatura inicial T_i que puede ser ajustada para facilitar la visualización del caso, a cero grados en la escala térmica que estemos usando.

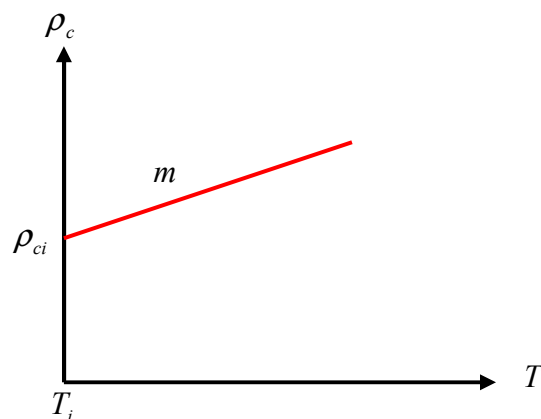


Imagen 6.2.7.1. Representación gráfica de una función ρ_c linealizada.

En la imagen 6.2.7.1. se puede ver una representación gráfica de lo que sería esta función, donde m sería la pendiente de la función y T_i sería el valor de la temperatura inicial, la cual en el caso de la imagen se ha llevado a $T_i = 0$, debido a que haciendo esto podemos escribir directamente la ecuación representativa ajustando a ρ_{ci} , como el valor en el eje de la variable independiente; con lo que aplicando geometría analítica se escribe:

$$\rho_c = m \cdot T + \rho_{ci} \quad (\text{e.6.2.7.1.})$$

Ampliando el caso, a un evento general donde el rango de valores a estudiar este muy lejano a cero en la escala térmica; tendríamos que referenciarlos igualmente con bases en un valor inicial, que llamaremos ρ_{co} , que se de en un valor de temperatura $T_o \neq 0$ (diferente de cero), con lo que la ecuación analítica quedaría:

$$\rho_c = m \cdot (T - T_o) + \rho_{co} \quad (\text{e.6.2.7.2.})$$

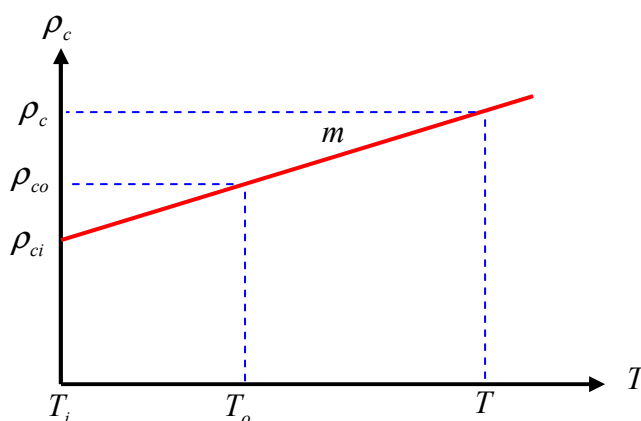


Imagen 6.2.7.2. Representación gráfica de una función ρ_c linealizada, y corregida para que la temperatura inicial sea cualquiera diferente de cero.

La función anterior tiene una gran importancia puesto que el valor de ρ_{co} ya ha sido definido para una buena cantidad de materiales a temperaturas estándar, que son equivalentes a T_o (por lo general 23°C a 25°C), con lo cual solo se requiere definir una pendiente m , en función de la resistividad para obtener un modelo sencillo que pueda evaluarse directamente de la ecuación e.6.2.7.2. Obtenido este resultado, tendremos en nuestras manos un modelo que nos indique la resistividad del material a cualquier temperatura (dentro del rango de comportamiento lineal estudiado), con simplemente reemplazar las características propias del material.

La definición de m , puede realizarse:

$$m = \rho_{co} \cdot \alpha \quad (\text{e.6.2.7.3.})$$

donde α es la función característica de incremento térmico del material en unidades de

$$\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \text{ ó } \frac{1}{^{\circ}\text{F}} \text{ ó } \frac{1}{^{\circ}\text{K}} \text{ ó } \frac{1}{^{\circ}\text{R}}.$$

De esta forma puede escribirse:

$$\rho_c = \rho_{co} \cdot \alpha \cdot (T - T_o) + \rho_{co} \quad (\text{e.6.2.7.4.})$$

$$\rho_c = \rho_{co} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_o)] \quad (\text{e.6.2.7.5.})$$

A continuación ofrecemos una tabla con los valores estándar o de referencia de las resistividades ρ_{co} de los materiales más comunes que han sido estudiados con el fin de determinar sus propiedades resistivas a 23°C.

Material	ρ_{co} ($\Omega \cdot \text{metro}$)
Acero	7.2×10^{-7}
Aluminio puro	2.65×10^{-8}
Aluminio comercial (promedio)	2.80×10^{-8}
Bronce	7.0×10^{-8}
Carbón	3.5×10^{-5}
Constantán (40% Ni, 60% Cu)	4.9×10^{-7}
Cobre puro	1.68×10^{-8}
Cobre recocido	1.70×10^{-8}
Cobre duro	1.80×10^{-8}
Cuarzo	7.5×10^{17}
Estaño	1.15×10^{-7}
Germanio	4.6×10^{-1}
Hierro comercial (99.98% puro)	10×10^{-8}
Hierro puro	9.71×10^{-8}
Hule comercial	10^{13} (aproximadamente)
Kanthal (25% Cr, 5% Al, 70% Fe)	1.4×10^{-6}

Manganina (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	7.5×10^{-7}
Mercurio	9.58×10^{-7}
Nicrom (80% Ni, 20% Cr)	1.08×10^{-6}
Nicromio común	1.5×10^{-6}
Oro	2.2×10^{-8} a 2.3×10^{-8} (depende de tipo)
Piel humana	5×10^5 (promedio aproximado)
Plata	1.59×10^{-8}
Platino	1.1×10^{-7}
Plomo	2.2×10^{-7}
Silicio	6.2×10^2
Sulfuro	10^{15} (aproximado)
Tungsteno	5.6×10^{-8}
Vidrio	10^{10} a 10^{14} (depende de tipo)
Zinc	5.8×10^{-8}

Tabla 6.2.7.1. Valores estándar de ρ_{co} ($\Omega \cdot metro$), para los materiales mas comunes.

La función α podría modelarse como una constante si las características del material así lo permiten en un rango de valores controlado; pero de forma general debemos considerar que la misma función podría tener variaciones con la temperatura a la que es sometido el material, por lo cual debe ser igualmente una función dependiente de T . Para ampliar analíticamente la expresión e.6.2.7.5., bajo la consideración general tomada; debemos integrar, por lo tanto:

$$\rho_c = \rho_{co} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad (\text{e.6.2.7.6.})$$

donde se ha puesto $\alpha_{(T)}$ en lugar de α simplemente para hacer notar que en la ecuación e.6.2.7.6., $\alpha_{(T)}$ depende de la temperatura, mientras que en la e.6.2.7.5. α es constante con respecto de la temperatura o no tiene dependencia con la misma.

Ahora podemos realizar una corrección en la resistencia que fue definida de forma simplista en e.6.2.6.25., utilizando la ecuación e.6.2.7.6., con lo que se escribe:

$$R = \frac{\rho_c \cdot L}{A_p} = \frac{\rho_{co} \cdot L}{A_p} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad (\text{e.6.2.7.7.})$$

donde se ve que la forma de la definición dada por la ecuación e.6.2.6.25., se encuentra linealizada solo en la primera parte de la ecuación, y corresponde a un valor de resistencia solo de referencia, el cual será igualmente a la temperatura de referencia (23°C a 25°C) porque está dado por la resistividad de referencia. Si la ecuación e.6.2.6.25. se considerara (como de hecho generalmente lo es) como una ecuación con ρ_c constante; sería una ecuación que no considera el efecto de variaciones térmicas sobre los materiales; y si formalizar su definición, sería solamente el valor de resistencia de referencia a la temperatura estándar (o en su defecto a la temperatura ideal o de prueba), que es el término que encontramos en la primera parte de la ecuación e.6.2.7.7.

$$R_{(T_0)} = \frac{\rho_{co} \cdot L}{A_p} \quad (\text{resistencia de referencia}) \quad (\text{e.6.2.7.8.})$$

por lo que e.6.2.6.25. puede escribirse como:

$$R_{(T)} = R_{(T_0)} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad (\text{e.6.2.7.9.})$$

Los fabricantes de resistencias eléctricas comerciales, tienen modelos estandarizados que determinan el valor de la función de incremento térmico $\int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT$ por medio de tablas, códigos de colores, códigos numéricos, y otros métodos sencillos que dan valores porcentuales de variabilidad con respecto del valor de la resistencia de referencia. Lo que hemos hecho con la ecuación e.6.2.7.9. es ajustarnos a su formato, haciéndolo general para su aplicación a cualquier material y al mismo tiempo dándole un

grado de precisión mucho mas ajustado; aunque el nivel matemático requerido lógicamente es mucho mas alto con respecto de lo acostumbrado.

En general el formato de medida de resistencias utilizado en ingeniería eléctrica es:

$$R_{(T)} = R_{(T_0)} + R_{(T_0)}f_{(T)} \quad (\text{e.6.2.7.10.})$$

donde $f_{(T)}$ es la función de incremento por temperatura; y en nuestro modelo lo definimos como:

$$f_{(T)} = \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{modelo general de función de incremento térmico}) \quad (\text{e.6.2.7.11.})$$

con lo que las ecuaciones e.6.2.7.10. muy conocida en ingeniería eléctrica y e.6.2.7.9. que ha sido desglosada en éste trabajo se vuelven idénticas.

La función $f_{(T)}$, no había tenido hasta la actualidad una definición mas precisa y aplicable de una forma general que la definición lineal, a la que se puede llegar al hacer que $\alpha_{(T)}$ sea una constante, o sea α . Al hacer esto, la solución integral nos queda:

$$f_{(T)} = \int_{T_0}^T \alpha \cdot dT = \alpha \cdot (T - T_0) \quad (\alpha \text{ constante}) \quad (\text{e.6.2.7.12.})$$

$$f_{(T)} = \alpha \cdot (T - T_0) \quad (\text{e.6.2.7.13.})$$

La ecuación e.6.2.7.13. es la definición mas precisa que podía ser encontrada en el estado del arte de la ingeniería eléctrica hasta ahora. La ecuación e.6.2.7.11. que presentamos en éste trabajo viene a reemplazarla para nuestros efectos y en general es un modelo que puede ser utilizado en cualquier ámbito, el cual tiene un nivel de precisión matemática muy superior a e.6.2.7.13. Es importante que el lector esté anuente que la precisión del modelo presentado en (e.6.2.7.11.) no necesariamente implica que siempre se tendrá una mayor exactitud con respecto a las pruebas reales, pero bajo lo demostrado e.6.2.7.12. deberá ser

por lo menos igual de exacta, y en casos donde el material cambie el valor de su función característica de incremento térmico con la temperatura, será mucho más exacta.

El modelo mas conocido de la función de incremento térmico no es ni siquiera el modelo que presenta e.6.2.7.13., sino un modelo utilizado en resistores comerciales, llamado código de colores, donde una banda de cada color representa un porcentaje de incremento máximo al que puede llegar el valor de resistencia de referencia, pero éste modelo ni siquiera indica a cuantos grados de temperatura se dan éstos incrementos, solo indica los máximos y mínimos, dentro de un rango de temperatura de operación al que debe trabajar el resistor.

La corrección postulada a la ley general de Ohm, viene a ser presentada entonces a partir de la ecuación e.6.2.6.26., al incluir la función corregida $f_{(T)}$ dentro de ρ_c , con lo que se reemplaza ρ_c con e.6.2.7.6. en e.6.2.6.26., obteniéndose:

$$V = \frac{\rho_{co} \cdot L}{A_p} \cdot I \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad (\text{e.6.2.7.14.})$$

donde igualmente al caso de la resistencia se le puede dar definición al primer término de la ecuación como “voltaje de referencia” o “voltaje inicial” o “voltaje de diseño”, haciéndolo:

$$V_{(T_0)} = \frac{\rho_{co} \cdot L}{A_p} \cdot I = R_{(T_0)} \cdot I \quad (\text{e.6.2.7.15.})$$

de forma que la ley de Ohm corregida puede expresarse en función de la temperatura como:

$$V = R_{(T_0)} \cdot I \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad (\text{e.6.2.7.16.})$$

ó

$$V = V_{(T_0)} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad (\text{e.6.2.7.17.})$$

6.2.8. Encontrando un modelo que reemplace a la Ley de Ohm y que tome en cuenta funciones variables con la temperatura sin necesidad de aproximarlas a constantes.

En el punto anterior ya hemos visto un modelo propio en el que presentamos una ecuación que relacione voltajes y corrientes a través de un conductor (como la Ley de Ohm) y que al mismo tiempo tome en cuenta la variabilidad de la temperatura y de las mismas funciones de comportamiento térmico de los materiales. La ecuación encontrada, expresada en distintas formas desde e.6.2.7.14. hasta e.6.2.7.17., puede ser resumida en

$$V = V_{(T_0)} + V_{(T_0)} \cdot f_{(T)} \quad (\text{e.6.2.8.1.})$$

donde $f_{(T)}$ fue definido en e.6.2.7.11.

$V_{(T_0)}$ es el voltaje inicial, de referencia o de diseño del material sometido a una corriente (similar al voltaje encontrado por la Ley de Ohm simple resistencia constante o de diseño)

Si quisiéramos expresarlo como una ecuación diagramada simple, por sus significados, la ecuación e.6.2.8.1. sería

$$V = \text{Voltaje_de_referencia} + \text{Variación_por_temperatura} \quad (\text{e.6.2.8.2.})$$

Cuando en la función $f_{(T)}$ el término de incremento térmico α es constante; se puede ver a partir de e.6.2.7.13. que la ecuación e.6.2.8.1. toma la siguiente forma:

$$V = V_{(T_0)} + V_{(T_0)} \cdot \alpha \cdot (T - T_0) \quad (\alpha \text{ constante}) \quad (\text{e.6.2.8.3.})$$

En el punto anterior también se vio una relación que establece directamente un nexo entre V e I , en e.6.2.7.16. y se sabe que esta ecuación ya toma en cuenta los cambios

térmicos del material. Sin embargo esta ecuación por forma, considera a I , como una función de valor constante con respecto a la temperatura (o continua con valor máximo definido como una senoidal no amortiguada).

De hecho, en la mayor parte de los casos I podría ser considerado como una constante (los casos de diseño y operación normal de los circuitos); pero en un fenómeno de calentamiento de conductores fuera del rango de operación considerado en el diseño inicial, donde la resistividad del material conductor es función de la temperatura, y es perceptible de forma que no pueda despreciarse; definitivamente tendremos una variación de I en función también de la temperatura, y el rango de variación de la temperatura será exactamente el mismo que el del calentamiento del conductor. Debido a esto hacemos otra corrección adicional a la última ecuación encontrada en la sección anterior (aunque a esta ya la habíamos denominado corrección a la Ley de Ohm); y en ésta sección trataré de exponer el trabajo que he realizado para encontrar una ecuación que considere realmente todos los factores necesarios, para modelar de forma adecuada la relación existente entre voltajes y corrientes en los circuitos; pero tomando en cuenta las distintas características del elemento que conduce la corriente, cuando éste elemento se encuentra fuera del rango de operación normal (o sea cuando no es aplicable la ley de Ohm como tal). Esta ecuación es el corazón del modelo de una fuente generadora de incendios por termoconducción, ya que el calentamiento del material conductor de forma anormal será modelado por la misma, y hasta ahora lo más aproximado había sido la ley de Ohm.

Para establecer una relación adecuada entre V e I , multiplicamos e.6.2.8.1. por una ecuación de I variable con la temperatura, o sea un $I_{(T)}$. Al realizar esto se define también el valor de $I_{(T)}$ en la temperatura T_0 inicial, de referencia o de diseño como $I_{(T_0)}$; y de allí el valor del voltaje inicial, de referencia o de diseño dado por la ecuación e.6.2.7.15. quedaría modificado a la forma:

$$V_{(T_0)} = R_{(T_0)} \cdot I_{(T_0)} \quad (\text{e.6.2.8.4.})$$

Otra consecuencia aún más importante de éste hecho es que nos percatamos de un pequeño error que hemos mantenido (a propósito) desde el principio del desglose hasta e.6.2.8.1., que es considerar que el factor dado por (e.6.2.8.4.), puede ser utilizado en

e.6.2.8.1. multiplicándose por $f_{(T)}$ para conseguir la segunda parte de la ecuación, la cual es descrita por e.6.2.8.2. como *Variación por temperatura*. Esto es solo un aproximado pero realmente el valor instantáneo que debiéramos utilizar sería un valor conseguido por la corriente instantánea o sea un $V_{(T)}$, creando la siguiente ecuación, la cual es a primera vista muy complicada para resolver al tener 3 valores de voltaje (2 de los cuales realmente son el mismo, $V_{(T)}$ y V ; y nos daremos cuenta de eso prontamente.

$$V = V_{(T_0)} + \int_{T_0}^T V_{(T)} \cdot \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.6.2.8.5.})$$

Para solucionar este intrincado matemático nos referenciamos en que un voltaje $V_{(T)}$ también puede ser definido de forma simple basándonos en lo que yo llamo una “Ley de Ohm Instantánea respecto de la temperatura”, que sería como imaginar una aplicación práctica de la ley de Ohm que es mas bien un aproximado de medida instantánea tomada durante el calentamiento del material donde se relacione el voltaje instantáneo a la temperatura dada con la corriente instantánea a la misma temperatura. Esto podría escribirse como:

$$V_{(T)} = R_{(T)} \cdot I_{(T)} \quad (\text{e.6.2.8.6.})$$

y como $R_{(T)}$ ya fue perfectamente definido por nosotros en e.6.2.7.9. para cualquier tipo de variación térmica; de forma que e.6.2.8.6. puede resolverse escribiendo:

$$V_{(T)} = R_{(T_0)} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \cdot I_{(T)} \quad (\text{e.6.2.8.7.})$$

donde la función $I_{(T)}$ al ser combinada con el resto de la ecuación nos da nuevamente una ecuación de voltaje en función de la temperatura del material con dos componentes; una que será *el voltaje de referencia*, a la temperatura de referencia (diseño o inicial) T_0 , por lo que toda función que actúe en esa condición debe ser evaluada en T_0 ; y la segunda componente será la *variación por temperatura*, tal como lo indica la ecuación e.6.2.8.2., donde la función

será de tipo integral, y se evaluará entre los límites de temperaturas de referencia y temperatura real T , a la que se encuentre el material conductor. Como $I_{(T)}$ es también función de la temperatura, quedará incluida dentro de la evaluación integral.

$$V_{(T)} = R_{(T_0)} \cdot I_{(T_0)} + R_{(T_0)} \int_{T_0}^T I_{(T)} \cdot \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.6.2.8.8.})$$

La ecuación e.6.2.8.8. nos da un modelo mucho mas preciso para relacionar voltajes y corrientes en un conductor que no este operando a la temperatura de diseño, inicial o de referencia T_0 , y se pueden relacionar utilizando la misma resistencia de referencia del conductor (la nominal o de diseño) identificada por $R_{(T_0)}$. Por ahora no hay datos del comportamiento de $I_{(T)}$ (con respecto de la temperatura) para muchos materiales, solo se han hecho pruebas con conductores metálicos, semiconductores y superconductores a temperaturas de subenfriamiento, pero no hay muchos datos de lo que sucede cuando se recalientan.

Obsérvese que si $I_{(T)}$ resultara ser constante con respecto de la temperatura (asumiendo que por alguna razón la capacidad de conducción no se afecte), el voltaje inicial o de referencia seguirá siendo una constante y la variación por temperatura dependerá solo de $\alpha_{(T)}$, por lo que la ecuación quedaría idéntica a la que había sido presentada en e.6.2.7.17. La nueva ecuación e.6.2.8.8., es mucho mas precisa al considerar las variaciones de corriente con la temperatura, ya que aparte de los efectos analizados de la resistividad; algunos materiales (sobre todo conductores metálicos) cambian su ordenamiento granular molecular al ser calentados; con lo que podrían cambiar también el ordenamiento de sus dipolos. Este efecto puede ser considerado igualmente en función de la temperatura, al realizar la función $I_{(T)}$. Lógicamente como ya se ha visto el comportamiento de $I_{(T)}$ debe ser buscado para cada material analizado de forma experimental.

Véase que aunque e.6.2.8.8. no tiene exactamente la misma forma general de e.6.2.8.1. (que es la misma forma que tiene también la función de resistencia dada en e.6.2.7.10.) por causa de la función $I_{(T)}$; si quisiéramos obtener la función de resistencia a

partir de e.6.2.8.8., si nos encontraríamos con una forma similar en e.6.2.7.10. Se ve en el siguiente desarrollo, al utilizar e.6.2.8.6.

$$R_{(T)} = \frac{V_{(T)}}{I_{(T)}} = R_{(T_0)} \frac{I_{(T_0)}}{I_{(T)}} + R_{(T_0)} \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.6.2.8.9.})$$

donde $\frac{I_{(T_0)}}{I_{(T)}} = 1$ en $T = T_0$ que es el primer termino de la ecuación, quedando:

$$R_{(T)} = R_{(T_0)} + R_{(T_0)} \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.6.2.8.10.})$$

que es la misma ecuación que ya habíamos encontrado en e.6.2.7.10. con lo que se demuestra que su validez es general aunque hayan cambios de corriente en función de la temperatura.

Por medio de e.6.2.7.7. puede verse que la ecuación para la resistividad del material dada en e.6.2.7.6. también continúa manteniendo su validez independientemente de que existan cambios de corriente con la temperatura; como se desarrolla en lo siguiente:

$$R_{(T)} = \frac{\rho_{c(T)} \cdot L}{A_p} = \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot L}{A_p} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] = \frac{L}{A_p} \cdot \left[\rho_{co(T_0)} + \rho_{co(T_0)} \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad (\text{e.6.2.8.11.})$$

donde los valores $\rho_{co(T_0)}$ son los valores de referencia, de diseño, o iniciales cualesquiera que sea el caso (los mismos que los valores ρ_{co} pero se les ha agregado el sub-paréntesis (T_0) para puntualizar que son valores de referencia medidos a la temperatura T_0 que en nuestro modelo puede ser cualquier temperatura que se escoja, y no necesariamente de 23 a 25 grados Celsius como se acostumbra).

De esta forma se puede ver por definición de forma que:

$$\rho_c(T) = \rho_{co(T_0)} + \rho_{co(T_0)} \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.6.2.8.12.})$$

que es exactamente la misma ecuación que la presentada en e.6.2.7.6., con lo que se garantiza su validez aun cuando existan cambios en la intensidad de la corriente en función de la temperatura.

6.2.9. Análisis físico y geométrico de un conductor lineal.

Ya hemos planteado modelos matemáticos que consideran variaciones con la temperatura de cada una de las variables asociadas con la resistividad y producción de calor en un fenómeno de conducción eléctrica a través de un material. Ahora tomaremos tiempo en modelar física y geoméricamente la aplicación específica que nos interesa, que es un conductor lineal cualquiera como el mostrado en la imagen 6.2.9.1. Este modelo lineal puede ser perfectamente el modelo de un conductor eléctrico comercial cualquiera, pues geoméricamente se han considerado 3 situaciones claves en esta decisión:

- Los conductores eléctricos comerciales, sean hilos, alambres, cables o barras, son en general muy largos en proporción con su espesor; por lo cual se asemejan a líneas de corriente.
- La intensidad de corriente I , es un solo vector lineal (aunque parte de una densidad de corriente \vec{J}).
- La dirección que sale resultante para la corriente I es perpendicular a la sección transversal del conductor, y por lo tanto la misma dirección que la del centro de la línea conductora, por lo que su valor esta 100% en línea con el conductor.

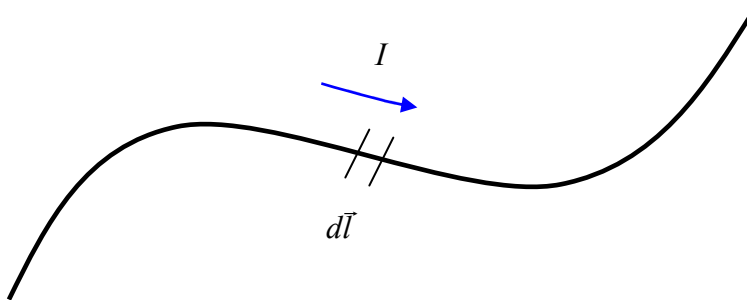


Imagen 6.2.9.1. Representación gráfica de un conductor lineal cualquiera.

Si tomáramos un pequeño elemento diferencial lineal de conductor $d\vec{l}$, tal como se muestra en la imagen 6.2.9.1., en el podríamos medir un elemento de resistencia dada en base a la definición mas básica presentada en e.6.2.6.25. como:

$$dR = \frac{\rho_c \cdot dl}{A_p} \quad (\text{e.6.2.9.1.})$$

Luego de utilizar el mismo método de análisis, y los mismos pasos de resolución, que ya se vieron en la sección 6.2.7.; llegaríamos a una forma diferencial de la ecuación 6.2.7.7. como la siguiente:

$$dR = \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.2.})$$

donde se pueden identificar los dos componentes que siempre tiene la ecuación; el inicial de referencia o de diseño; y la variación con la temperatura:

$$dR = \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p} \cdot dl + \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p} \cdot \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.3.})$$

Ahora al considerar las variables físicas y geométricas del conductor; pensamos en la posibilidad de que la sección transversal A_p del conductor no sea una constante a lo largo de todo el conductor. Esto introduce una dificultad matemática de expresión que puede ser solventada al multiplicar a A_p por una función que modele el efecto de ensanchamiento o disminución de la sección transversal de referencia, con lo que nos quedaría una sección transversal efectiva en función de la variabilidad de la sección de la misma a lo largo de la longitud de donde se encuentre la medida de la misma, o sea un:

$$A_p \cdot \text{función_de_corrección} = A_{p(L)} \quad (\text{e.6.2.9.4.})$$

donde $A_{p(L)}$ es el área de sección transversal efectiva, corregida en función de la variabilidad de la sección a lo largo de la longitud medida del conductor.

Es de mucho cuidado la fabricación de la función $A_{p(L)}$ en los pocos y extraños casos en los que pueda aplicar (pues por lo general los conductores eléctricos cuentan con una sección transversal muy uniforme); de hecho si no lo amerita el caso, siempre es mejor considerar una sección uniforme.

Cuando el caso lo amerite, se deberá integrar la función corregida $A_{p(L)}$, en función de la longitud del conductor; por lo que la ecuación general para determinar la resistencia total del conductor representado en la imagen 6.2.9.1., se obtendría resolviendo la ecuación diferencial e.6.2.9.3.; lo cual podemos hacer por separación de variables e integración directa obteniendo como resultado:

$$R_{(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot \alpha_{(T)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.5.})$$

(ecuación general de resistencia en un conductor lineal cualquiera)

Algo menos usual aún, sería la posibilidad de que el material del conductor variara sus propiedades de resistividad y calentamiento conforme varia la longitud del mismo, ya que esto significaría que el material cambia sus propiedades intrínsecas mientras mas grande o largo es, o que existan cambios de material a medida que se avanza recorriendo la línea que describe el conductor. Pero si esto llegara a suceder podríamos utilizar la misma ecuación e.6.2.9.5. con simplemente hacer a $\rho_{co(T_0)}$ y $\alpha_{(T)}$ codependientes de L . Esto último sería un caso muy insólito pero el modelo que presentamos puede aceptar incluso éste hecho, representado en la siguiente ecuación:

$$R_{(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.5-a.})$$

En general de acuerdo al comportamiento físico de la mayoría de los materiales conocidos y estudiados (en los cuales la resistividad es una función determinada por

propiedades intrínsecas del material y modificada por la movilidad de las cargas y densidad de las mismas, lo cual como se ha visto desde el principio de éste capítulo son eventos alterados solo por la temperatura), la ecuación aplicable es la original deducida en e.6.2.9.5.

Se puede ver que la ecuación e.6.2.9.5. está escrita en la forma del formato general de medida de resistencia utilizado en ingeniería eléctrica dado por e.6.2.7.10., sin embargo podemos observar que el valor $R_{(T_0)}$ ha dejado de ser una constante para convertirse en una función de L gracias a $A_{p(L)}$.

$$R_{(T_0,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_{p(L)}} \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.6.})$$

Sin embargo recuérdese que $A_{p(L)}$ es una función corregida que en la mayor parte de los casos puede ser modelada como una constante porque los conductores comerciales traen secciones muy uniformes. De poder modelar $A_{p(L)}$ como una constante, $R_{(T_0)}$ también será constante.

Por otra parte se ve que el incremento por causas térmicas fuera de la condición inicial, de diseño o de referencia está descrito de forma muy precisa al considerar cualquier forma de incremento así como cualquier variación en las características geométricas del conductor, y si se quisiera en sus propiedades físicas (solo al considerar $\rho_{co(T_0,L)}$ y $\alpha_{(T,L)}$) como:

$$\Delta R_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} f_{(T,L)} = \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot \alpha_{(T)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.7.})$$

La forma general de comportamiento descrita en e.6.2.7.10. sigue respetándose, pero la hemos descrito de una forma mucho más precisa y que se adapte a nuestras necesidades para poder modelar la resistencia del conductor en condiciones fuera de su rango normal de operación, pero en general para cualquier condición dentro o fuera del rango de referencia de un material:

$$R_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + R_{(T_0,L)} f_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + \Delta R_{(T,L)} \quad (\text{e.6.2.9.8.})$$

6.2.10. Encontrando un modelo que reemplace a la Ley de Ohm, que tome en cuenta funciones variables con la temperatura y que considere el análisis físico y geométrico del conductor.

En la sección 6.2.8. ya hemos encontrado un modelo mucho más preciso que la Ley de Ohm para utilizar en el caso de conductores trabajando fuera de sus condiciones térmicas nominales de operación. Es nuestro objetivo ahora, utilizar el desarrollo visto para considerar también las características físicas y geométricas propias del conductor.

Si quisiéramos escribir la Ley de Ohm para una condición específica en un instante de tiempo dado; podríamos respaldarnos con las ecuaciones encontradas; escribiendo:

$$V_{(T,L)} = R_{(T,L)} \cdot I_{(T)} \quad (\text{e.6.2.10.1.})$$

Sin embargo si se perdiera o se inyectara corriente a lo largo del recorrido del conductor (lo que si puede suceder, incluso para recorridos largos siempre hay derivaciones y pérdidas simples de corriente hacia tierra de un mismo conductor); entonces tendríamos que realizar un modelo donde se considere una función corregida de I en relación a la longitud del conductor; o sea un $I_{(T,L)}$.

$$V_{(T,L)} = R_{(T,L)} \cdot I_{(T,L)} \quad (\text{e.6.2.10.2.})$$

Realizando ahora este desarrollo, apoyándonos en las ecuaciones ya demostradas hasta llegar a e.6.2.9.5.; la ecuación desarrollada de e.6.2.10.2. sería:

$$V_{(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I_{(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.2.10.3.})$$

(modelo general para el voltaje en un conductor)

La ecuación anterior, es el modelo buscado en toda la sección 6.2; y concluye un modelo matemático que aunque está basado en la lógica de la Ley de Ohm, considera propiedades físicas, geométricas, e intrínsecas del conductor y de la forma como se mueven los portadores de carga dentro del mismo en función de la temperatura. Igualmente a otras ecuaciones ya demostradas tiene dos partes; una que representa las condiciones iniciales, de referencia o en algunos casos de diseño; y la segunda que representa la variación del voltaje cuando se saca al conductor de sus condiciones térmicas de referencia.

En una inmensa cantidad de casos prácticos, la solución de la ecuación e.6.2.10.3., aunque a primera vista pareciera complicada por las funciones implicadas; no es tan tediosa; puesto que como ya se ha mencionado, la mayor parte de los conductores comerciales tienen una sección $A_{p(L)}$ constante (o sea A_p); en muchos de ellos la función de incremento térmico puede modelarse en algún rango también como una constante ($\alpha_{(T,L)} = \alpha$) y el material del conductor es el mismo e isotrópico a lo largo del todo el recorrido del conductor por lo que definitivamente $\rho_{co(T_0,L)}$ puede ser modelado como una constante (y para $\rho_{co(T_0,L)}$ éste es el caso mas común, que sea simplemente $\rho_{co(T_0)}$)

Cuando las condiciones descritas son aplicables (no en todos los casos pero en muchos); la ecuación e.6.2.10.3. se facilita quedando en la forma casi simplista de la Ley de Ohm; con lo que se demuestra una vez más la validez de la ecuación obtenida.

$$V_{(T,L)} = \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot I_{(T_0)}}{A_p} \cdot L + \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot \alpha \cdot I}{A_p} \cdot (T - T_0) \cdot L \quad (\text{e.6.2.10.4.})$$

(forma más simple de la ecuación modelo para el voltaje en un conductor)

6.3. Relación entre la Energía Eléctrica y el Calor Disipado, adaptada a nuestro modelo.

6.3.1. La Ley de Joule aplicada.

En la sección e.6.2.6. ya se definió oportunamente la ecuación general e.6.2.6.8. para calcular el potencial eléctrico (o voltaje) entre dos puntos, que volvemos a escribir aquí como:

$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{e.6.3.1.1.})$$

Bajo la misma sección se vio también como se puede calcular el trabajo realizado por la fuerza que impulsa las cargas a partir de la existencia del campo \vec{E} ; este valor fue dado por la ecuación e.6.2.6.4. y la repetimos aquí como:

$$W = -\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (\text{ecuación general de trabajo realizado}) \quad (\text{e.6.3.1.2.})$$

Este valor de trabajo según la física clásica es el mismo valor de la energía requerida para realizarlo; por lo tanto si quisiéramos saber cuanta energía se consume al mover una carga de un punto a otro calculamos las diferencias de los niveles energéticos entre los puntos A y B (que se refieren a los puntos de partida y llegada de la carga), y con eso obtenemos el valor del trabajo que es el mismo que el de la energía requerida.

En la misma sección 6.2.6., presentamos la fuerza requerida para mover una carga puntual cualquiera bajo la ecuación e.6.2.6.3.; y podemos extenderla para hacerla aplicable a cualquier cuerpo por medio del método matemático de integración vectorial que hemos estado aplicando a lo largo de todo el desarrollo del capítulo 6 de esta tesis; con lo que obtenemos la ecuación general:

$$\vec{F} = \begin{cases} q \cdot \vec{E} & (\text{puntuales}) \\ \int \vec{E} \cdot dQ & (\text{cuerpos}) \end{cases} \quad (\text{e.6.3.1.3.})$$

donde dq es el elemento diferencial de carga definido en función del sistema de coordenadas ortogonales utilizado.

Se quiere ahora obtener la energía relacionada a las cargas en movimiento; ya que nuestro objetivo final es proporcionar un modelo de fuente generadora de energía calórica por causa de este fenómeno en un conductor cualquiera. Este movimiento de cargas se analizó extensamente desde las secciones 6.2.1. a la 6.2.4. y se demostró que independientemente del tipo de movimiento sea puntual diferencial o macroscópico, cuando la dirección del movimiento es única (caso de conductores comerciales), el mismo está definido por e.6.2.4.10.; ecuación que reescribimos aquí como:

$$I = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{e.6.3.1.4.})$$

La distancia de recorrido de la carga Q para producir calor a través del conductor portador de la misma, será la longitud L del conductor, o sea la longitud de recorrido de la integral dada por e.6.3.1.2. desde A hasta B (que se refieren a los puntos de partida y llegada de la carga). Con base en esto, y combinando las ecuaciones e.6.3.1.2. y e.6.3.1.3. para el caso de cuerpos; obtenemos:

$$W = -\int \int_E \vec{E} \cdot dQ \cdot d\vec{l} \quad (\text{e.6.3.1.5.})$$

multiplicando lo anterior por el factor unitario $\frac{dt}{dt}$

$$W = -\int \int_E \vec{E} \cdot \frac{dQ}{dt} \cdot d\vec{l} \cdot dt \quad (\text{e.6.3.1.6.})$$

utilizando la ecuación e.6.3.1.4.

$$W = -\int \int_E \vec{E} \cdot I \cdot d\vec{l} \cdot dt \quad (\text{e.6.3.1.7.})$$

utilizando la ecuación e.6.3.1.1.

$$W = \int V \cdot I \cdot dt \quad (\text{e.6.3.1.8.})$$

(energía “disipada” en el conductor por causa del movimiento de cargas)

Según el principio físico de la conservación de la energía, la misma no se crea, ni se destruye, solo se transforma; por lo cual esta misma energía debe aparecer en otra forma en el momento del evento físico.

En general en un conductor lineal, que no tenga configuraciones adaptadas donde puedan existir interacciones magnéticas de relevancia, ni trabajo mecánico efectivo posible como producto de esta transformación, o que en su defecto este trabajo mecánico este limitado y pueda ser medido de forma precisa o anulado; la única transformación posible que queda es hacia energía térmica. Si quisiéramos expresar esto a modo de ecuación, escribimos:

$$W_{total_1} = W_{total_2} \quad (\text{e.6.3.1.9.})$$

$$W_{mecánico_1} + W_{electromagnético_1} + Q_{C1} = W_{mecánico_2} + W_{electromagnético_2} + Q_{C2} \quad (\text{e.6.3.1.10.})$$

donde Q_{C1} y Q_{C2} representan el estado de calor 1 y 2 respectivamente; para que puedan ser incorporados en cualquiera de los modelos de ignición y termoconducción que fueron presentados en el capítulo quinto de esta tesis.

Bajo las condiciones de nuestro caso, y tomando como referencia de calor a Q_{C1} (o sea haciéndolo cero para que directamente el valor de Q_{C2} sea el del calor disipado):

$$W_{mecánico_1} = Q_{C1} = W_{mecánico_2} = W_{electromagnético_2} = 0 \quad (\text{e.6.3.1.11.})$$

por lo cual se obtiene

$$W_{electromagnético_1} = Q_{C2} \quad (\text{e.6.3.1.12.})$$

y este valor será el valor de energía disipada en el conductor calculada por e.6.3.1.8.

$$W_{\text{conductor}} = \int V \cdot I \cdot dt = W_{\text{electromagnético}_1} = Q_{C2} \quad (\text{e.6.3.1.13.})$$

Lo anterior es una aplicación de lo que en electricidad se conoce como “Efecto Joule” y describe matemáticamente la transformación de energía eléctrica en calor.

6.3.2. El modelo de la fuente generadora de potencia eléctrica en forma de calor

Nos interesa también relacionar o encontrar la velocidad a la que se disipa ésta energía en el conductor, para poder relacionar nuestro modelo con la ecuación general de difusión de calor encontrada en el capítulo cinco, en e.5.2.1.3.1.21. Para esto debemos conocer que tan rápido se disipa ésta energía; o sea dividirla en unidades de tiempo. A este valor se le conoce con el nombre de *Potencia Eléctrica* (lo denotaremos por P_c); y para encontrar el valor solicitado por e.5.2.1.3.1.21. y definido por e.5.2.1.3.1.24, se requeriría simplemente el valor de esta potencia eléctrica por unidad de volumen; y se incluye en la ecuación de difusión de calor complementando el modelo.

Para obtener la potencia por elemento diferencial (o sea potencia instantánea) usamos un valor diferencial de la energía:

$$dW = V \cdot I \cdot dt \quad (\text{e.6.3.2.1.})$$

y como ya definimos:

$$P_c = \frac{dW}{dt} \quad (\text{e.6.3.2.2.})$$

de e.6.3.2.1. se obtiene:

$$P_c = V \cdot I \quad (\text{e.6.3.2.3.})$$

la cual es una ecuación ampliamente conocida en ingeniería eléctrica como la ecuación de la potencia eléctrica, con la cual hemos concordado nuevamente.

Por medio del reemplazo de las ecuaciones pertinentes a la Ley de Ohm simple; podemos encontrar otras formas de la ecuación de potencia eléctrica dada por e.6.3.2.3.; las cuales son:

$$P_c = R \cdot I^2 \quad (e.6.3.2.4.)$$

$$P_c = \frac{V^2}{R} \quad (e.6.3.2.5.)$$

Estas ecuaciones no nos interesan tanto; pero son importantes porque son ecuaciones que al reemplazar en ellas las funciones instantáneas de I , R y V , nos darán el valor de la potencia instantánea. De acuerdo a esto si utilizamos nuestro modelo de relación de voltajes y corrientes desarrollado en la sección 6.2. con cualquiera de las tres ecuaciones anteriores dadas; obtendremos una ecuación de potencia (o en nuestro caso específico calor disipado) en el conductor por causa de sus propiedades intrínsecas de movimiento de cargas, resistividad, temperatura de operación y efectos físicos y geométricos; que será una ecuación de potencia en función en primera instancia de la temperatura, la forma, las propiedades físicas intrínsecas y la longitud del conductor; y en segunda instancia de las variables que son subvariables de P_c al ser variables de alguna de sus funciones como lo es el tiempo en las funciones de corriente y voltaje y sus formas de onda.

Al realizar el ejercicio; desarrollamos la ecuación e.6.3.2.3. con la ecuación encontrada en e.6.2.10.3.; de donde obtenemos:

$$P_{c(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2_{(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (e.6.3.2.6.)$$

(modelo general de la potencia disipada en un conductor eléctrico)

y si quisiéramos el valor por unidad de volumen para la ecuación de difusión de calor en un estudio de 3 dimensiones se divide $P_{c(T,L)}$ entre la longitud L simplemente pues ya esta considerada la división entre el área transversal del conductor $A_{p(L)}$; de forma que g puede buscarse expresado como:

$$g = \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2(T_0,L)}{A_{p(L)}} + \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2(T,L)}{A_{p(L)}} \cdot dT \quad (\text{e.6.3.2.7.})$$

(fuente puntual diferencial generadora de calor de potencia eléctrica en de un conductor)

Por medio de la ecuación anterior se puede calcular la generación interna de calor producida por un conductor eléctrico para ser ingresada en la ecuación general de difusión de calor dada por e.5.2.1.3.1.21. Lo importante de esto es que ahora contamos con un modelo preciso que se ajusta a las características físicas, intrínsecas y geométricas propias del conductor, por medio del cual se puede determinar la difusión de calor en los alrededores del mismo y por lo tanto los gradientes térmicos. En otras palabras, se puede determinar la temperatura existente en el conductor, así como en sus alrededores; y al mismo tiempo se considera también el efecto que causan los incrementos térmicos sobre los voltajes y las corrientes, retroalimentando el modelo.

6.4. Bibliografía Relacionada del Capítulo VI

Alonso, Marcelo; Finn, Edward (1998). Física Vol II, Campos y Ondas. Editorial Interamericano, México, 1032 pp.

Carozzi, T.; Eriksson, A; Lundborg, B. (2006). Electromagnetic Field Theory. Bo Thidé, Sweden, 187 pp.

Edminister, Joseph (1992). Electromagnetismo. McGraw –Hill, Mexico, 202 pp.

Erlandsson R., Strand G. “An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage”, Fire Safety Journal, Vol. 8, 1984, p.97-103.

- Halliday, David; Resnick, Robert . (1972). Física II. CECSA, México, 1757 pp.
- Hyat, William (1967). Engineering Electromagnetics, McGraw – Hill & Kogakusha LTD, Tokyo, Japan, 435 pp.
- Ishibashi Y., Kishida J. “Research on First and Second Fused Mark Dscrimination of Electric Wires” Anual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg., Japón, 1990, p.83-90.
- Knowlton, Archer E. (1957). Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw – Hill & Kogakusha Company LTD, Tokyo Japan, New York, Toronto, London; 2230 pp.
- Kraus, J; Carver, K. (1973). Electromagnetics, McGraw – Hill & Kogakusha LTD, Tokyo, Japan, 828 pp.
- Montgomery, Douglas (1991). Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, New York, 649 pp.
- Reitz, J.; Mildford, F. (1967). Foundations of Electromagnetic Theory, Addison Wesley, U.S.A., 435 pp.
- Rudin, Walter (1964). Principles of Matematical Análisis, McGraw – Hill, New York, 270 pp.
- Sadiku, Matthew (2003). Elementos de Electromagnetismo, Oxford University Press, México, 767 pp.
- Sanjuro, Rafael (1988). Electromagnetismo, McGraw – Hill, España, 309 pp.
- Selfridge, R.; Arnold, D.; Warnick, K. (2001). Electromagnetics, Bringham Young University, Provo, 47 pp.
- Spiegel, Murray (1969). Análisis Vectorial, McGraw – Hill, México, 222 pp.
- Yearance, Robert (1997). Electrical Fire Analysis, John Wiley, U.S.A., 263 pp.

CAPÍTULO VII

Pruebas Experimentales de Fuentes Eléctricas Generadoras de Incendios por Termoconducción.

EN ESTE CAPÍTULO:

- 7.1 Listado de Materiales básicos a utilizar en las pruebas experimentales.
 - 7.1.1. Cámara termográfica FLIR i60.
 - 7.1.2. Medidor de Voltajes, Corrientes y Ohmiaje de alta precisión.
 - 7.1.3. Voltímetro-Ohmímetro y Amper Clamp de alta precisión.
 - 7.1.4. Resistores de alta potencia.
 - 7.1.5. Potenciómetro de alta potencia.
 - 7.1.6. Fuente de energía de Corriente Directa (DC) de alto amperaje.
 - 7.1.7. Cables eléctricos de fabricación y calibres comerciales AWG.
 - 7.1.7.1. Tablas de conversión para alambres y cables de calibres comerciales AWG.
- 7.2. El Circuito de Pruebas.
- 7.3. La construcción del circuito.
- 7.4. El Método de Pruebas

CAPITULO VII

Pruebas Experimentales de Fuentes Eléctricas Generadoras de Incendios por Termoconducción.

Como ya se ha visto en el capítulo anterior; nuestro modelo puede ser ajustado de forma muy amplia a una gran variedad de necesidades de modelado para un conductor eléctrico en específico. Hemos tomado tiempo para diseñar y desarrollar algunos experimentos controlados de laboratorio; por medio del cual pueden obtenerse resultados de pruebas controladas, y compararlas con los resultados matemáticos de las funciones del modelo, luego de ajustarlas a las características de nuestra prueba controlada.

Para ello, nos fue necesario armar un juego de experimentación, que consta de costosos equipos de última tecnología, como una cámara termográfica de última generación y medidores de voltaje, corriente y ohmiaje de alta precisión.

El listado completo de los equipos y materiales se presenta a continuación y el lector puede consultar sobre la tecnología y forma de operación de los mismos en la bibliografía referenciada.

7.1. Listado de Materiales básicos a utilizar en las pruebas experimentales.

7.1.1. Cámara termográfica FLIR i60.

Una moderna cámara termográfica FLIR i60 es uno de los componentes mas preciados de nuestro juego de instrumentos de medición. Por medio de ella podemos determinar por análisis termográficos la temperatura de los conductores bajo cada una de las condiciones requeridas por nuestro experimento.



Imagen 7.1.1.1. Cámara termográfica de FLIR Systems, modelo i60.

7.1.2. Medidor de Voltajes, Corrientes y Ohmiaje de alta precisión.

Un multimedidor de Extech Instruments; modelo 430, será utilizado para determinar con precisión la medida de amperaje que fluye por el circuito de pruebas en cada situación. Este medidor es parte de un Kid de Instrumentos de Medidas Eléctricas para determinar problemas eléctricos de tipo industrial de Extech Instruments, y tiene capacidad para detectar variaciones de corrientes de orden inferior a milésimas de amperios. También será utilizado para tomar medidas de resistencia y tiene capacidad para detectar variaciones de fracciones de ohmios.

7.1.3. Voltímetro-Ohmímetro y Amper Clamp de alta precisión.

El Kid de Extech Instruments que utilizaremos (KT430-IR), trae un segundo medidor de alta precisión por medio del cual se pueden medir igualmente voltajes y

resistencias en D.C. (corriente directa) y hasta corrientes en A.C.(corriente alterna) sin necesidad de conectar físicamente el aparato al circuito. Como deseamos mucha precisión no utilizaremos ésta última característica del Kid de instrumentos; y trabajaremos en D.C.



Imagen 7.1.3.1. Kid de mediciones eléctricas industriales de alta precisión de EXTECH INSTRUMENTS, modelo KT430-IR.

7.1.4. Resistores de alta potencia

Un juego de resistores de alta potencia serán utilizados para aproximar los niveles de ohmios requeridos en el experimento para efectos de limitar la corriente de la fuente. La medida final de la resistencia limitadora estará dada por un potenciómetro.

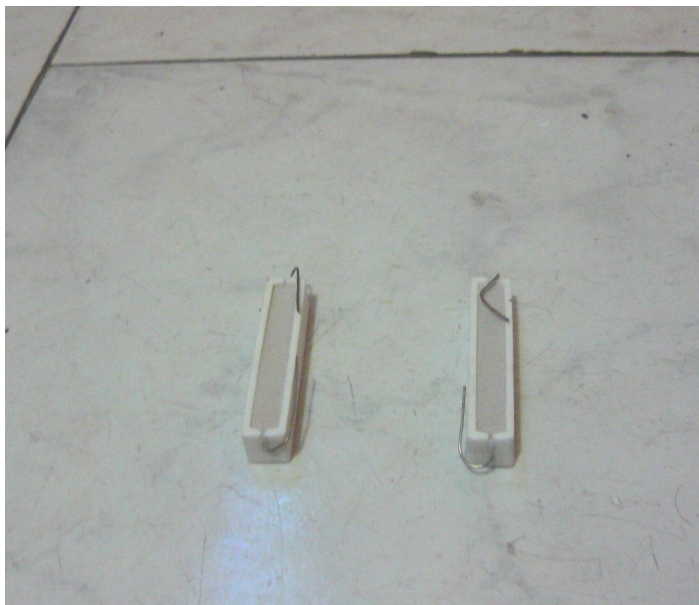


Imagen 7.1.4.1. Resistores de alta potencia (especiales para trabajo con altas ampacidades).

7.1.5. Potenciómetro de alta potencia

Un potenciómetro de alta potencia será utilizado para tratar de obtener los puntos de operación con una mayor precisión. Se hará la combinación aproximada de resistores limitadores de corriente de alta potencia y se conectarán en serie el potenciómetro para aproximar los niveles de corriente que deseamos en el conductor a probar.



Imagen 7.1.5.1. Potenciómetro de alta potencia, para realizar ajustes finos en la ampacidad del circuito.

7.1.6. Fuente de energía de Corriente Directa (DC) de alto amperaje.

Una fuente de energía DC (corriente directa), fabricada por AUTOCRAFT, modelo 27CHD-MF de aplicaciones en maquinaria industrial y con capacidad de corriente hasta de 760 amperios, será utilizada para alimentar el circuito y proveer de la corriente necesaria a los conductores en prueba. Si bien es cierto no pensamos que llegaremos a utilizar ni la mitad de esta corriente; se ha seleccionado esta fuente pensando en que la misma trabaje holgada de manera que la caída interna de voltaje en la misma pueda ser despreciable para los efectos de nuestro experimento; en otras palabras que pueda ser considerada una fuente infinita de potencia en relación a los conductores que va a alimentar, que son chicos; los mas grandes tienen corrientes de operación máximas de 10 a 15 amperios; y los mas chicos operan normalmente con 0.5 a 5 amperios.



Imagen 7.1.6.1. Fuente de energía D.C. fabricada por AUTOCRAFT, modelo 27CHD-MF.

7.1.7. Cables eléctricos de fabricación y calibres comerciales AWG

Los cables eléctricos serán de calibres comerciales estandarizados según la escala de la AWG (*American Wire Gauge*) con revestimiento aislante hasta para 600 voltios

manteniendo sus propiedades por incremento térmico, de calor y de humedad siempre y cuando no se sobrepasen los 75°C.

La escala de AWG obedece prácticamente a los pasos sucesivos del proceso de estirado del alambre que existía en 1857. Se seleccionaron el diámetro más grueso de 0,4600 pulgadas (calibre 4/0) y el diámetro más delgado de 0,0050 pulgadas (calibre 36); se determinaron 38 dimensiones entre dichos calibres. De tal suerte, que la razón entre un diámetro y el siguiente está dada por la progresión geométrica:

$$\sqrt[39]{\frac{0,4600}{0,0050}} = \sqrt[39]{92} = 1,1229 \quad (\text{e.7.1.7.1.})$$

Es decir, la razón entre dos diámetros consecutivos en la escala AWG es constante e igual a 1.229.

Por esta razón los pasos de los calibres con respecto al diámetro son regresivos, pues corresponden en realidad a los pasos del proceso de estirado del alambre. No obstante, para los calibres de mayor grosor, se optó la solución de identificarlos directamente por el área en el sistema inglés de medida:

- *Mil*, para los diámetros, es decir una milésima de pulgada.
- *Circular mil*, para las áreas, unidad que representa el área del círculo de un mil de diámetro, es decir, 0,7854 mils cuadrados.
- *kcimil*, para secciones de mayor área. Estas siglas también eran conocidas hasta finales del siglo XX como *MCM* o *KCM*.²

7.1.7.1. Tablas de conversión para alambres y cables de calibres comerciales AWG.

Las tablas de conversión presentan muchos formatos distintos pero su fin es el mismo; permiten saber el diámetro y superficie o área de sección del conductor, conociendo el número **AWG** que lo representa

A continuación se presenta una tabla de fácil lectura, donde se resumen las características más relevantes de los conductores comerciales AWG. Si el lector desea conocer más de lo contenido en ésta tabla puede consultar el anexo 2 donde se presenta una tabla más completa; o la bibliografía de referencia.

CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTORES COMERCIALES AWG:

AWG	Diámetro		Área		Resistencia Eléctrica en <u>Cobre</u> (Ω /1 km)	Resistencia Eléctrica en <u>Cobre</u> (Ω /1000 ft)	Corriente permisible en <u>Cobre</u> a 60 °C aislado (A)	Equivalencia aproximada estándar métrico
	(in)	(mm)	(kcmil)	(mm ²)				
1000 kcmil	1.0590	26.90	1000	507				
900 kcmil	1.0000	25.40	900	456				
750 kcmil	0.9094	23.10	750	380				
600 kcmil	0.8110	20.60	600	304				
500 kcmil	0.7358	18.69	500	253				
400 kcmil)	0.6590	16.74	400	203				
350 kcmil	0.6161	15.65	350	177.3				

250 kcmil	0.5200	13.21	250	126.7		
0000(4/0)	0.4600	11.68	211.6	107		
000(3/0)	0.4096	10.40	167.8	85		
00(2/0)	0.3648	9.266	133.1	67.4		
0(1/0)	0.3249	8.251	105.5	53.5	~0.3281	~0.1
1	0.2893	7.348	83.69	42.4		110
2	0.2576	6.544	66.37	33.6		95
3	0.2294	5.827	52.63	26.7		85 196/0.4
4	0.2043	5.189	41.74	21.2		70
5	0.1819	4.621	33.10	16.8		126/0.4
6	0.1620	4.115	26.25	13.3		55
7	0.1443	3.665		10.5		80/0.4
8	0.1285	3.264		8.37		40

9	0.1144	2.906	6.63				>84/0.3
10	0.1019	2.588	5.26	3.2772	0.9989	30	<84/0.3
11	0.0907	2.305	4.17	4.1339	1.260		56/0.3
12	0.0808	2.053	3.31	5.210	1.588	20	
13	0.0720	1.828	2.62	6.572	2.003		50/0.25
14	0.0641	1.628	2.08	8.284	2.525	15	
15	0.0571	1.450	1.65	10.45	3.184		>30/0.25
16	0.0508	1.291	1.31	13.18	4.016	10	<30/0.25
17	0.0453	1.150	1.04	16.614	5.064		32/0.2
18	0.0403	1.02362	0.823	20.948	6.385		>24/0.2
19	0.0359	0.9116	0.653	26.414	8.051		<24/0.2
20	0.0320	0.8128	0.518	33.301	10.15		16/0.2
21	0.0285	0.7229	0.410	41.995	12.80		

22	0.0253	0.6438	0.326	52.953	16.14	7/0.25
23	0.0226	0.5733	0.258	66.798	20.36	
24	0.0201	0.5106	0.205	84.219	25.67	1/0.5, 7/0.2, 30/0.1
25	0.0179	0.4547	0.162	106.201	32.37	
26	0.0159	0.4049	0.129	133.891	40.81	7/0.15
27	0.0142	0.3606	0.102	168.865	51.47	
28	0.0126	0.3211	0.081	212.927	64.90	
29	0.0113	0.2859	0.0642	268.471	81.83	
30	0.0100	0.2546	0.0509	338.583	103.2	1/0.25, 7/0.1
31	0.0089	0.2268	0.0404	426.837	130.1	
32	0.0080	0.2019	0.0320	538.386	164.1	1/0.2, 7/0.08
33	0.0071	0.1798	0.0254	678.806	206.9	
34	0.0063	0.1601	0.0201	833	260.9	

35	0.0056	0.1426	0.0160	1085.958	331.0
36	0.0050	0.1270	0.0127	1360.892	414.8
37	0.0045	0.1131	0.0100	1680.118	512.1
38	0.0040	0.1007	0.00797	2127.953	648.6
39	0.0035	0.08969	0.00632	2781.496	847.8
40	0.0031	0.07987	0.00501	3543.307	1080.0

Tabla 7.1.7.1..1. Tabla de propiedades de conductores comerciales estandarizados AWG.

Específicamente en nuestro experimento utilizaremos conductores AWG 14, 16, 18, 20 y 24.

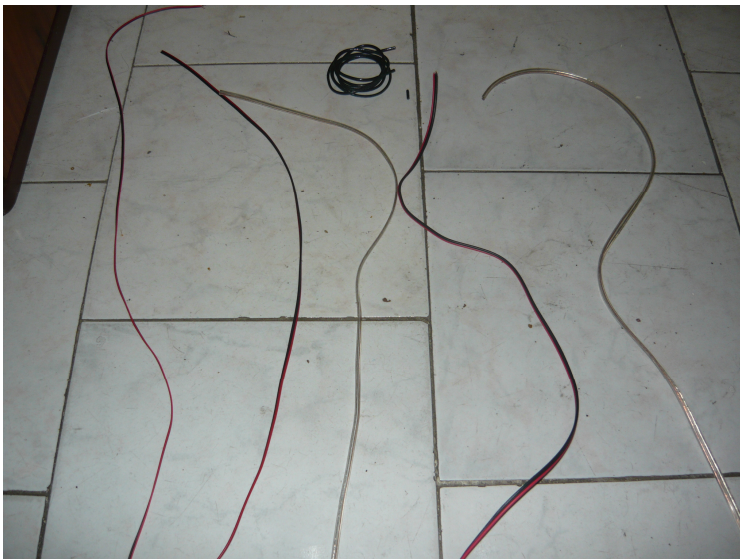


Imagen 7.1.7.1.1. Cables que serán probados en este experimento; de izquierda a derecha según denominación de la AWG, #24, #20, #18, #16 y #14. Arriba de todos en un pequeño enrollado figura un alambre sólido # 12 según AWG (mas grueso que todos los cables) que será utilizado para realizar conexiones fijas del circuito de pruebas.

7.2. El Circuito de Pruebas.

El circuito de pruebas es sumamente sencillo; se trata de probar los conductores y sus comportamientos con la influencia de niveles distintos de corriente y a distintas temperaturas; pero todos utilizarán exactamente el mismo arreglo y las mismas variables controladas para tener puntos de referencia.

El circuito básico, como se ve en la imagen 7.2.1., consistirá de el conductor (de cada calibre) conectado en serie con los elementos limitadores de corriente (resistores de potencia y potenciómetro), y de allí en serie con la fuente de energía eléctrica DC. Se darán diferentes niveles de resistencia al potenciómetro y los resistores a fin de ver lo que sucede con los voltajes corrientes y temperaturas en el conductor y fuera de él. El voltaje se medirá con uno de los medidores eléctricos de precisión en las terminales del conductor; la corriente con el otro, conectado antes del regreso de la batería, y la cámara termográfica registrará las temperaturas del conductor en los diferentes estados. Cabe destacar que antes de registrar cada anotación se dejara que el conductor esté bajo la condición establecida en cada registro por lo menos medio minuto a forma de ver que se está tomando la medida en el estado estable de la condición.

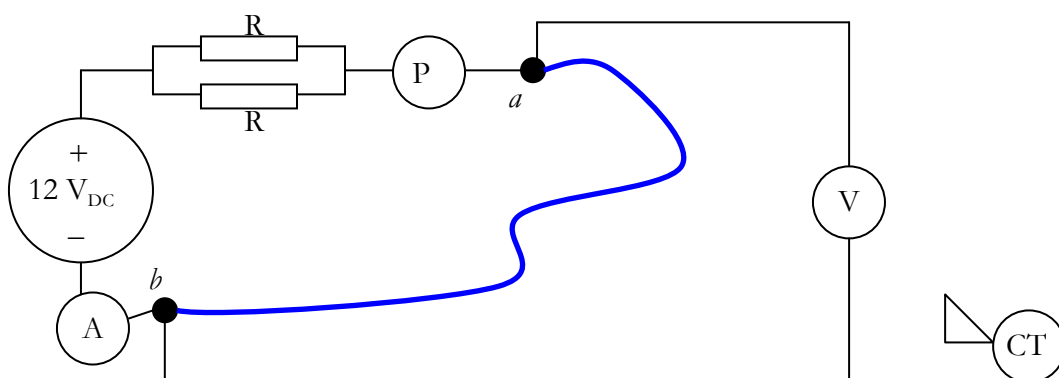


Imagen 7.2.1. Representación gráfica del circuito de pruebas experimentales. El conductor a probar se encuentra entre los terminales *a* y *b*. Las simbologías utilizadas representan:

- R: resistores de alta potencia en la configuración requerida para cada caso.
- P: potenciómetro de alta potencia.
- V: medidor de voltaje de alta precisión.
- A: medidor de corriente de alta precisión.
- 12 V_{DC}: fuente de energía de alta ampericidad y 12 voltios en corriente directa.
- CT: cámara termográfica de última generación.

7.3. La construcción del circuito.

La construcción física del circuito tomará algún tiempo, pues es un circuito que manejará corrientes en el orden de varios amperios por lo cual se convierte en un circuito peligroso y debe ser tratado con cautela. Por seguridad todo el circuito se hará a nivel del piso separando el mismo del piso por medio de un aislante dieléctrico resistente a la combustión de pulgada y media de espesor (más que suficiente para varios kilovolts de aislamiento eléctrico aunque solo trabajaremos con 12 voltios pero con varios amperios).

Se tiene a mano también un extintor de incendios del tipo ABC para combatir incendios de combustibles sólidos, líquidos y eléctricos.

Se fabricarán las terminales a la fuente de energía con el alambre sólido aislado #12 AWG, que es bastante rígido pero al mismo tiempo permite ser moldeado con un alicate eléctrico sin dificultad. Estos terminales deben quedar bien ajustados en los polos de la fuente



Imagen 7.3.1. Terminal de conexión a la fuente de energía fabricado con alambre sólido #12 AWG

Se unirá el terminal positivo al resistor de alta potencia (o al arreglo de resistores) que mas se acerque a los niveles que correspondan según los requerimientos de la prueba a realizar en cada caso. Deben enrollarse el terminal del resistor con el extremo del cable que va a la fuente.



Imagen 7.3.2. Conexión inicial al resistor de alta potencia.

Se realiza el mismo procedimiento desde el resistor (o resistores) de alta potencia hasta el potenciómetro; y se enrollan los alambres en las terminales de los elementos. Se conecta luego el cable a probar, que serán tramos de 4 pies en todas las tallas; y al final del cable se instala el medidor de precisión de corriente y luego al terminal negativo de la fuente. El medidor de voltaje queda fuera porque solo se utilizará por toque directo entre los terminales del cable a probar para medir su voltaje en el momento y luego su resistencia.

Luego de tener el circuito inicialmente armando, hay que asegurarlo. Recuerde que se trabajará con niveles de varios amperios de corriente y no es deseable una desconexión repentina de alguno de los elementos; porque se produciría un chispazo. Para prevenir esto, utilizamos soldadura por termofusión de estaño en cada una de las terminales antes puestas.

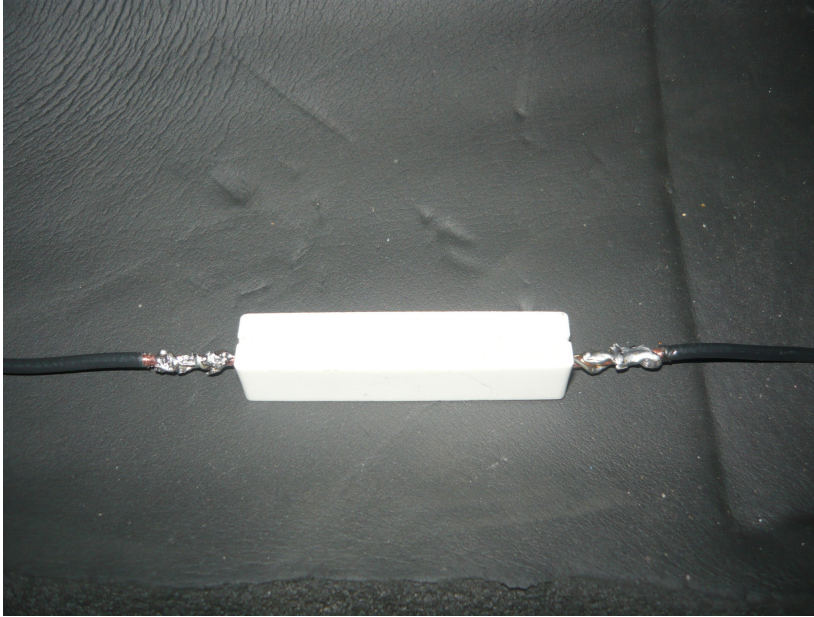


Imagen 7.3.3. Resistor de alta potencia con sus terminales aseguradas con soldadura por termofusión de estaño.

Una vez hecho esto tenemos el circuito listo. Lo último que se realiza es la conexión a la fuente. Aunque los niveles de voltaje son bajos, se utilizan por seguridad guantes dieléctricos; primero se conecta el terminal negativo y por último el positivo. Cuando ambos terminales están conectados el circuito está funcionando y el conductor estará transmitiendo la corriente que le permitan los resistores de alta potencia y el potenciómetro que son los que limitan la misma. En este momento se realizan las mediciones de cada caso.



Imagen 7.3.4. Circuito de pruebas listo para entrar en funcionamiento solo al conectar el terminal positivo (el izquierdo) de la fuente de energía. El cable a probar está sobre el aislante negro inferior; y la fuente sobre otro aislante negro idéntico en la parte superior de la imagen.

7.4. El Método de Pruebas.

Una vez construido el circuito llevaremos el mismo a condiciones de intensidad de corriente determinadas, similares a las que se ven en la tabla 7.4.1.; y esperaremos en cada condición por 30 segundos antes de tomar las medidas pertinentes, para tratar de conseguir una medida en “estado estable”. La curva de calentamiento en relación al tiempo, asemeja una logarítmica, porque siempre continúa calentándose un poco; sin embargo tomamos lecturas cuando vemos que la medida de temperatura aparentemente no cambia o cambia muy lentamente. Nótese que el ambiente de cada prueba es a temperatura ambiente controlada (tratando de simular la temperatura ambiente estándar de la condición nominal de medida y diseño de resistividades; aproximadamente 25°C).

Conductor en prueba:

Temperatura Ambiente: 25°C

V _{fuelle}	R _{resistores}	R _{potenci6metro}	I _{conductor}	T _{conductor}	V _{conductor}	R _{conductor}	P _{conductor}
12.35	4	8	1				
12.30	4	2	2				
12.20	2	2	3				
12.10	2	1	4				
12.00	2	0.4	5				

Tabla 7.4.1. Presenta las variables controladas. Los valores de voltajes son en voltios, los de resistores y potenci6metro en ohmios y los de corriente en amperios.

De acuerdo a los resultados de esta tabla se podr6 ver el cumplimiento del modelo presentado. Las medidas de resistencia y potencia del conductor en las dos 6ltimas columnas son instant6neas calculadas por medio de la ley de ohm y potencia instant6nea en 6se momento, bajo esas condiciones.

CAPÍTULO VIII

Análisis de Resultados Experimentales y el Modelo

EN ESTE CAPÍTULO:

- 8.1. Resultados Experimentales
- 8.2. Termografías
 - 8.2.1. Cable 14 AWG, recubierto CBX
 - 8.2.2. Cable 16 AWG, recubierto HWY
 - 8.2.3. Cable 18 AWG, recubierto CBX
 - 8.2.4. Cable 20 AWG, recubierto HWY
 - 8.2.5. Cable 24 AWG, recubierto HWY
- 8.3. Análisis Gráfico
- 8.4. Aproximación de los valores reales al modelo
 - 8.4.1. Exactitud del modelo lineal
 - 8.4.2. Exactitud del modelo integral

CAPITULO VIII

Análisis de Resultados Experimentales y el Modelo

8.1. Resultados Experimentales.

En ésta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos con cada conductor probado en los rangos de operación y con el conductor 24 AWG, llevado fuera de su rango de operación, se observo su comportamiento y se midieron todas las variables de interés.

A continuación los resultados obtenidos de las pruebas en las siguientes cinco tablas de resultados.

8.1.1. TABLAS DE RESULTADOS DE PRUEBAS

TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA									
Conductor en prueba:		14 AWG		aislante:		CBX			
Temperatura Ambiente:		25°C							
V(fuente)	R(resistor)	R(potenc)	I(conductor)	T(conductor)	V(conductor)	R(conductor)	P(conductor)		
12.35	8	4	0.982	27.6	0.078	0.07942974	0.076596		
12.30	4	2	2.01	28.5	0.164	0.08159204	0.329640		
12.20	4	0	2.83	28.6	0.24	0.08480565	0.679200		
12.10	2	1	3.64	30.6	0.298	0.08186813	1.084720		
12.00	2	0	5.37	30.8	0.443	0.08249534	2.378910		

Tabla 8.1.1.a.

TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA									
Conductor en prueba:		16 AWG		aislante:		HWY			
Temperatura Ambiente:		25°C							
V(fuente)	R(resistor)	R(potenc)	I(conductor)	T(conductor)	V(conductor)	R(conductor)	P(conductor)		
12.35	8	4	0.993	27.4	0.04	0.04028197	0.039720		
12.30	4	2	2.04	27.9	0.084	0.04117647	0.171360		
12.20	4	0	2.8	28.1	0.133	0.04750000	0.372400		
12.10	2	1	3.61	30	0.144	0.03988920	0.519840		
12.00	2	0	5.3	30.1	0.26	0.04905660	1.378000		

Tabla 8.1.1.b.

TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA

Conductor en prueba:		18 AWG		aislante:		CBX	
Temperatura Ambiente:		25°C					
V(fuente)	R(resistor)	R(potenc)	I(conductor)	T(conductor)	V(conductor)	R(conductor)	P(conductor)
12.35	8	4	1.1	27.8	0.176	0.1600000	0.193600
12.30	4	2	2.03	28.5	0.357	0.17586207	0.724710
12.20	4	0	2.745	29.3	0.512	0.18652095	1.405440
12.10	2	1	3.47	32.4	0.557	0.16051873	1.932790
12.00	2	0	5.17	34.7	0.92	0.17794971	4.756400

Tabla 8.1.1.c.

TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA

Conductor en prueba:		20 AWG		aislante:		HWY	
Temperatura Ambiente:		25°C					
V(fuente)	R(resistor)	R(potenc)	I(conductor)	T(conductor)	V(conductor)	R(conductor)	P(conductor)
12.35	8	4	1.08	28.2	0.136	0.12592593	0.146880
12.30	4	2	2.05	28.5	0.251	0.12243902	0.514550
12.20	4	0	2.73	29.5	0.348	0.12747253	0.950040
12.10	2	1	3.5	32.6	0.466	0.13314286	1.631000
12.00	2	0	5.27	35.8	0.692	0.13130930	3.646840

Tabla 8.1.1.d.

TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA									
Conductor en prueba:		24 AWG	aislante:		HWY				
Temperatura Ambiente:		25°C							
V(fuente)	R(resistor)	R(potenc)	I(conductor)	T(conductor)	V(conductor)	R(conductor)	P(conductor)		
12.35	8	4	1.08	29	0.238	0.22037037	0.257040		
12.30	4	2	1.98	29.5	0.46	0.23232323	0.910800		
12.20	4	0	2.7	32.3	0.635	0.23518519	1.714500		
12.10	2	1	3.4	35.9	0.85	0.25000000	2.890000		
12.00	2	0	4.89	39.9	1.119	0.22883436	5.471910		
11.80	1	0	8.35	75	2.25	0.26946108	18.787500		
11.66	0.5	0	13	150	4.4	0.33846154	57.200000		

Tabla
8.1.1.e.

8.2. Termografías.

El principal objetivo de las pruebas es demostrar la funcionalidad o no del nuevo modelo que hemos desarrollado a lo largo de ésta tesis. Para ello necesitamos conocer las temperaturas reales en los conductores dependiendo de las condiciones a las cuales son sometidos. Estas temperaturas ya se han tabulado en las tablas presentadas en el punto 8.1 de éste capítulo; y aquí se presentan algunas de las termografías que se utilizaron para realizar los análisis termográficos de los cuales salieron dichos datos; sólo las mas representativas.

8.2.1. Cable 14 AWG, recubierto CBX

Este cable tiene capacidad de conducir con facilidad hasta 15 amperios, acercándose a los 3 amperios; comenzó a determinarse realmente algo de calentamiento; nada fuera de lo normal.

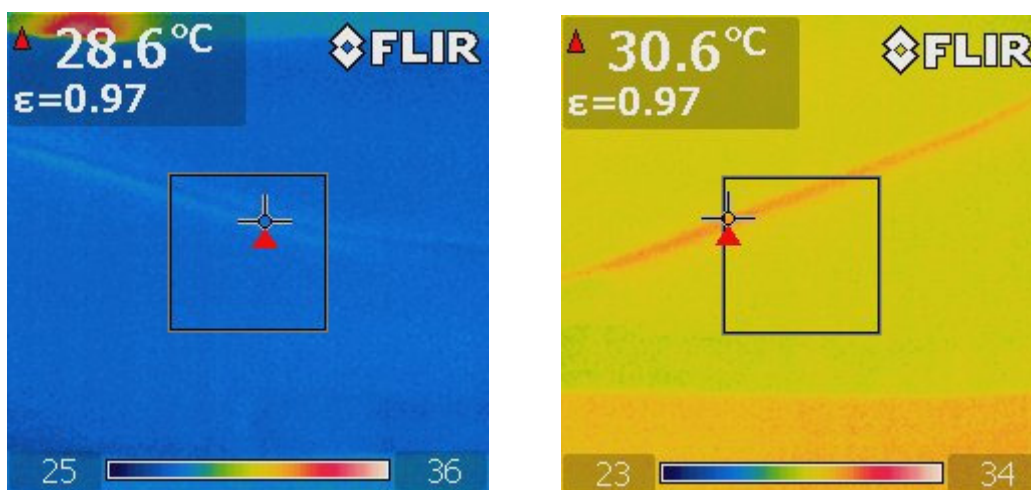


Imagen 8.2.1.1(a) (izquierda) y 8.2.1.1(b) (derecha). Se muestran dos de las múltiples termografías realizadas al conductor de calibre 14; antes (izquierda) y después (derecha) de los 3 amperios de conducción. Los resultados recopilados en la tabla 8.1.1.a. se tomaron del análisis del juego completo de termografías para éste conductor.

8.2.2. Cable 16 AWG, recubierto HWY

Se muestra una termografía representativa del conductor en condiciones similares a las condiciones del 14 AWG en la termografía 8.2.1.1.b. Con esto se puede ver de forma

gráfica que a pesar de que el 16 AWG tiene un diámetro menor al 14 AWG; el calor que generaba en la condición entre 3 y 4 amperios era menor que el calor generado por el 14 AWG. Si la relación fuera puramente lineal; esto no sucedería; pues el calor debiera ser mayor; pero se demuestra físicamente que no es una relación lineal, tal como ya se demostró con nuestro modelo de forma matemática. En ésta conducción estamos seguros que el tipo de aislante CBX que es mucho mas grueso que el HWY tiene mucho que ver pues la transferencia de calor es mucho mas restringida a través de éste; por lo tanto el almacenamiento es mas grande; igualmente la longitud del cable (en nuestro caso tratamos de utilizar muestras similares).

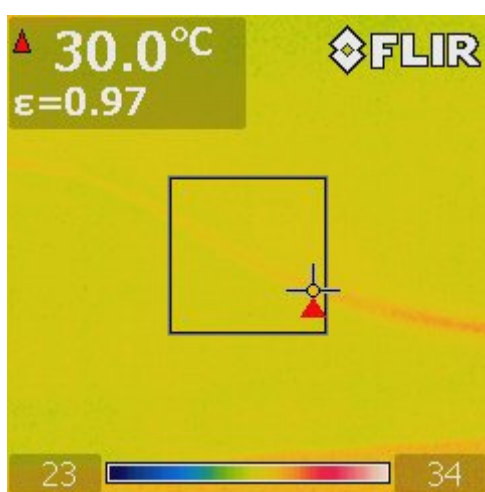


Imagen 8.2.2.1. Termografía del conductor 16 AWG portando 3.61 amperios de corriente.

8.2.3. Cable 18 AWG, recubierto CBX

Se realizaron múltiples pruebas termográficas constatando que realmente el recubrimiento del conductor tiene mucho que ver en su velocidad de calentamiento y temperatura final de operación por causa del almacenamiento de calor. Se podría pensar de forma muy simple que un aislante mas grueso será mejor; pero no siempre es así; cuando se trata de termoconducción; el conductor de cobre generará la misma cantidad de calor interno de acuerdo a su calibre; pero el aislante puede retener más o menos calor concentrado cerca del conductor. Luego de definir la fuente, que es lo que hacemos en esta tesis, el problema se vuelve un caso clásico de transferencia de calor por medio del modelo de difusión de calor.

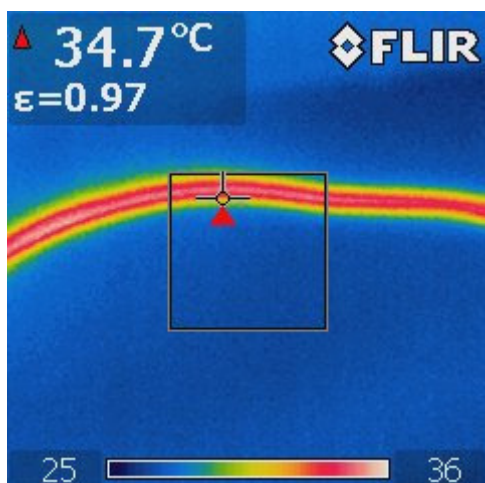


Imagen 8.2.3.1. Termografía del conductor 18 AWG portando 5.17 amperios de corriente.

8.2.4. Cable 20 AWG, recubierto HWY

Se termografió igualmente éste conductor para conducción de corriente que fueron desde cero hasta poco mas de 5 amperios. Siguió el mismo comportamiento de todos los anteriores; su calentamiento no describió una línea recta con respecto de la carga; y como era de esperarse se calentó más que los anteriores pero aún dentro de rangos muy seguros.

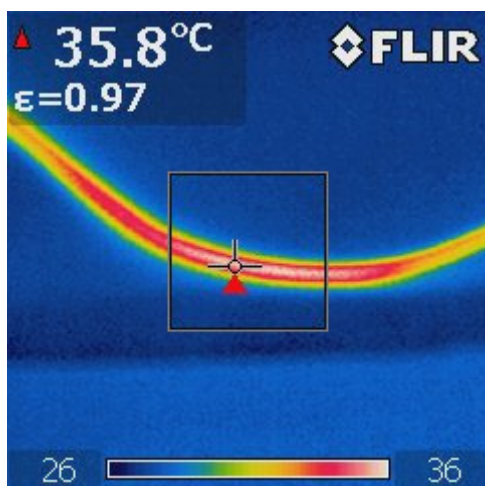


Imagen 8.2.4.1. Termografía del conductor 20 AWG portando 5.27 amperios de corriente.

8.2.5. Cable 24 AWG, recubierto HWY

Este conductor lo sometimos a todas las pruebas para los conductores anteriores (dentro de un rango de operación hasta de poco mas de 5 amperios); y bajo las condiciones que los anteriores tomaron mas de 5 amperios este solamente cargo 4.89 amperios; pues su resistividad subió demasiado y se demostró que no subió linealmente al igual que con los anteriores. Luego de eso se le otorgó corriente al conductor y se termografió hasta que se quemó. Cabe destacar que luego de salir de su rango de operación la resistividad cambió su comportamiento y la potencia disipada en el conductor se disparó. Esto puede verse de las tablas del punto 8.1 y podrá verse mas claro en las gráficas del siguiente punto.

Aquí presentamos las termografías más representativas del análisis termográfico del conductor 24 AWG.

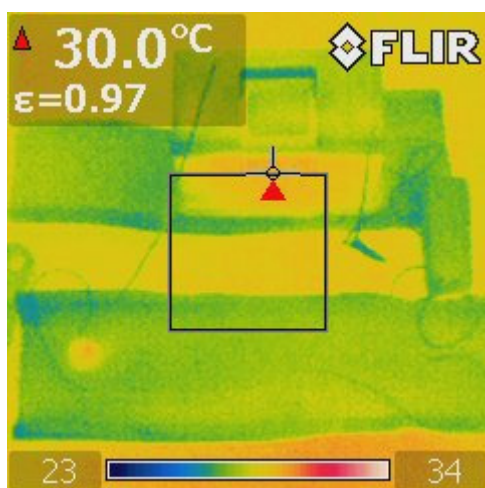


Imagen 8.2.5.1. Termografía del circuito completo con el conductor 24 AWG sin carga. Puede verse que el punto mas caliente es el químico de la fuente de energía que se encuentra aproximadamente a 30°.

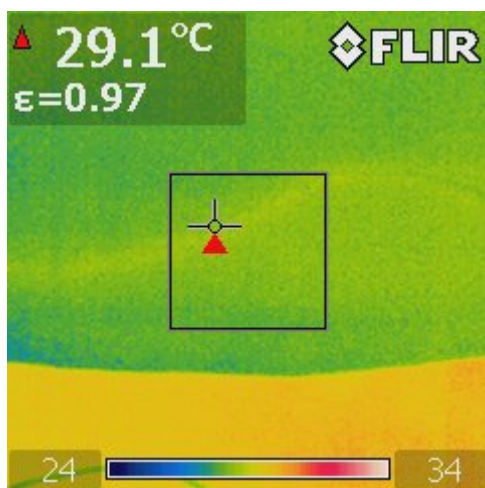


Imagen 8.2.5.2. Termografía del conductor 24 AWG portando poco más de 1 amperio.

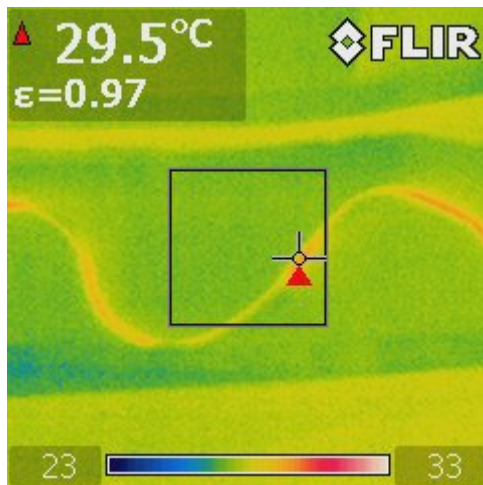


Imagen 8.2.5.3. Termografía del conductor 24 AWG portando cerca de 2 amperios.

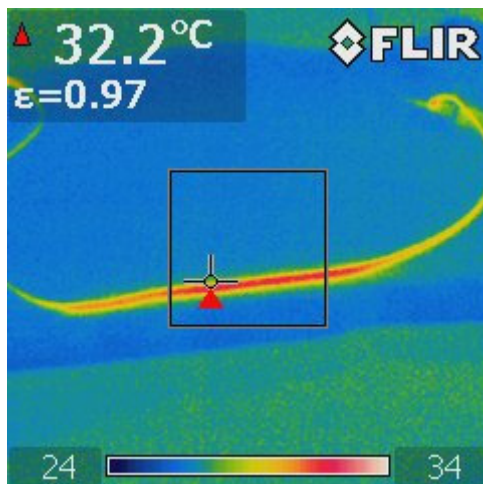


Imagen 8.2.5.4. Termografía del conductor 24 AWG portando más de 2.5 amperios.

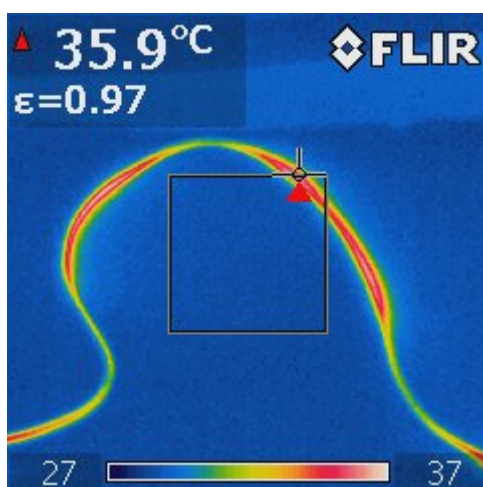


Imagen 8.2.5.5. Termografía del conductor 24 AWG portando 3.4 amperios.

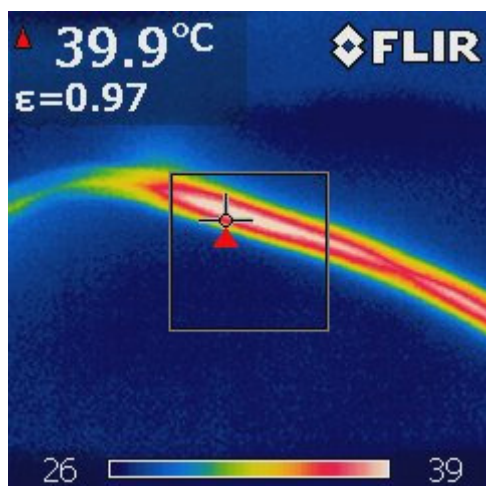


Imagen 8.2.5.6. Termografía del conductor 24 AWG portando 4.89 amperios.

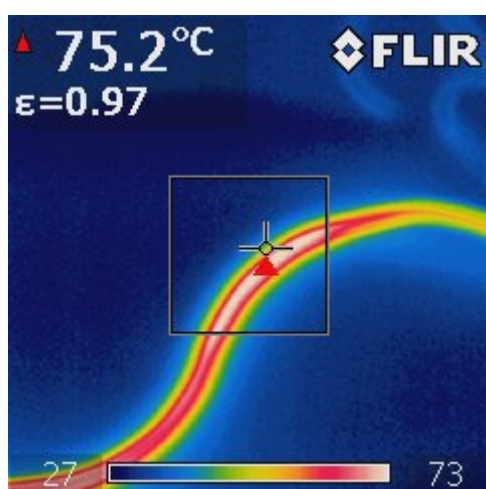


Imagen 8.2.5.7. Termografía del conductor 24 AWG portando cerca de 8.4 amperios.

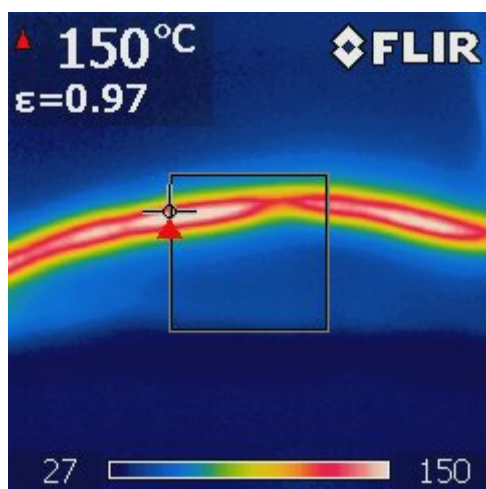


Imagen 8.2.5.8. Termografía del conductor 24 AWG portando unos 13 amperios (con los que se quemó).

8.3. Análisis Gráfico

En éste punto vimos y comparamos los comportamientos en el rango de operación de los conductores; y pudimos percibir por lo menos en los calibres utilizados una generalidad que se marcó en nuestro caso aproximadamente a los 3 amperios y es que el conductor cuando tiene poca carga se comporta de forma muy distinta a cuando tiene carga de operación. Atribuimos esto al efecto de polarización que causa el flujo de corriente directa sobre un conductor cualquiera; y no a mas nada. En las graficas 8.3.1. y 8.3.2. sacadas de las tablas de pruebas de los cables 18 AWG y 20 AWG respectivamente; se ven los ejemplos claramente diferenciados de los comportamientos de incremento térmico con poca carga (menos de 3 amperios en éste caso) y con bastante carga (mas de 3 amperios). La barrera de 3 amperios se dio en nuestro caso; pero lógicamente esta es solo aproximada y depende de las características de cada conductor; seguramente mas de 3 amperios aún son muy poca carga para un conductor calibre 500 MCM; por lo que es solo un ejemplo cualitativo.

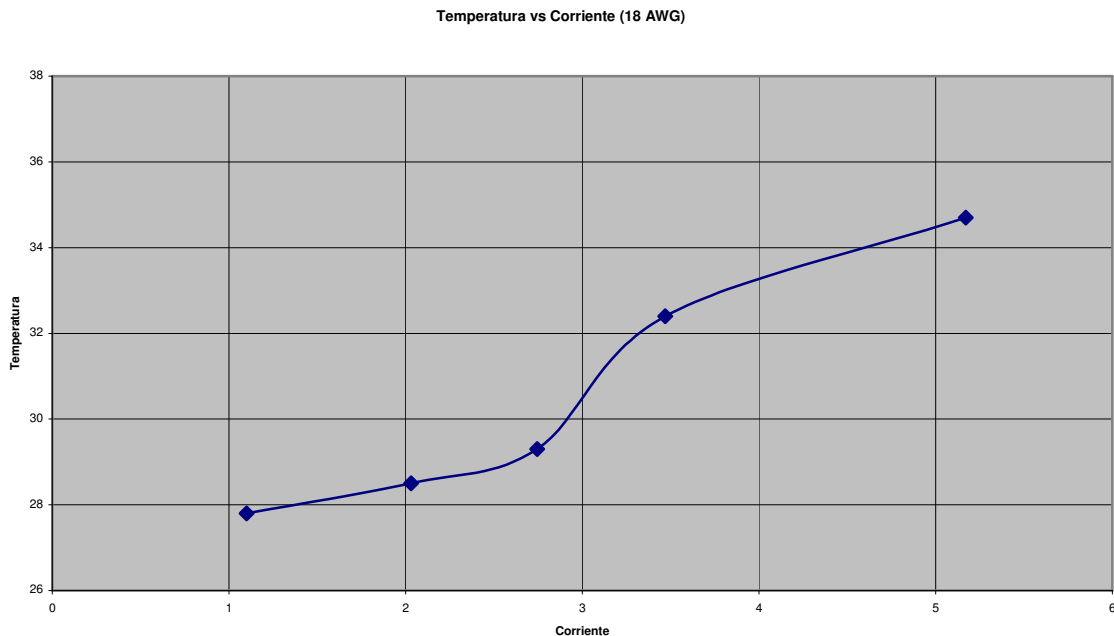


Imagen 8.3.1. Grafico de Temperatura vs Corriente en cable 18 AWG.

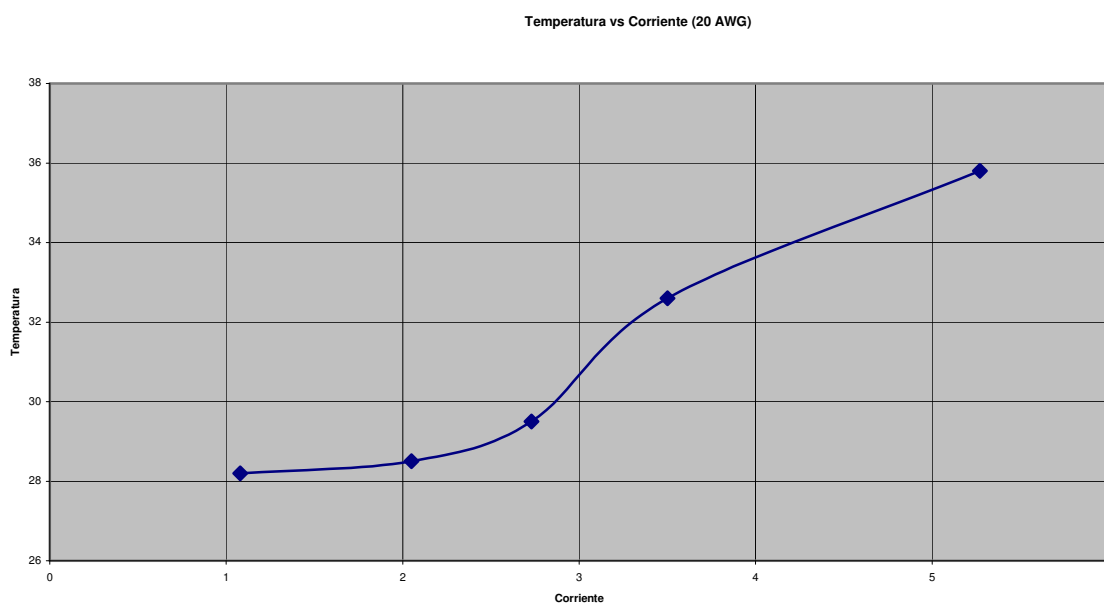


Imagen 8.3.2. Grafico de Temperatura vs Corriente en cable 20 AWG.

Como se ve los comportamientos en el rango de operación son similares; para el cable 24 AWG se extendió ese rango hasta que se quemó el cable; y el comportamiento en el rango de operación fue similar pero fuera de ese rango fue más parecido a un comportamiento de crecimiento exponenciado. Este hecho puede verificarse en la imagen 8.3.3.

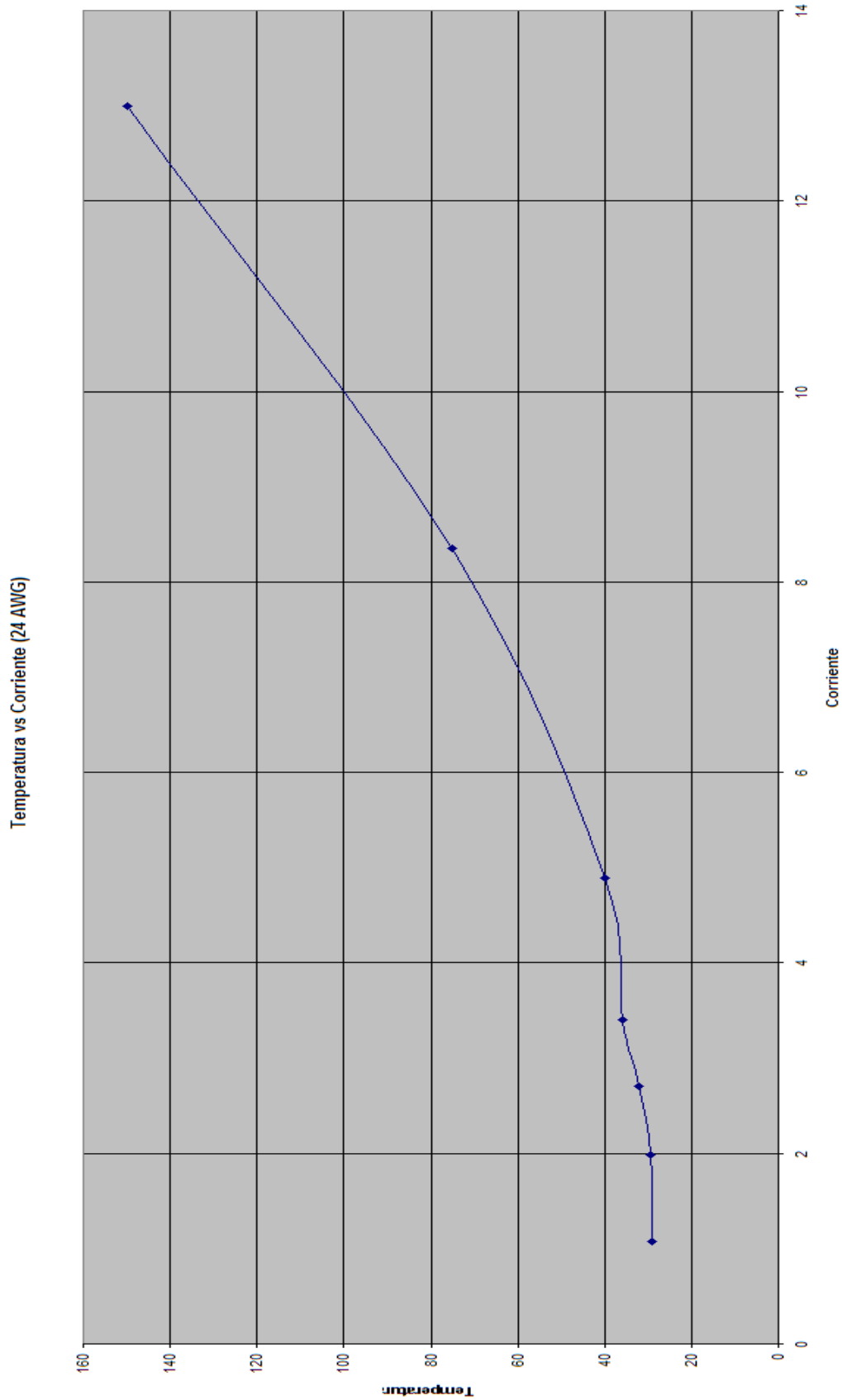


Imagen 8.3.3. Grafico de Temperatura vs Corriente en cable 24 AWG, con pruebas fuera del rango de operación

Definitivamente el comportamiento de la resistencia del conductor cuando fluye una corriente a través de él no es igual a su comportamiento cuasi-lineal cuando no fluye corriente (solo con incremento de la temperatura, calentándolo por otros medios). En nuestro trabajo hemos considerado todos los efectos juntos; y los comportamientos en el calibre 24 AWG fueron reveladores. Existió siempre un exabrupto al principio de la conducción de corriente; tanto en la gráfica de resistividad contra temperatura como en la de resistividad contra corriente; esto lo atribuimos a un efecto polarizante de la corriente directa sobre las partículas del conductor; las gráficas se muestran a continuación.

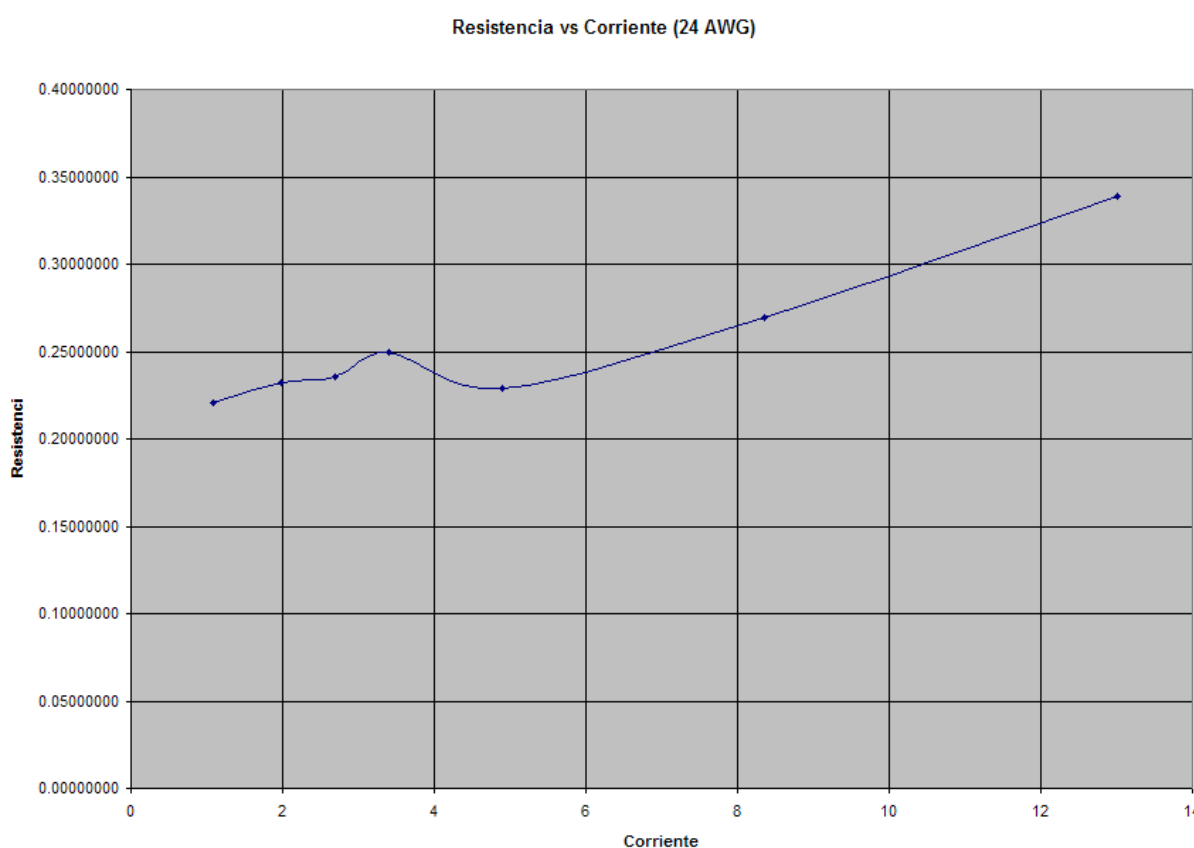


Imagen 8.3.4. Gráfico de Resistencia vs Corriente en cable 24 AWG, con pruebas fuera del rango de operación.

La gráfica de resistencia contra corriente mostró un comportamiento de aumento de la resistencia de forma parecida a una función linealizada y levemente exponenciada.

La gráfica de resistencia contra temperatura reveló que el aumento de la resistencia cuando se sale del rango de operación parece una línea pero con tendencia logarítmica, y definitivamente en la escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$) su intersección con la vertical no es cero por lo

cual si quisiéramos hacer un modelo muy aproximado de la misma sería una sumatoria de funciones; logarítmica, lineal y constante.

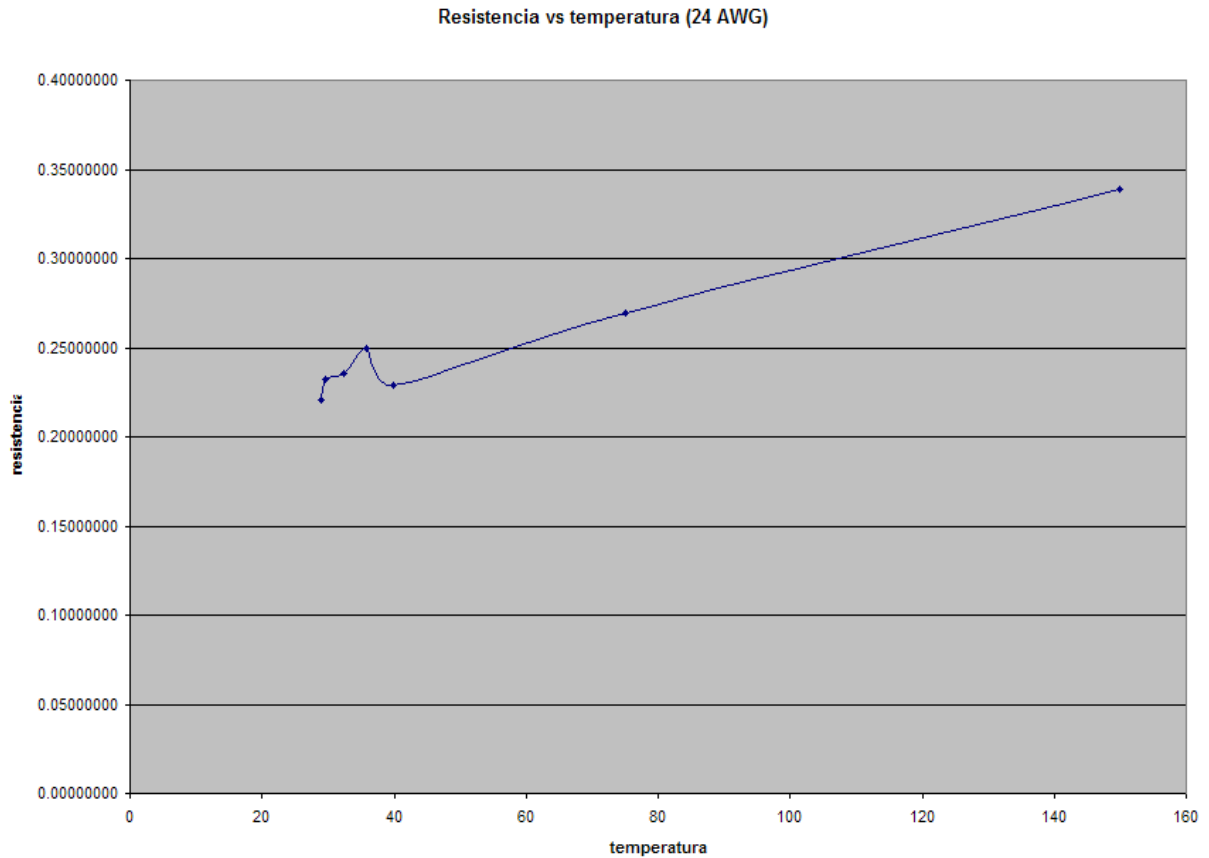


Imagen 8.3.5. Grafico de Resistencia vs Temperatura cuando fluye también Corriente en cable 24 AWG, con pruebas fuera del rango de operación.

La prueba llegó hasta 150°C pues a esta temperatura comenzó a derretirse el aislante del cable y comenzó a consumirse también el material aislante (resistente a la combustión) que estaba debajo del cable. Si el material cercano hubiese sido un material combustible; inmediatamente hubiésemos dado origen a un incendio; pero por seguridad eliminamos todo tipo de combustible del área de la experiencia; para romper el triángulo del fuego.



Imagen 8.3.6. Cable 24 AWG en el momento que derrite su aislante a 150°C con aproximadamente 13 amperios de corriente.



Imagen 8.3.7. Se muestra una zona del cable 24 AWG que perdió todo su aislante; en caso de encontrarse cerca de otro conductor; el incendio se hubiese vuelto termoconductorivo y por corto circuito.

8.4. Aproximación de los valores reales al modelo

En éste punto verificaremos que tan aproximado es el modelo a los valores obtenidos experimentalmente; o sea que tan bien se ajusta a la realidad. Verificaremos dos formas del modelo; el modelo lineal que se puede realizar considerando que la función de incremento térmico del cobre es una constante que ya ha sido medida en muchas investigaciones anteriores y aproximada a $0.004/^{\circ}\text{C}$; y el modelo integral por medio del cual en base a los resultados de resistencia obtenidos para el cobre en el alambre 24 AWG; desglosamos una función para

8.4.1. Exactitud del modelo lineal.

El modelo lineal es mas bien una expansión y aplicación la ecuación estándar que se maneja en electricidad para calcular la resistencia de los conductores, la cual considera a α como una constante aproximadamente de $0.004/^{\circ}\text{C}$. Es muy sencillo de utilizar; pero se demuestra con la experiencia que para altas temperaturas se aparta un poco de lo real.

Las ecuaciones clave para ambos modelos se desglosaron en el capítulo sexto de esta tesis; aquí las presentamos con su número de ubicación en el capítulo seis, en caso de que el lector quiera buscar el desglose de cada una.

$$R = \frac{1}{G} = \frac{L}{\sigma_c \cdot A_p} \quad (\text{e.6.2.6.19.})$$

y de forma general sin importar las características del conductor:

$$R_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + R_{(T_0,L)}f_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + \Delta R_{(T,L)} \quad (\text{e.6.2.9.8.})$$

donde

$$R_{(T_0,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p(L)} \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.6.})$$

$$\Delta R_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} f_{(T,L)} = \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot \alpha_{(T)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.7.})$$

$$R_{(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot \alpha_{(T)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.2.9.5.})$$

se demostró igualmente que la resistividad tiene la forma:

$$\rho_{c(T)} = \rho_{co(T_0)} + \rho_{co(T_0)} \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.6.2.8.12.})$$

y la potencia disipada en el conductor:

$$P_{c(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2_{(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (\text{e.6.3.2.6.})$$

Para un modelo lineal la ecuación de resistencia en el conductor dada por e.6.2.9.8. queda reducida a la forma:

$$R_{(T,L)} = R_{(T_0)} + R_{(T_0)} f_{(T,L)} = R_{(T_0)} + \Delta R_{(T)} = R_{(T_0)} + \alpha \cdot R_{(T_0)} \cdot (T - T_0) \quad (\text{e.8.4.1.1.})$$

$$\alpha = \frac{0.004}{^\circ C}$$

$$R_{(T_0)} = 0.22037037 \Omega$$

$$T_0 = 29^\circ C$$

y T es la temperatura medida en el conductor en cada una de las pruebas.

Esta ecuación sencilla de resistencia puede ser incluida en e.6.3.2.6., para obtener el modelo de potencia disipada en el conductor utilizando aumento de resistencia lineal. La ecuación resultante es la siguiente:

$$P_{c(T)} = R_{(T_0)} \cdot I^2 + \alpha \cdot R_{(T_0)} \cdot I^2 (T - T_0) \quad (\text{e.8.4.1.2.})$$

Los resultados de este modelo versus los obtenidos en la experiencia quedan reflejados en la tabla 8.4.1.1. y su comparación gráfica con respecto a los resultados experimentales en la imagen 8.4.1.1.

TABLA DE RESULTADOS UTILIZANDO MODELO CON ALFA CONSTANTE=0.004													
Conductor en prueba: Temperatura Ambiente:	24 AWG 25°C	aislante:		R(conductor)	V(conductor)	T(conductor)	l(conductor)	R(potenc)	R(resistor)	R(conductor)	P(conductor)	F(conductor)	C
		HWY	H										
V(fuente)	R(resistor)	R(potenc)	l(conductor)	T(conductor)	V(conductor)	R(conductor)	P(conductor)	F(conductor)	Rto	alfa-dT	Fcalc	% error	
12.35	8	4	1.08	29	0.238	0.22037037	0.257040	0.22037037	0.257040	0	0.066439228	0.25704	0.0000000%
12.30	4	2	1.98	29.5	0.46	0.23232323	0.910800	0.22037037	0.910800	0.002	0.0664392	0.865666788	-5.213561%
12.20	4	0	2.7	32.3	0.635	0.23518519	1.714500	0.22037037	1.714500	0.0132	0.0664392	1.6277058	-5.332303%
12.10	2	1	3.4	35.9	0.85	0.25000000	2.890000	0.22037037	2.890000	0.0276	0.0664392	2.61779197	-10.398383%
12.00	2	0	4.89	39.9	1.119	0.22883436	5.471910	0.22037037	5.471910	0.0436	0.0664392	5.499269333	0.497509%
11.80	1	0	8.35	75	2.25	0.26946108	18.787500	0.22037037	18.787500	0.184	0.0664392	18.19189141	-3.274033%
11.66	0.5	0	13	150	4.4	0.33846154	57.200000	0.22037037	57.200000	0.484	0.0664392	55.26800741	-3.495680%

Tabla 8.4.1.1. Resultados del modelo lineal

Comparación de potencias medida y calculada con el modelo lineal de alfa constante

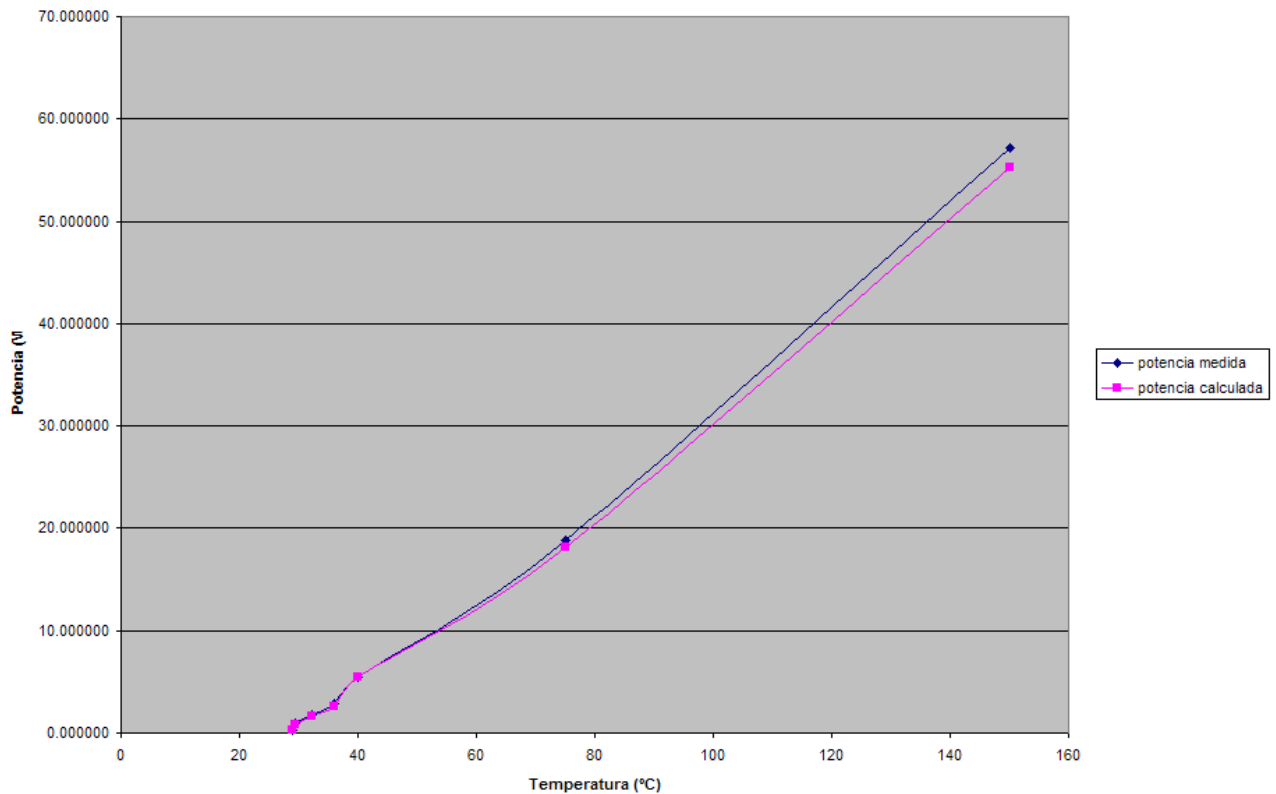


Imagen 8.4.1.1. Muestra la comparación entre las potencias medidas y calculadas según el modelo lineal con función de incremento térmico constante. Obsérvese como se bifurcan las tendencias cuando la temperatura se incrementa.

El modelo lineal puede parecer muy aproximado a primera vista; 3.5% de error porcentual en las altas temperaturas no parece un porcentaje demasiado elevado, pero la tendencia es marcada en separarse de los valores reales con el aumento de la temperatura; lo que demuestra una vez mas que claramente los incrementos térmicos no pueden ser considerados constantes cuando se trabaja en un amplio rango de temperaturas.

8.4.2. Exactitud del modelo integral.

El modelo integral utiliza todos los elementos variables considerados en e.6.2.9.5. por lo que se ajusta mucho más a lo real y a sus continuos cambios. Para efectos de control de la experiencia y facilidad del análisis; decidimos utilizar una fuente de corriente directa con lo que convertimos la corriente en una constante fácil de integrar; al igual que un conductor de calibre AWG, con lo que convertimos el área del mismo en otra

constante; pero definitivamente las propiedades intrínsecas de incremento térmico del material son variables con la temperatura por lo que nuestra ecuación e.6.2.8.12. nos es de gran ayuda en la solución de éste caso. Si bien es cierto todos los materiales independientemente de cual sea la forma de su comportamiento pueden ser representados por e.6.2.9.8.; y para nuestro caso; $R_{(T_0,L)}$ seguirá siendo una constante por los efectos ya mencionados; pero $\Delta R_{(T,L)}$ será una función variable conforme a la ecuación e.6.2.9.7., la cual puede desarrollarse al considerar las características del conductor y la corriente como:

$$\Delta R_{(T,L)} = \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot \alpha_{(T)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl = \frac{\rho_{co(T_0)} \cdot L}{A_{p(L)}} \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT = R_{(T_0)} \cdot \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.8.4.2.1.})$$

$$R_{(T_0)} = 0.22037037\Omega$$

$$T_0 = 29^\circ C$$

Solo nos hace falta ahora la función $\alpha_{(T)}$. Como se mencionó antes en éste mismo capítulo; por la forma que forma el gráfico de resistencia contra temperatura en el conductor (imagen 8.2.3.5.), sugiere una función modelo de tendencias lineal, logarítmica y constante sumadas y ponderadas; por lo que luego de extensos análisis matemáticos con ayuda de softwares de solución con ordenador de Texas Instruments y Microsoft; llegamos a la conclusión de que la mejor forma de modelar ésta parte era con una sumatoria de funciones (parecido a lo que se logra con series como las de Fourier, para modelar funciones); y en nuestro caso, sería sumar ponderadamente los tres tipos de funciones identificadas en el gráfico; realizando una ecuación del siguiente tipo:

$$\Delta R_{(T,L)} = a \cdot \ln(T) + b \cdot T + c \quad (\text{e.8.4.2.2.})$$

donde a , b y c son constantes determinadas dependiendo del comportamiento propio del conductor; por lo que para determinarlas, haremos un sistema de 3 ecuaciones simultaneas en 3 estados de carga; el estado inicial a $29^\circ C$; el estado de carga a $75^\circ C$ y el estado final a $150^\circ C$.

$$R_{(T_0)} - R_{(T_0)} = 0 = a \cdot \ln(29) + b \cdot 29 + c$$

$$R_{(75^\circ C)} - R_{(T_0)} = 0.0409071 = a \cdot \ln(75) + b \cdot 75 + c$$

$$R_{(150^\circ C)} - R_{(T_0)} = 0.11809117 = a \cdot \ln(150) + b \cdot 150 + c$$

Utilizando el poderoso software matemático de Texas Instruments basado en TI-89 se pueden resolver en un ordenador las ecuaciones simultáneas por iteración; con lo que se obtienen los resultados de las constantes.

$$a = 0.012894529982$$

$$b = 8.00835371975 \times 10^{-4}$$

$$c = -0.06643922826$$

con lo que podemos escribir el comportamiento de la variación de resistencia como:

$$\Delta R_{(T,L)} = 0.0128945 \cdot \ln(T) + 8.00835 \times 10^{-4} \cdot T - 0.0664392 \quad (\text{e.8.4.2.3.})$$

Debe tomarse en cuenta que todas las constantes son propias para cada conductor y caso pero sobre todo la constante c ; pues representa la intersección con el eje de la resistencia para cada modelo.

Ahora igualando las ecuaciones e.8.4.2.1. y e.8.4.2.3. encontramos que:

$$\frac{0.0128945 \cdot \ln(T) + 8.00835 \times 10^{-4} \cdot T - 0.0664392}{R_{T_0}} = \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \quad (\text{e.8.4.2.4.})$$

que es directamente la solución de la integral de la función de aumento de resistividad que necesitábamos. Utilizando esta ecuación se llena en la tabla de resultados de cálculo las casillas que dicen “integral alfa” para luego sacar el incremento de potencia siendo multiplicados con I^2 y R_{T_0} , como lo pide la ecuación e.6.3.2.6. al ser adaptada a éste caso en específico.

Si quisiéramos el valor puro de $\alpha_{(T)}$, tendríamos que derivar en e.8.4.2.4., obteniendo la ecuación:

$$\alpha_{(T)} = \frac{0.003634047284 \cdot (T + 16.101319248)}{T} \quad (\text{e.8.4.2.5.})$$

Recordando que $\alpha_{(T)}$ tiene valores de $1/^\circ\text{C}$, se puede ver que la primera constante igualmente tiene valores de $1/^\circ\text{C}$ y la segunda dentro del paréntesis tiene valores de $^\circ\text{C}$. Esta ecuación la hemos sacado solamente para respaldar el hecho de que la constante c de e.8.4.2.2. es la más variable porque depende de las condiciones de frontera o iniciales de cada modelo en cada caso. No necesitamos realizar la integral de $\alpha_{(T)}$ porque ya la tenemos de e.8.4.2.4.; pero si realizáramos esta operación a partir de, tendríamos por respuesta:

$$\int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT = \frac{0.0128945 \cdot \ln(T) + 8.00835 \times 10^{-4} \cdot T + c}{R_{T_0}} \quad (\text{e.8.4.2.6.})$$

donde la constante c tendría que determinarse con condiciones iniciales; en nuestro caso ya la tenemos definida en e.8.4.2.4.

La ecuación general de potencia al ser resuelta en este caso reemplazando las funciones encontradas y resolviendo las integrales de e.6.3.2.6. queda:

$$P_{c(T)} = R_{(T_0)} \cdot I^2 + I^2 \cdot [0.0128945 \cdot \ln(T) + 8.00835 \times 10^{-4} \cdot T - 0.0664392] \quad (\text{e.8.4.2.7.})$$

donde la resistencia se da en Ohmios, la temperatura en $^\circ\text{C}$, y la corriente en Amperios para obtener los Watts disipados. Los resultados se muestran en la tabla 8.4.2.1. y la comparación gráfica se ve en la imagen 8.4.2.1. De aquí puede verse que el porcentaje de error al comparar el modelo con lo real disminuye de forma general y el modelo sigue de forma muy precisa lo que pasa en la experiencia real. A altas temperaturas, el error que antes era de casi 3.5% ha disminuido a 0.06%; lo que nos indica que tenemos ahora un modelo que es por lo menos 50 veces mas preciso para predecir generación de energía en

conductores que se calientan fuera de su rango de operación. Por otra parte, como se ve de la imagen 8.4.2.1.; los resultados del modelo no se bifurcan en ninguna parte de los resultados experimentales; y son mas precisos incluso a temperaturas de operación; aunque con el nivel de precisión del modelo lineal en temperaturas de operación es más que suficiente; y no se necesitan desarrollar modelos integrales.

La aplicación de éste modelo depende de la facilidad que tenga el usuario para manejar matemáticas integrodiferenciales, o del desarrollo de un software amigable que por métodos iterativos obtenga respuestas en estados puntuales. Si bien es cierto el nivel matemático es mucho mas elevado en el modelo integral que en el modelo lineal; la exactitud de la predicción también lo es; 50 veces mas seguro, es un valor suficientemente amplio cuando se trata de prevenir un incendio.

TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO INTEGRAL														
Conductor en prueba:		24 AWG		aislante:		HWY								
Temperatura Ambiente:		25°C												
V(fuente)	R(resistor)	R(potenc)	l(conductor)	T(conductor)	V(conductor)	R(conductor)	P(conductor)	F(conductor)	P(conductor)	Rto	integ-alfa	C	P _{calc}	% error
12.35	8	4	1.08	29	0.238	0.22037037	0.257040	0.22037037	0.000928361	0.22037037	0.000928361	0.066439228	0.257278626	0.092750%
12.30	4	2	1.98	29.5	0.46	0.23232323	0.910800	0.22037037	0.003745758	0.22037037	0.003745758	0.0664392	0.86717611	-5.030569%
12.20	4	0	2.7	32.3	0.635	0.23518519	1.714500	0.22037037	0.019228868	0.22037037	0.019228868	0.0664392	1.637387963	-4.709454%
12.10	2	1	3.4	35.9	0.85	0.25000000	2.890000	0.22037037	0.038492506	0.22037037	0.038492506	0.0664392	2.645540428	-9.240440%
12.00	2	0	4.89	39.9	1.119	0.22883436	5.471910	0.22037037	0.059209947	0.22037037	0.059209947	0.0664392	5.581526234	1.963911%
11.80	1	0	8.35	75	2.25	0.26946108	18.787500	0.22037037	0.223693223	0.22037037	0.223693223	0.0664392	18.80176877	0.075891%
11.66	0.5	0	13	150	4.4	0.33846154	57.200000	0.22037037	0.536804859	0.22037037	0.536804859	0.0664392	57.23459726	0.060448%

Tabla 8.4.2.1. Resultados del modelo integral

Comparacion de potencias medida y calculada según el nuevo modelo integral

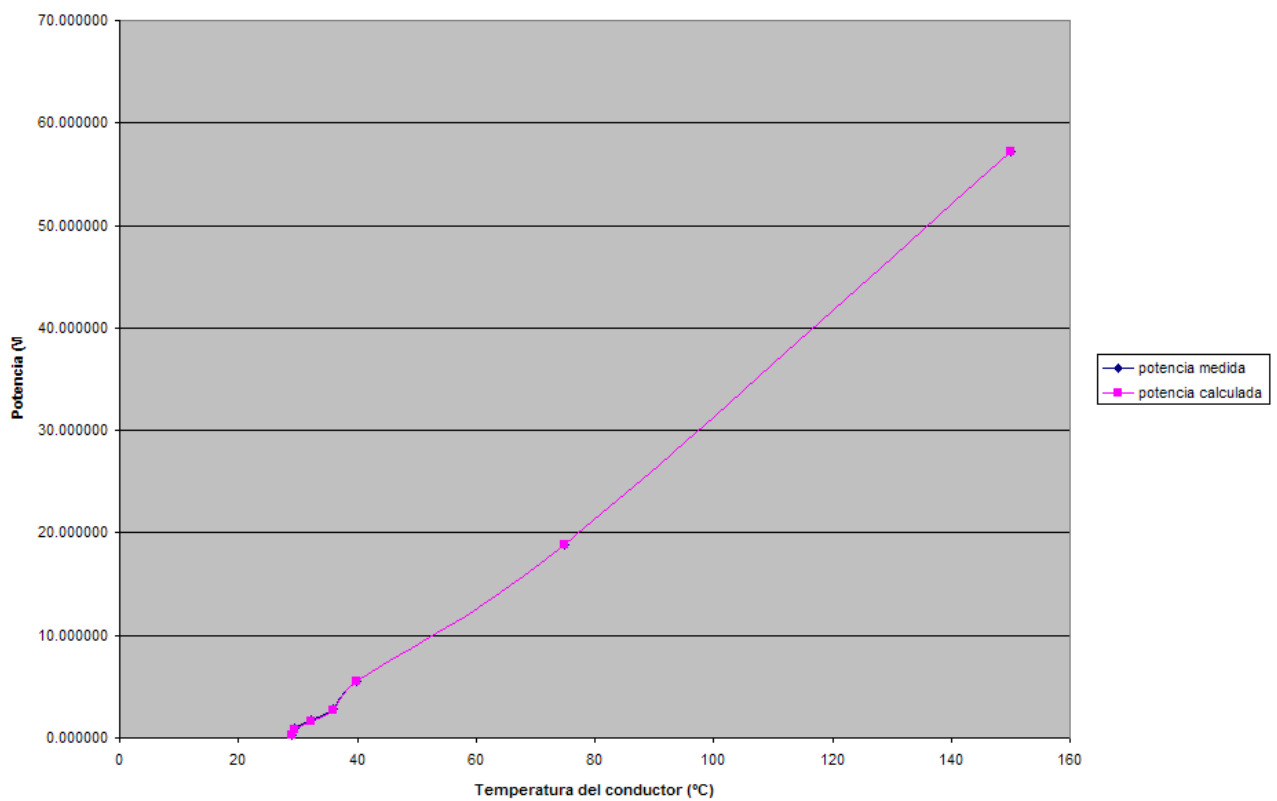


Imagen 8.4.2.1. Muestra la comparación entre las potencias medidas y calculadas según el modelo integral. Obsérvese que la potencia calculada está en todo momento casi perfectamente sobre la línea descrita por las mediciones experimentales.

CAPÍTULO IX

Conclusiones, Aportaciones y Recomendaciones

EN ESTE CAPÍTULO:

- 9.1 Conclusiones
- 9.2 Aportaciones
- 9.3 Recomendaciones

CAPITULO IX

Conclusiones, Aportaciones y Recomendaciones

9.1. Conclusiones

Si bien es cierto a lo largo de todo este trabajo hemos estado revisando resultados que nos llevan a conclusiones parciales; en éste capítulo presento las conclusiones mas relevantes que nos quedan al terminar la investigación.

- La conclusión más importante, es que se demostró lo enunciado en nuestra hipótesis; si fluye una cantidad suficiente de corriente en un conductor; el mismo puede llegar a la combustión o llevar algún material cercano a la combustión por calentamiento y termoconducción, sin la necesidad de que exista un arco eléctrico en el proceso. Esto quedo demostrado tanto teórica como experimentalmente por medio de nuestro modelo y las experiencias realizadas, por lo que ahora podemos corroborar que la electricidad no produce incendios solo por medio de arcos; sino por medio de este tipo de fenómeno que hemos llamado ***fuentes generadoras de incendios eléctricos por termoconducción.***
- Por seguridad del proyecto, nos resulta muy necesario cambiar la forma de ver las cosas, en el momento de realizar el diseño de un proyecto eléctrico; si bien es cierto, los incendios eléctricos se producen por causa de conductores recalentados o cortocircuitados (o sus terminales); los mismos podrían preverse de forma aproximada por medio de la aplicación de modelos matemáticos como el desglosado en esta tesis; en el momento del diseño. Los diseñadores deberían entonces tener en cuenta aplicaciones de modelado, en el momento del diseño, pues la seguridad debe comenzar en esa etapa del proyecto.
- La seguridad contra incendio en los proyectos tiene más de 100 años de desarrollo e investigación por parte de organizaciones internacionales, sin embargo el motivo general de la investigación “el incendio”; aún hoy es un ente incomprendido, difícil de modelar y predecir. Harán falta muchos años más de investigación para que nos acerquemos realmente

a un modelo global sumamente aproximado de un incendio. En ésta investigación tenemos un comienzo, por parte de las fuentes eléctricas que generan incendios por termoconducción; un pequeño grano de arena para la inmensa variedad de incendios posibles.

- El análisis termográfico de las instalaciones eléctricas debería incluirse dentro de los programas de mantenimiento de las mismas. Lo cierto es que los equipos de termografía son sumamente costosos; pero por medio de un análisis de mediciones por imágenes termográficas se pueden detectar puntos calientes en las instalaciones, que son a nuestro criterio las principales fuentes generadoras de incendios eléctricos en lugar de los arcos. También por medio de éstos análisis se pueden recopilar los datos de cada uno de los conductores en operación para realizar modelados específicos basados en el modelo que hemos presentado. Esto ayudaría mucho a la predicción de incendios en los proyectos por causas eléctricas termoconductoras.
- Es necesario establecer una metodología de recopilación de datos en las instalaciones de proyectos eléctricos, que permitan luego de instalado el proyecto, realizar predicciones preliminares de comportamiento de los conductores por medio del modelado. Esto ayudaría grandemente a disminuir los incendios eléctricos inesperados que son comunes en el inicio del funcionamiento de proyectos muy grandes, donde la calidad de la instalación es difícil de controlar en todos sus puntos. Por medio del modelado se puede determinar cuales son las áreas de mayor disipación de potencia eléctrica en los conductores; y enfocarse en ellas como áreas de mayor riesgo.
- Podemos establecer también como conclusión que muchos incendios de “arco eléctrico” llegan a esa fase luego de que los conductores derriten su aislante por causa de la termoconducción de la potencia eléctrica disipada en forma de calor. En la actualidad existe una incidencia bastante amplia de incendios eléctricos en electrobarras; en base al modelo que hemos visto, aplicándolo junto con el modelo de difusividad térmica y la ecuación general de conducción de calor con generación interna discutida en la parte final del quinto capítulo; podemos ver que las electrobarras en especial tienen una característica

física de barras planas paralelas una al lado de la otra muy pegadas y con aislante dieléctrico entre ellas (lo que acumula más calor) que obstruye grandemente la disipación del calor interno generado por los conductores. A la luz de éste modelo, se podría generar un juego de datos experimentales termografiando los comportamientos de las electrobarras; y aplicarlos al modelo que hemos encontrado, para corregir lo que consideramos un error de diseño de las mismas.

- Nuestra conclusión final es que definitivamente se pueden llevar a cabo modelos muy exactos de los fenómenos físicos naturales que tratamos de poner a nuestro servicio en la ingeniería; sólo se requiere de la intención y un nivel de esfuerzo adecuado. Con buena comunicación entre los investigadores; la información es transmitida a futuras generaciones y con el paso del tiempo estos modelos son mejorados, haciendo más seguro y confortable el medio ambiente del hombre; aumentando así su calidad de vida.



Imagen 9.1.1. Vista de un elemento conductor eléctrico tipo electrobarra que ha pasado por un fallo por sobrecalentamiento que debilitó el aislante propiciando la formación de arcos entre las 3 fases vivas y carcasa.

9.2. Aportaciones

Definitivamente nuestra aportación mas importante es el desarrollo de un modelo matemático con el que se obtienen resultados de disipación de potencia en conductores fuera de su rango de operación normal con errores de menos de 0.1% con respecto de lo real. Pero a lo largo de la investigación se pueden ver muchas aportaciones a los diversos medios; las más importantes las mencionamos a continuación.

- Se aporta un modelo matemático muy preciso para calcular la disipación de potencia de una fuente generadora de incendios por termoconducción, con energía de origen eléctrico; el cual puede ser amoldado a diferentes materiales, formas, secciones, longitudes, tipos de corriente, e incluso variaciones en cada una de éstas variables con respecto de la longitud o de la temperatura a la que se encuentre el conductor en cada momento.
- Se aporta un esquema de recopilación de datos (capítulo 8) que puede ser seguido exactamente para generar las bases de datos y los modelos específicos de cada uno de los conductores comerciales existentes en la actualidad. Igualmente se puede utilizar para la experimentación con conductores (e incluso materiales no conductores), no comerciales.
- Una ecuación modelo que puede ser utilizada directamente encontrando solo unas constantes de condiciones iniciales como una muy buena primera aproximación en calentamiento extremo de conductores trenzados de diámetros pequeños.
- Una recopilación de datos experimentales que pueden ser utilizados para mejorar el modelo actual o desarrollar un software de cálculo aproximado en base a el mismo.
- Demostraciones matemáticas múltiples y de sentido común de muchas ecuaciones que han sido extendidas en su campo de aplicación, al campo del desarrollo de modelos de incendios.
- Modelos matemáticos precisos para determinar pérdida de voltajes en conductores cualesquiera, dependiendo de las condiciones específicas de operación y medio ambiente de cada uno. No es una aplicación al campo de la ingeniería de seguridad contra incendios; pero es una

aportación que tuvimos que desarrollar para sacar la potencia perdida de forma precisa en altas temperaturas y sirve muy bien como una aportación que podría ser muy valiosa si es utilizada en el área de ecoeficiencia de instalaciones eléctricas, para mejorar nuestro medio ambiente.

9.3. Recomendaciones

Los resultados de nuestra investigación han dejado claro que el calentamiento de conductores eléctricos es una fuente generadora de incendios mucho más riesgosa de lo que se piensa en la actualidad. En base a eso, recomendamos lo siguiente:

- Continuar con líneas de investigación a futuro en materiales específicos; como por ejemplo abrir una línea de investigación para electrobarras, recopilar los datos y hacer los ajustes del modelo para obtener resultados puntuales que puedan ser utilizados en el diseño.
- Realizar pruebas termográficas periódicas y permanentes de los sistemas eléctricos de los proyectos. Estas pruebas y el análisis de sus datos podrían predecir un incendio eléctrico en el proyecto.
- Contemplar dentro del diseño eléctrico, el modelado matemático del calentamiento de los conductores. Es mucho menos costoso y en muchas ocasiones mucho menos doloroso, prevenir un incendio, que lamentarlo.

Bibliografía y Referencias

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Alonso, Marcelo; Finn, Edward (1998). Física Vol II, Campos y Ondas. Editorial Interamericano, México, 1032 pp.

Anderson, J.D. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications, New York, 550 pp.

Ang, A.H.S.; Tang, W.H. (1984). Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume II – Decisions, Risk and Reliability, John Wiley & Sons Inc., New York, 409 pp.

Babrauskas, V.; “Ignition: A Century of Research and an Assessment of Our Current Status”, Journal of Fire Protection Engineering, Vol 17, N° 3, 2007, pp 165-183.

Carozzi, T.; Eriksson, A; Lundborg, B. (2006). Electromagnetic Field Theory. Bo Thidé, Sweden, 187 pp.

Cote, A. Percy, B.(1993); Principios de Protección Contra Incendios, NFPA y CEPREVEN, España, 356 pp.

Drysdale Douglas (1985). Fire Dynamics (An Introduction to). John Wiley and Sons, St. Edmundsbury, 424 pp.

Earley Mark W., Sheehan Joseph V., Caloggero John M.; National Electrical Code Handbook, 8ª edición ingles, Quincy Massachussets, National Fire Protection Association, 1999, 1063 p. ISBN: 0-87765-437-9

Edminister, Jodeph (1992). Electromagnetismo. McGraw –Hill, Mexico, 202 pp.

Erlandsson R., Strand G. “An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage”, Fire Safety Journal, Vol. 8, 1984, p.97-103.

Fernandez, G; Fernandez, J. (1995). Electricidad, teoría de circuitos y magnetismo. Edicions UPC y ETSEIB, Barcelona, España, 234 pp.

Frank-Kamenetskii. Thermal Ignition Tutorial: Frank-Kamenetskii Theory - Frank-Kamenetskii`s Model, URL: www.leeds.ac.uk/fuel/tutorial/frank/model.html
[consulta: 5 julio 2009]

Friedman, R.; “Fire Protection Engineering - Science or Art?”; Journal of Fire Protection Engineering, Vol 2, N° 1, 1990, pp 25-32

FUNIBER, Master en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos, Módulo II, 2006, Panamá.

General Electric. Industrial, Products Manual GEH-6273E; [en línea] URL: <http://www.geindustrial.com/products/manuals/GEH-6273E.pdf>
[consulta: 15 de marzo de 2010].

Halliday, David; Resnick, Robert . (1972). Física II. CECSA, México, 1757 pp.

Hagimoto Y., “Protection Failure of Short-circuit by Arcing along the Insulating Material between Two Conductors of Wiring or Wiring Devices”, Journal of Tokyo Electric Management Engineering Association, NRIPS, Japan, January 1992. [en línea], <http://www.tcforensic.com.au/docs/japan/15.html>
[Consulta: 15 de abril de 2010]

Hyat, W.; Kemmerly J. (1988). Análisis de Circuitos en Ingeniería. McGraw - Hill, México, 706 pp.

Hyat, William (1967). Engineering Electromagnetics, McGraw – Hill & Kogakusha LTD, Tokyo, Japan, 435 pp.

Hyat, William (1991). Teoría Electromagnética, McGraw – Hill, Mexico, 525 pp.

Ishibashi Y., Kishida J. “Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires” Anual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg., Japón, 1990, p.83-90.

Kanury, A. M.; “Ignition of Liquid Fuels”, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd edition, Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, pp 2-188 2-199.

Knowlton, Archer E. (1957). Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw – Hill & Kogakusha Company LTD, Tokyo Japan, New York, Toronto, London; 2230 pp.

Kraus, J; Carver, K. (1973). Electromagnetics, McGraw – Hill & Kogakusha LTD, Tokyo, Japan, 828 pp.

Lee E., Ohtani H., Matsubara Y. et al. “Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue”, Fire Safety Journal, Vol. 37, 2002, p.353-368.

MacCleary R., Thaman R. “Method for Use in Fire Investigation,” US Patent 4,182,959; Estados Unidos, 1980.

McPartland J, McPartland B. Handbook of Practical Electrical Design, 2da edición, U.S.A., McGraw-Hill, 1995, 732 p. ISBN 0-07-045820-0

Milatovich, R. M.; “Electrical Systems and Appliances”, Fire Protection Handbook, 20th Edition, Quincy Massachusetts, National Fire Protection Association, 2008, p.8-127 8-173, ISBN-10:0-87765-758-0 ISBN-13: 978-0-87765-758-3

Matsh, Leander W. (1974). Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México, 524 pp.

McCaffrey, B (1981). Some Measurements of the Radiative Power Output of Difusión Flames, Western States Section Meeting of the Combustion Institute, U.S.A., Paper WSS/CI 81-15.

Ministerio de Ciencia y Tecnología, Guía BT Anexo 2: Guía Técnica de Aplicación –Anexo – Cálculo de las Caídas de Tensión, Revisión 1, España, sep. 2003, 14 p.

Miyoshi S. “Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads”, 4th Asia-Oceania Symp. On Fire Science & Technology, Asia-Oceania Assn. for Fire Science & Technology /Japan Assn. for Fire Science & Engineering, Tokyo, 2000, p.653-656.

Montgomery, Douglas (1991). Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, New York, 649 pp.

NFPA Associate Editors:

LIBROS (NFPA):

Fire Protection Handbook 20 edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.

Manual de Protección Contra Incendios, 17^{va} edición, National Fire Protection Association, MAPFRE, España, 1991.

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002.

CODIGOS (NFPA):

NFPA 12: Normas para Sistemas de extinción con Dióxido de Carbono, National Fire Protection Association, Quincy, MA., 2008.

NFPA 13: Normas para Instalacion de Sistemas de Rociadores Automáticos Contra Incendios, National Fire Protection Association, Quincy, MA., 2007.

NFPA 14: Normas para Sistemas de Mangueras y Stand Pipes, National Fire Protection Association, Quincy, MA., 2007.

NFPA 15: Normas para sistemas de protección contra incendio tipo “Water Spray” (Para equipos especiales), National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007.

NFPA 16: Norma para la instalación de sistemas de rocío con agua de espuma. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007

NFPA 30: Líquidos Inflamables y Combustibles., National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

NFPA 54: Código Nacional de Gases Combustibles., National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2009.

NFPA 58: Código de Gases Licuados de Petróleo., National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

NFPA 68: Estándares de Protección de Explosiones por medio de Compuertas de Deflagración., National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007.

NFPA 70: National Electrical Code. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

NFPA 70B: Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 70E: Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2009.

NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007

NFPA 73: Electrical Inspection Code for Existing Dwellings. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 77: Recommended Practice on Static Electricity. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007.

NFPA 79: Electrical Standard for Industrial Machinery. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2007.

NFPA 92A: Recommended Practice for Smoke-Control Systems. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2000.

NFPA 92B: .Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2000.

NFPA 96: Ventilation Control and Fire Protection of Commercial Cooking Operations, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2001.

NFPA 101: Código de Seguridad Humana. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2009.

NFPA 110: Standard for Emergency and Standby Power Systems. , National Fire Protection Association, Quincy, MA 2005.

NFPA 111: Standard on Stored Electrical Energy Emergency and Standby Power Systems, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2005.

NFPA 220: Standard on Types of Building Construction. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 221: Standard for Fire Walls and Fire Barrier Walls, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 231: Standard for General Storage, National Fire Protection Association, Quincy, MA. 1998.

NFPA 251: Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2006.

NFPA 255: Standard Method of Test of Surface Burning Characteristics of Building Materials , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2000.

NFPA 259: Standard Test Method for Potential Heat of Building Materials , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 1998.

NFPA-921: Guide for Fire and Explosion Investigations , National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.

NFPA 2001: Normas para Sistemas de Extinción de Incendios por medio de Agentes Limpios. , National Fire Protection Association, Quincy, MA. 2008.

Quintiere, James (2006). Fundamentals of Fire Phenomena, John Wiley & Sons LTD, Chichester, England, 439 pp.

Reitz, J.; Mildford, F. (1967). Foundations of Electromagnetic Theory, Addison Wesley, U.S.A., 435 pp.

Reitz, J.; Mildford, F. (1969). Fundamentos de la Teoría Electromagnética, Addison Wesley, U.S.A., 465 pp.

Rohsenow, W.; Hartnett, J.; Cho, J. (1998). Handbook of Heat Transfer, McGraw – Hill, U.S.A., 1344 pp.

Rudin, Walter (1964). Principles of Matematical Análisis, McGraw – Hill, New York, 270 pp.

Ryan, R.W. Chubb, M.; “Riesgos en las Instalaciones de los Edificios”, Manual de Protección Contra Incendios, 17va edición, España, MAFPRE, National Fire Protection Association, 1991, p.6-179 6-190 / 1273 – 1284, ISBN 84-7100-645-6

Sadiku, Matthew (2003). Elementos de Electromagnetismo, Oxford University Press, México, 767 pp.

Sanjuero, Rafael (1988). Electromagnetismo, McGraw – Hill, España, 309 pp.

Satot K, Fukusima H, Sigeru S et al. “Verification SIMS Applied to the Fire Investigation for Short Circuit”, Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg, Japón, 1998, p. 336.

Selfridge, R.; Arnold, D.; Warnick, K. (2001). Electromagnetics, Brigham Young University, Provo, 47 pp.

Semenov. Thermal Ignition Tutorial: Semenov’s Theory - Semenov’s Model, URL: www.leeds.ac.uk/fuel/tutorial/semenov/model.html
[consulta: 10 julio 2009]

Spiegel, Murray (1969). Análisis Vectorial, McGraw – Hill, México, 222 pp.

Stein, Benjamín; Reynolds, John (1992). Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, John Wiley & Sons, U.S.A., 1627 pp.

Tokio Fire Department, “Research on First and Second Fused Mark Discrimination on Electric Wires”, Journal Japan Assn. for Fire Science and Engrg, Vol. 42 N°2, 1992, p. 15-20.

Toledano, J., de las Casas, J., & Bedoya, C. “Rehabilitación de las instalaciones eléctricas en los edificios destinados principalmente a viviendas.” Informes de la Construcción, Vol 61, N°516, 2009, p.67-82

UNE 20.460-5-523:2004. “Instalaciones Eléctricas en Edificios. Parte 5: Selección e instalación de los materiales eléctricos. Sección 523: Intensidades admisibles en sistemas de conducción de cables”. Normas UNE del REBT., AMV Ediciones – C/Almansa, 94-28040, 2004, Madrid.

Wakamatsu, T. (1989). Fire Safety Science Proceedings, Development of Design System for Building Fire Safety, Tokyo, 1989.

Welty, James (1978). Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería, Limusa, México, 545 pp.

Welty, James (2001). Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa, Limusa – Wiley, México, 929 pp.

Yearance, Robert (1997). Electrical Fire Analysis, John Wiley, U.S.A., 263 pp.

Anexos

ANEXO 1

Cálculo de la Fiabilidad de algunos elementos del Sistema de Supresión Automática Contra Incendios (datos del Anexo 2)

FIABILIDAD DEL AGUA DE RESERVA

Por medio del modelo de la distribución de densidad exponencial continua en el tiempo, cuya función de densidad probabilística es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (\text{ec a1}) \quad \text{para valores de } x \text{ superiores a cero.}$$

Intentamos determinar el parámetro λ con el cual se pueda calcular la fiabilidad de los tanques de agua de reserva en 1 año, partiendo del hecho de que los tanques de agua de reserva de la Torre Parque Central Este de Caracas, tuvo esta falla 25 años después de su comienzo de operaciones, evento de referencia mas cercana para Latinoamérica.

Entonces nuestra aproximación burda a λ es:

$$\lambda = \frac{\text{numero_de_fallos}}{\text{unidad_de_tiempo}} = \frac{1_fallo}{25_años} = \frac{1_fallos}{25_año}$$

Teniendo la cantidad anual aproximada promedio de fallos y la ecuación de distribución de la densidad de fallos, podemos sacar el área bajo la curva de la ecuación de distribución de fallos trazada en el tiempo para el tiempo de fallos $x=1$ año, lo que nos dará la probabilidad anual de fallos del sistema, considerando el tiempo de inicio como tiempo cero del sistema.

Para esto integramos la función de distribución de fallos desde el tiempo cero hasta el tiempo de fallo x .

$$\int_0^x \lambda e^{-\lambda t} dt = -e^{-\lambda t} \Big|_0^x = 1 - e^{-\lambda x} \quad (\text{ec. a2})$$

La función general de cálculo de probabilidad de fallos en el tiempo es:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (\text{ec. a3})$$

La función general de cálculo de fiabilidad será, la posibilidad de que no se cumpla $F(x)$ por tanto es el 100% menos el valor $F(x)$. La Fiabilidad la denominamos $R(x)$.

$$R(x) = 1 - F(x) = 1 - 1 + e^{-\lambda x} = e^{-\lambda x} \quad (\text{ec. a4})$$

La falibilidad de la reserva de agua (identificada en la sección de anexos como F4.1), queda calculada según esto:

$$F4.1 = 1 - e^{-\frac{1}{25\text{años}}(1\text{año})} = 0.0392$$

Lo que es la probabilidad de falla del tanque de reserva de agua en 1 año.

FALIBILIDAD DE COMPONENTES DE VÁLVULAS

Los componentes de válvulas tales como válvulas de incendio, supervisión, válvulas de regulación y otras válvulas sencillas pueden ser modeladas de forma práctica de acuerdo a la distribución exponencial, tomando como hecho base que el sistema de las mismas siempre es el mas sencillo posible de forma que su fiabilidad sea máxima.

De acuerdo al Centro Nacional de Condiciones de Trabajo del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales español, las válvulas mas confiables de uso corriente tienen tasas de fallo anuales inferiores a 0.005, de acuerdo a estudios publicados tales como el NTP 446: Fallo de Componentes: Válvulas¹.

Hasta el día de hoy no se tienen datos en Panamá de que un sistema de rociadores haya fallado por el atascamiento o malfuncionamiento de alguna de sus válvulas, pues las mismas tienen un tipo de construcción a prueba de fallos, donde la posición de fallo en alguna ocasión posible bajo cualquier circunstancia para la válvula es en estado abierto, por lo que no impedirá el paso del flujo. Sin embargo, a pesar de esto sabemos que nada es 100% fiable, por lo que decidimos ajustarnos a un valor conservador de infiability dada por el estudio de los españoles de 0.005.

Usando la ecuación a2 podemos calcular el valor:

$$F1.2a = 1 - e^{-\frac{0.005}{\text{año}}(1\text{año})} = 0.00499$$

Esta será la probabilidad de fallos en un periodo de un año considerada para las válvulas.

¹ http://www.mtas.es/insh/ntp/ntp_446.htm

ANEXO 1.1. Modelo de Fiabilidad del Sistema utilizando la Distribución de Weibull.

En algunas ocasiones nos es práctico tener una ecuación que nos diga a primera vista y con cierta precisión que tan fiable es el sistema completo en algún lapso de tiempo que no sea al lapso de estudio de 1 año. Para formular programas de mantenimiento, de piezas que tienen un mantenimiento poco frecuente por ejemplo, siempre es interesante conocer que tanto nos arriesgamos al dejarlas trabajar por algún tiempo adicional, y sopesar la probabilidad de fallos con los costos de mantenimiento a plazos más largos.

La complejidad matemática del modelo de Weibull hace que en casos prácticos como las fiabilidades calculadas a lo largo de esta sección de componentes del sistema, uno prefiera utilizar los modelos exponencial o normal, dependiendo del que mas se ajuste a lo que deseamos; en nuestro caso de sistemas mecánicos, lógicamente la distribución exponencial para cálculos de tiempos de desgaste es la mas adecuada.

Sin embargo, cuando nos encontramos ante una situación tan compleja como el sistema completo, intentar modelar la respuesta final con algún método poco complejo resulta en muy poca aproximación entre la fiabilidad del sistema calculada y lo que resulta en la vida diaria, razón por la cual el modelo de Weibull se hace trascendente ya que puede ajustarse a diferentes etapas del sistema, característica que es excelente para modelar sistemas mecánicos y electromecánicos complejos.

Weibull propuso de forma empírica que:

$$\int \lambda(t) dt = \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \quad (\text{ec. a5})$$

Utilizando la ecuación a3, y reemplazando de forma general la multiplicación en el exponente del número inconmensurable exponencial por la integral de acuerdo a un valor de λ que según Weibull no es constante y varía con el tiempo (dando origen a “etapas” del sistema), entonces tenemos que:

$$R(t) = e^{-\int \lambda dt} = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta} \quad (\text{ec. a6})$$

donde:

t_0 = parámetro inicial de localización

η = parámetro de escala o vida característica

β = factor de forma

λ = distribución de fallos variable en función del tiempo.

Nótese que el tiempo de fallo x que anteriormente se había estandarizado a 1 año ha sido reemplazado por t para establecer una diferencia, ya que lo que buscamos es una expresión para calcular la Fiabilidad o Falibilidad en cualquier momento diferente de x .

La falibilidad queda expresada entonces de acuerdo a la ecuación a3, despejando simplemente y reemplazando el tiempo de fallo anual x por un tiempo cualquiera t y la función de fiabilidad anual por la función de fiabilidad en un tiempo cualquiera despejada en la ecuación a5:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{ec a7})$$

Si quisiéramos el modelo de la expresión que modela la tasa de fallos en el tiempo λ , solo nos basta con quitar el factor tiempo de la falibilidad en el límite cuando este tiende a cero, o sea derivarla con respecto a t , lo que nos da la “densidad de probabilidad”:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{ec a8})$$

Ahora podemos comparar la ecuación a8 con la ecuación a1 y por observación se deduce que para Weibull la función λ depende del tiempo y de los parámetros de forma β y de escala η , por lo tanto puede ajustarse modelándola como una variable dependiente hasta de 3 parámetros mas. Su forma en base a la comparación de a8 con a1 es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{ec a9})$$

De aquí y solo por dar un ejemplo; si conociéramos ya de antemano que para un año el valor de infabilidad es $F(x)=0.0742$ en sistemas de supresión de incendios (ver anexo 2, ejemplo dado en a.2.2), hacemos nuestra primera aproximación usando el sencillo modelo exponencial:

$$0.0742 = 1 - e^{-\lambda(1\text{año})}$$

De aquí nuestra primera aproximación general para λ del sistema es

$$\lambda = 0.077097$$

Se puede demostrar que cuando el factor de forma es 1, la ecuación de infirabilidad o Falibilidad de Weibull es exactamente la ecuación de Falibilidad exponencial con la que hemos despejado a λ , por lo que podemos igualar la ecuación a9 a 0.077097 cuando $\beta=1$ y $t-t_0=x=1$. De esta forma debe cumplirse que:

$$0.077097 = \frac{1}{\eta}$$

de donde obtenemos directamente la primera aproximación del parámetro de escala o vida característica

$$\eta = 12.970665$$

Lógicamente esta aproximación es muy burda y no ha hecho mas que igualar el modelo de weibull al modelo exponencial, pero sirve de parámetro de inicio para obtener las variantes de β y η , que vayan ajustando aún más el modelo de Falibilidad a la vida real de los sistemas.

Nuestro modelo de fiabilidad aproximado en primera instancia estaría dado en base a la ecuación a6:

$$R(t)_{\text{primera_aproximacion}} = e^{-\left(\frac{t-t_0}{12.970665}\right)}$$

donde $t-t_0$ es el tiempo transcurrido desde el inicio de la operación o desde el tiempo de localización inicial, hasta el tiempo donde queremos la medida de Fiabilidad.

La Falibilidad estaría dada en base a la ecuación a7:

$$F(t)_{\text{primera_aproximacion}} = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{12.970665}\right)}$$

¿Que necesitamos para proseguir?

Un análisis idéntico al que hemos hecho a lo largo de todo este capítulo pero en tiempos tales como 10 años, 100 años, y algunos tiempos inferiores como 0.1 años.

De preferencia la escogencia de los tiempos debe darse en algún tipo escala logarítmica, ya que el mismo ajuste de los modelos es exponencial, por lo que convergerá mas rápidamente a una respuesta modelo de mucha precisión si se utilizan valores muy representativos tales como los logarítmicos. De usar cualquiera otros valores, la convergencia del modelo se dará pero a menor escala.

Lógicamente necesitaríamos escribir un libro, solo para desarrollar un modelo aproximado de Fiabilidad o Falibilidad con estos parámetros, pero nuestro objetivo solo es demostrar la posibilidad de obtenerlo y hasta el momento, nos conformaremos con haber obtenido en este primer paso los parámetros burdos, que de por sí, comparados con la experiencia vivida y reportada en los registros del NFPA de Estados Unidos, ya son bastante precisos.

ANEXO 2

Ejemplo de Cálculo de Fiabilidad Global de un Sistema de Protección Contra Incendios y Repercusiones de los Cambios y Consideraciones de Diseño

a.2.1 Los fallos de las funciones de servicio del sistema propuesto.

a.2.1.2 Árboles de fallos del sistema.

... ..Iremos directamente a la presentación del análisis por árbol de fallos del sistema, el cual es bastante descriptivo, teniendo como falla final y fatal, el fallo total de la activación del sistema diseñado para supresión de incendios.

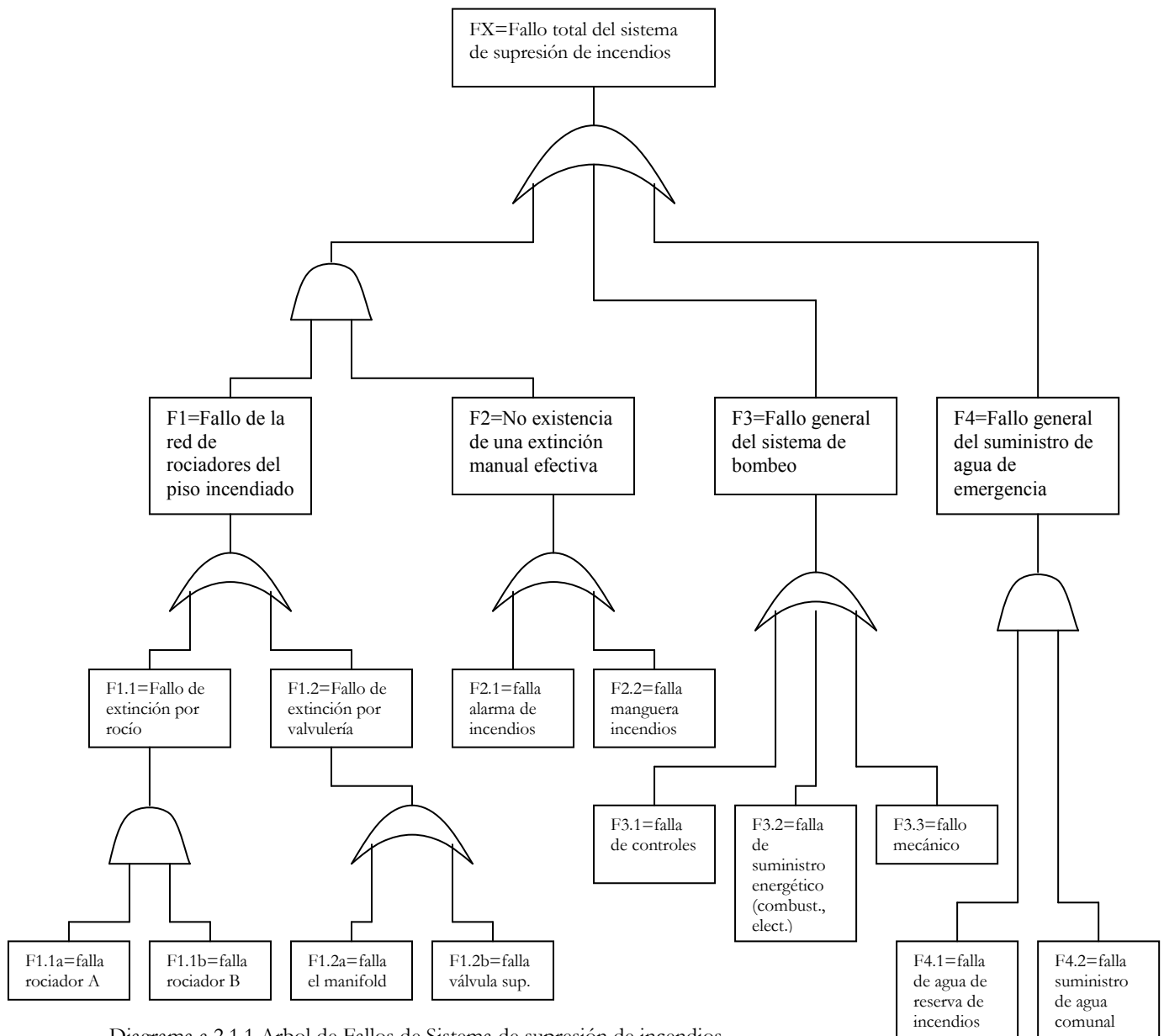


Diagrama a.2.1.1 Arbol de Fallos de Sistema de supresión de incendios

El árbol está desarrollado, tomando en cuenta la situación crítica de falla de cada una de las partes del sistema, en el momento de un siniestro. La fase de diseño del proyecto debe tomar en cuenta que cada zona debe estar protegida por lo menos al alcance de 2 rociadores llamados “rociador A” y “rociador B”; también debe estar al alcance de una válvula de supervisión, un manifold de prueba, una manguera, y posiblemente otros elementos que se van más a lo técnico y no crean efectos sobre nuestro análisis de fallas.

a.2.2. La fiabilidad de funcionamiento del sistema propuesto.

... .. Realmente si hay un punto en el que es difícil opinar, es en la fiabilidad de un sistema de seguridad que este bien diseñado y bien ejecutado tal como el que proponemos, y la mayor dificultad definitivamente la encontramos al tratar de cuantificar la calidad y disponibilidad del servicio, puesto que en teoría se acerca bastante al límite del 100% de eficiencia (como se sugiere de forma utópica), ya que tiene bastantes respaldos y si falla algún elemento, está el otro para respaldar. Sin embargo conocemos que en la práctica esto es un enunciado imposible, (ya que luego al 95% de fiabilidad, ya se hace demasiado costosa la implementación del sistema), lo que no deja de lado la dificultad de la cuantificación de la fiabilidad del sistema, siendo el primer elemento de dificultad, la adquisición de datos de fallos de un sistema que no ha fallado o que ha fallado alguna vez de manera muy eventual, como lo es un sistema de protección de incendios bien diseñado, si nos ponemos a ver los pocos casos que se reportan y se investigan separadamente de manera formal, dando publicaciones que puedan ser usadas como apoyo a nuestro objetivo de obtener eventos aislados para lograr un modelo de cálculo aproximado de fiabilidad. Por lo tanto tenemos que remontarnos a la adquisición de datos de sistemas distintos pero del mismo tipo, y asumir algunos valores iniciales para nuestra cuantificación aproximada.

En Panamá no tenemos ningún edificio con o sin rociadores que sirva de experiencia previa siniestra para poder establecer una tasa de fallos aunque sea burda. Uno de los casos más notorios a nivel mundial es la Torre Windsor de España, la cual nos hubiera servido si hubiese tenido instalados un sistema de rociadores que no hubiese funcionado, y de todas formas la torre se hubiese incinerado, pero como no tenía rociadores, tampoco nos sirve. El otro caso que nos viene a la mente de seguro serán las torres gemelas en

Estados Unidos; sin embargo tampoco nos sirven de la forma correcta y explico por que; el sistema de extinción de incendios esta diseñado para sofocar incendios de magnitud y generación de acuerdo a los cálculos de energía combustible dentro del edificio y localizadamente en áreas de algunos cientos de metros cuadrados dependiendo del tipo de riesgo; pero no consideran la inclusión de grandes cargas energéticas combustibles externas a las del propio edificio como lo son los inmensos tanques de combustibles de los aviones, por lo tanto, no demuestra una falla real del sistema, sino un evento trágico aleatorio para el cual no había diseño de seguridad con la capacidad de controlarlo. Por la falta de datos de fallos que se adjudiquen realmente al sistema de protección contra incendios, nos vemos en la necesidad de mantenerlo dentro de nuestros registros, no para usarlo dentro de una primera aproximación de fallos, pero si para reconfirmar tiempos de fallos, de manera probable por medio del uso de algún modelo de distribución de fallos, aunque sea de forma muy burda. El único caso nuevo y famoso que nos queda en nuestra investigación es la Torre Este del Parque Central de Caracas Venezuela, que si bien es cierto, algunos dicen que fue sabotaje, provocado, etc.; es la información que mas se ajusta a lo que definimos de una falla general del sistema de protección de incendios con rociadores automáticos, por lo tanto la incluimos en nuestros registros como punto de arranque en la determinación de fallos del sistema.

El siguiente punto, definitivamente, para obtener un valor cuantificado de la fiabilidad del sistema, es resolver el árbol de fallos, lo que nos dará la tasa de “infiabilidad” del sistema o “función acumulativa de fallos”. Podría ir directamente al cálculo del “conjunto mínimo de fallos” resolviendo directamente todo el árbol hasta el suceso final por medio del Algebra de Boole, sin embargo de esta forma se dejan de comprender muchos sucesos al pasarlos por alto, los cuales nos servirán después para ver los eslabones mas débiles, hablar de mantenimiento del sistema.

Comenzando en el punto mas bajo del árbol tenemos los bloques de falla F4.1 y F4.2. El bloque F4.2 es una variable a nivel mundial, para establecer un modelo que funcione en cualquier lugar, lo dejaremos como variable independiente del proceso. El bloque F4.1 es el punto de falla de la Torre Este del parque central, por lo tanto se calcula su infinidad, lo cual se encuentra en el anexo 1.

$F4.1 = 0.0392$ en un año.

Podemos deducir la ecuación general de Fallos de Suministro de agua de emergencia

$$F4 = F4.1 * F4.2 = 0.0392 F4.2$$

Aún en la base del árbol se encuentran los rociadores, el manifold y la válvula de supervisión. Los parámetros de las válvulas, no son medibles de acuerdo a sus fabricantes, pero en el anexo 1 se calcula según los valores clásicos que tienen un promedio de fiabilidad de los siguientes valores.

$$F1.2a = F1.2b = 0.00499/\text{año}$$

De aquí que aplicando álgebra booleana:

$$F1.2 = F1.2a + F1.2b = 0.00997/\text{año}$$

Como se ve, debido a que estas válvulas se encuentran en serie, la infiability del sistema de valvulería crece al combinarse ambas en cada piso, pues se suma la infiability de una con la de la otra al tenerse la posibilidad de obtener el fallo F1.2, gracias a alguna de las dos por separado.

Los rociadores pueden ser considerados válvulas térmicas cuya operación es muy sencilla, y su tasa de fallo es tan baja que se considera nula. Sin embargo la experiencia en campo nos ha demostrado que por diferentes razones (transporte, golpes, defectos posibles de fábrica, etc.), de 1200 rociadores que compramos, tenemos un promedio de 5 que vienen defectuosos, por lo que podemos establecer una tasa de fallos discreta de 0.00417 para rociadores. Como la vida útil del rociador es la vida del proyecto hasta el punto en que se genere un incendio no podemos pasar esta tasa del formato discreto al continuo, por lo que la estableceremos como un valor constante inicial de infiability de 0.00417/año, como pesimista, continuo a través de los años de vida del proyecto. Con este valor obtenemos un valor F1.1.

$$F1.1a = F1.1b = 0.00417/\text{año}$$

$$F1.1 = F1.1a * F1.1b = 0.000017/\text{año}$$

Como se ve, la infiability baja mucho al combinar 2 rociadores en paralelo, distinto al arreglo serie anterior, lo que verifica el enunciado de que el fallo por rociadores es prácticamente nulo al ser menos del 0.002% anual.

Ahora podemos sacar el valor F1

$$F1 = F1.1 + F1.2 = 0.00999/\text{año}.$$

La probabilidad de fallas de las alarmas contra incendios la estableceremos como 2% aproximadamente ya que depende mucho del tipo de sistema de alarmas y fabricantes, sin embargo no nos toca complicarnos en los sistemas de alarmas; y la de las mangueras puede asumirse como la de una válvula de seguridad con lo que queda igual a F1.2a.

De aquí que se pueda calcular F2

$$F2 = F2.1 + F2.2 = 0.02 + 0.00499 = 0.02499/\text{año}$$

Las fallas en las bombas son muy extrañas, ya que las mismas siempre son diseñadas para trabajar incluso en los casos mas complicados, cuando el voltaje se dispara, cuando hay poco nivel de líquido y entra en cavitación, cuando no tiene lubricación adecuada; en fin todos los fabricantes de bombas contra incendio demuestran que sus bombas tienen un tipo de construcción tan robusto y generoso que trabajan aún estando en pésimo estado mecánico y trabajarán hasta que alguien las apague manualmente o hasta que se quemem ellas mismas definitivamente, lo que suceda primero. La falla de los controles la mayor parte del tiempo se debe a los mismos operarios, pero oscila igual que con las alarmas en el 2%; y la falla de la mecánica de las bombas puede ser considerada tan baja como 0.2%, reduciéndose aún mas con el mantenimiento adecuado. La variable F3.2 (flujo energético, o combustible) puede ser considerada al igual que el suministro de agua comunal, como una variable a nivel mundial, por lo que la dejaremos sin calcular hasta el final para tener una ecuación de parámetro general de fiabilidad en esto.

Teniendo $F3.1 = 0.02$ y $F3.3 = 0.002$, obtenemos la ecuación de Falibilidad General del Sistema de Bombeo:

$$F3 = F3.1 + F3.2 + F3.3$$

$$F3 = F3.2 + 0.022$$

Teniendo ésta última ecuación, podemos sacar la ecuación general de Falibilidad del sistema de supresión de incendios:

$$F_x = (F1 * F2) + F3 + F4$$

$$F_x = 0.00024965 + F3.2 + 0.022 + 0.0392 F4.1$$

$$F_x = 0.02225 + F3.2 + 0.0392 F4.2$$

La anterior ecuación modela de forma general el porcentaje de in fiabilidad del sistema de supresión de incendios en un tiempo estimado de 1 año, dependiendo de F3.2 (falla de suministro energético) y F4.2 (falla de suministro de agua comunal).

Como se puede ver la falla de suministro energético tiene una inyección propia en efecto sobre la ecuación, ya que su in fiabilidad se traduce directamente sobre la in fiabilidad del sistema contra incendios. Sin embargo, el efecto del suministro de agua comunal esta siempre modulado por causa de tener el respaldo del tanque de reserva, y la modulación es muy alta, ya que la in fiabilidad del agua comunal se va más reducida aún al multiplicarse por el factor del tanque de reserva (0.0392), para luego traducirse a un pequeño efecto sobre la in fiabilidad general del sistema.

Las empresas eléctricas en Panamá están obligadas a mantener niveles de servicio con fluctuaciones inferiores al 5% del nivel de voltaje nominal de los diferentes sistemas; igualmente deben regular in fiabilidades en suministro eléctrico que sean inferiores al 5%, lo cual cumplen con éxito hasta el día de hoy. Como a las bombas no les afectan las fluctuaciones eléctricas, ya que cuentan con su controlador y la in fiabilidad de las fluctuaciones esta incluida dentro de las del controlador, entonces la in fiabilidad del suministro se traduce enteramente sobre el máximo de 5% de discontinuidad del servicio.

La empresa de suministro de agua en Panamá es estatal, por lo que no esta normada de tal forma, y esta falta de regulación constituye un problema para nuestro cálculo de in fiabilidad; pero en las áreas residenciales podemos aproximar 5% de pérdida de suministro por unidad de tiempo aproximadamente, para cumplir de una forma crítica con nuestro cálculo.

De esta manera, específicamente para el caso planteado en nuestro país, en la región residencial:

$$F_x = 0.02225 + 0.05 + 0.0392 (0.05) = 0.07421$$

Este número es muy especial para nosotros pues nos dice de forma general que considerando todos los componentes del sistema, incluyendo intrínsecamente, diseño, inspección, aprobación y finalmente la aprobación física del mismo sistema de acuerdo a las normas aplicables de las cuales he hablado extensamente durante el desarrollo de éste trabajo, el sistema tiene una probabilidad de fallos general debida a cualquier causa considerada en el árbol de fallos calculada de 7.42% anual.

La pregunta siguiente no se hace esperar, y es ¿Qué tan cerca estamos en nuestra predicción de la vida real?

En Panamá no tenemos tiempo en desarrollo de estos sistemas, aunque hemos avanzado rápido gracias a nuestros nexos con los Estados Unidos, al igual que la mayoría de los países latinoamericanos, africanos, asiáticos e incluso algunos países Europeos, vemos el tema de seguridad contra incendios por supresión automática como algo bastante novedoso aún. De esta forma pues nuestra inexperiencia no nos deja tener un registro de datos experimentales que corroboren nuestro cálculo. Sin embargo podemos referirnos a Estados Unidos, donde se tienen mas de 100 años de experiencia en protección y supresión de incendios, y de allí podemos sacar nuestros datos experimentales, aunque sea comparativamente.

Del informe generado anualmente por la NFPA; U.S. EXPERIENCE WITH SPRINKLERS AND OTHER FIRE EXTINGUISHING EQUIPMENT (august 2005)², dirigido por el Fire Análisis and Research División del NFPA, podemos sacar nuestros datos de laboratorio. El reporte es muy completo y corrobora varias de nuestras estimaciones, pero específicamente en la página 65 del reporte cita como uno de los puntos de conclusión:

“Excluding fires too small to activate a sprinkler and fires not located in an area covered by sprinklers, sprinklers failed to operate in 7% of reported structure fires. Twothirds of these failures occurred because the system had been shut off, and most of the other failures also involved some type of human error, e.g., failure to maintain the system, failure to keep the system appropriate to the hazard, or failure to provide for other aspects of building fire protection”.

Como se aprecia, la experiencia norteamericana, al aplicar estas normas da como resultado una experiencia de fallas bastante apegada a lo calculado, teniendo un general de 7% de fallas en un año, de las cuales 4,67% (casi 5%) se deben a que el sistema había sido apagado (el sistema de incendios solo puede estar apagado cuando no hay energía de alimentación pues de lo contrario siempre se mantiene en “formato de espera” o stand by). Si se ve, de la ecuación de fiabilidad que nosotros planteamos, el factor invariable por norma que se tiene para fiabilidad energética es precisamente 5% como máximo, en experiencia práctica siempre debe ser menor (para los americanos según lo expresado fue 4.67%), y el calculo

² <http://www.nfpa.org/assets/files/PDF/OSsprinklers.pdf>

final nos ha dado 7.42% en el caso de tener sistemas bien diseñados en Panamá (que cuenta de igual forma para cualquier lugar donde se respeten los máximos de 5% de in fiabilidad de suministro), y esto ya contando todos los demás posibles puntos de falla, (lo que en la experiencia americana se ha traducido en 7%).

De requerirse la Fiabilidad o Infiabilidad del sistema en otro lapso de tiempo que no sea el caso práctico de un año, se puede utilizar la ecuación aproximada que he despejado, utilizando el modelo de Weibull que me parece el mas adecuado de acuerdo a su características de adaptabilidad por medio de sus parámetros de ajuste, haciéndolo un poco mas preciso que el modelo exponencial que hemos en éste anexo.

Este trabajo se encuentra en el anexo 1.1.

a.2.3. Sugerencias para el diseño del sistema.

... ..Es fácil ver con la simple inspección del árbol de fallos, que el sistema propuesto en si ya es bastante paralelo en lo que respecta a seguridad. Su tasa de fallos máxima, debido a errores fuera de suministro energético, cercana al 2% demuestra su fiabilidad supremamente alta, e incluyendo fallos energéticos, 7%; sigue siendo un número muy aceptable. Pero en ingeniería todo se puede mejorar, y es nuestra intención ahora proponer ciertas ideas que aumentarían la fiabilidad del sistema, acercándola un poco más al 100%. Sabemos que por el estilo exponencial de la curva de in fiabilidad de este tipo de sistemas mecánicos con respecto al tiempo, acercarse al limite superior de 100% luego que ya se encuentra uno por encima de las 3 constantes de tiempo sobre λ , se vuelve excesivamente costoso, pues cuando se tiene al periodo de tiempo estimado como $3/\lambda$ veces, la fiabilidad ya es superior al 95% y la curva se acerca muy lentamente al 100% sin llegar nunca pues la pendiente se aproxima demasiado a 0, lo que significa que por mas redundancia que pongamos al sistema y por mas que lo mejoremos, no conseguiremos un aumento de fiabilidad que no pueda ser despreciable ante la inversión que tendremos que realizar.

Usando el modelo exponencial simple de fiabilidad, demostrado en el Anexo 1:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad \text{donde } t = 3/\lambda, \quad F(x) = 0.9502 \quad (\text{ec a3})$$

Como es de suponerse, es un valor de infiability que se desea evitar a toda costa, por lo tanto, y se desea que por el contrario la fiabilidad tenga un aproximado de este valor en todo momento.

Nuestro sistema ya ha sido calculado para tener una fiabilidad mínima del 92.6%, típicamente establecida en 93% como se vio en el punto anterior, incluyendo toda clase de fallas, hasta sabotajes.

Hacerlo llegar a valores como 98% o 99% es prohibitivo para cualquier bolsillo, pero aún podemos mejorar hasta el límite práctico de 95% o un poco mas.

Por lo tanto y en base a este análisis mi primer punto de ataque es sencillamente aquel que golpea de forma negativa y directa a la infiability del sistema, el suministro energético. Mi idea principal es que si puedo introducir en la ecuación un factor modulante de este sumando dentro de la ecuación (tal como el que tiene el suministro de agua comunal), entonces lograremos reducir esta infiability a menos del 5%.

La forma de obtener un respaldo energético no es hasta la actualidad que utilizando una planta de emergencia que tenga un interruptor de transferencia automático que en caso de darse la combinación de un siniestro con un apagón de luz envíe alimentación directamente a la bomba contra incendios. En el caso de utilización de combustible, tendría que enviar alimentación a la bomba de incendios y al sistema de bombeo de combustible que envía el combustible de los tanques a la bomba de incendio. Para los efectos de calculo podemos considerarlo simplemente como “mejoras en el suministro energético de la bomba de incendios”.

Incluir este equipo en el sistema significa incluir el factor modulante F_e , en la ecuación de fiabilidad general del sistema, la cual quedaría de la siguiente forma expresada luego de trabajar algo de álgebra booleana:

$$F_x = 0.02225 + F_e * F_{3.2} + 0.0392 F_{4.2}$$

El factor F_e , no es más que el factor de infiability del equipo que estamos incluyendo. De salida, aunque el equipo sea de poco fiar, ya se puede ver y demostrar que cualquier valor de F_x , cuando se considera a F_e , es menor que el valor que se podría obtener de no considerarlo.

Para verlo de forma práctica, consideremos para el equipo un valor de fiabilidad bastante conservador de solo 85%, lo que nos da un valor de infiability

$F_e = 1 - 0.85 = 0.15$ (según ecuación a4 despejada en el Anexo 1)

Si calculamos ahora la nueva fiabilidad del sistema con el equipo considerado, y bajo las condiciones descritas como estándares (5% de infiabilidad de servicios) la misma será:

$$F_x = 0.02225 + 0.15 \cdot 0.05 + 0.0392 \cdot 0.05 = 0.0317$$

Esto demuestra que nuestro punto es acertado.

Si consideramos ahora un valor bastante fiable del equipo de 90%, con lo que $F_e = 0.1$; entonces $F_x = 0.0292$.

Esto demuestra que no necesitamos el mejor equipo de respaldo energético para acercar la infiabilidad aproximadamente al mismo valor de 0.03. Las diferencias entre un equipo de respaldo eléctrico de 85% de fiabilidad con uno de 90% para nuestros efectos sobre la fiabilidad final del sistema son despreciables, pero en costos, podemos demostrar con algunas cotizaciones que el segundo es mucho más caro que el primero. Esto deja por sentado que no siempre comprar el elemento más caro para el sistema, nos va a dar los mejores resultados, pero siempre es necesario un análisis de lo que se va a implementar antes de llevarlo a la práctica.

Como luego de esto nos encontraremos aproximadamente en 97% de fiabilidad, cualquier mejora en el sistema para subir porcentualmente la fiabilidad, representará un enorme gasto, sin que necesariamente represente una mejora efectiva en nuestro sistema.

Con la modificación planteada el nuevo árbol de fallos quedaría replanteado como se muestra en la siguiente imagen.

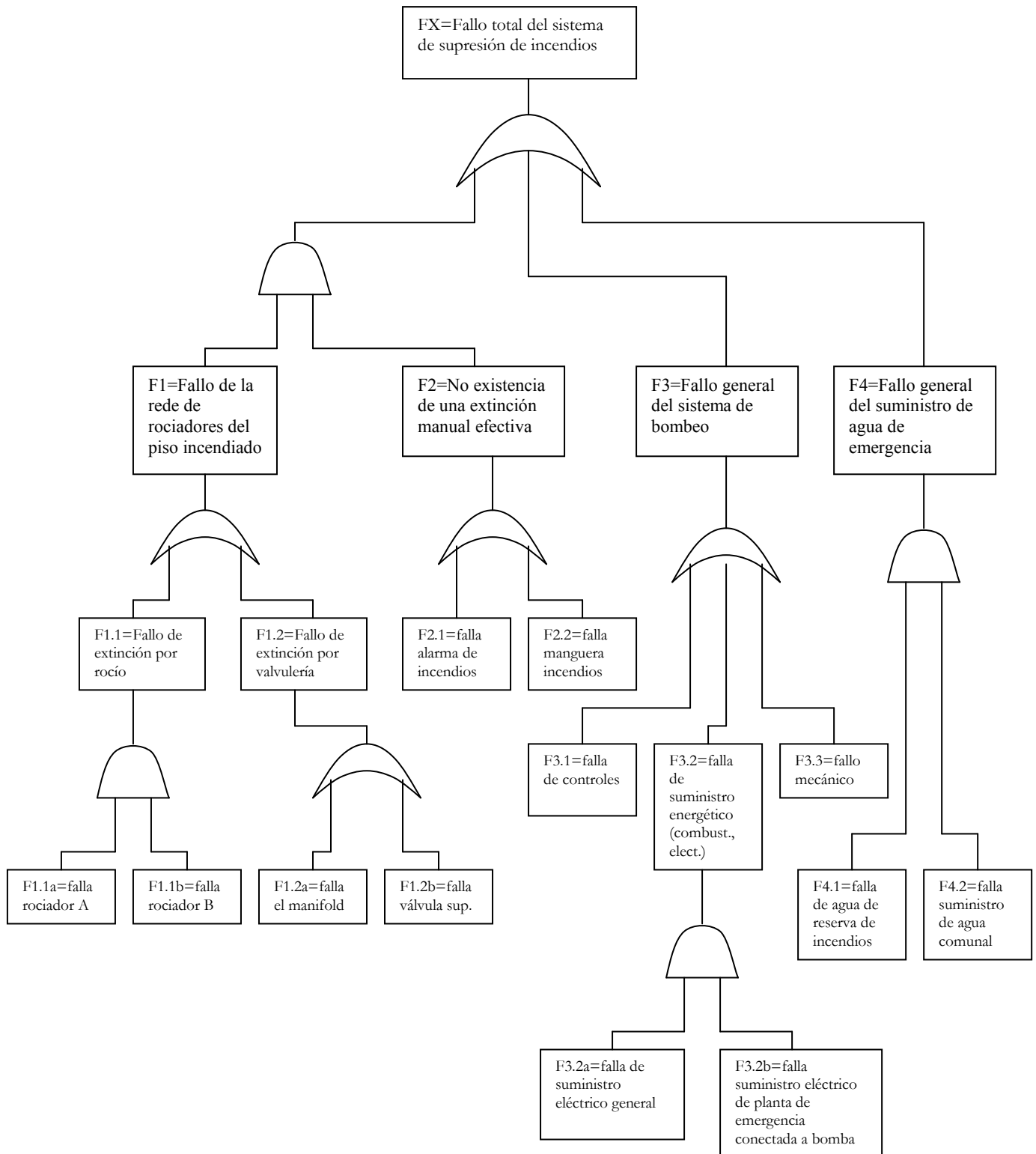


Diagrama a.2.3.1 Arbol de Fallos de Sistema de supresión de incendios con mejoras.

ANEXO 3

Tabla de grosores AWG (American Wire Gauge)

La presente tabla muestra la equivalencia entre los grosores AWG y el sistema de medida inglés (imperial).

Dia-mils = diámetro en mils (1 mil = 1e-3 pulgadas)

TPI = turns-per-inch, vueltas por pulgada. útil para el cálculo de bobinados.

Dia-mm = diámetro en mm

Circ-mils = área de la sección recta en mils circulares (1 circ-mil = d^2 siendo d el diámetro en mils).

Ohms/kft = ohms por 1000 pies

Ft/Ohm = Número de pies requeridos para 1 ohm de resistencia

Ft/Lb = Pies por Libra de peso

Ohms/Lb = Ohms por libra de peso.

Lb/kft = Libras por 1000 pies

*Amps = Tasa de corriente admisible basado en 750 circ-mils por ampere.

MaxAmp = Corriente máxima admisible basado en 500 circ-mils por ampere.

1 Ft = 0.3048 m

1 inch = 0.0254 m

1 Lb = 453.5924 g

AWG	Dia-mils	TPI	Dia-mm	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
0000	459.99	2.1740	11.684	211592	0.0490	20402	1.5613	0.0001	640.48	282.12	423.18
000	409.63	2.4412	10.405	167800	0.0618	16180	1.9688	0.0001	507.93	223.73	335.60
00	364.79	2.7413	9.2657	133072	0.0779	12831	2.4826	0.0002	402.80	177.43	266.14

AWG	Dia-mils	TPI	Dia-mm	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
0	324.85	3.0783	8.2513	105531	0.0983	10175	3.1305	0.0003	319.44	140.71	211.06
1	289.29	3.4567	7.3480	83690	0.1239	8069.5	3.9475	0.0005	253.33	111.59	167.38
2	257.62	3.8817	6.5436	66369	0.1563	6399.4	4.9777	0.0008	200.90	88.492	132.74
3	229.42	4.3588	5.8272	52633	0.1970	5075.0	6.2767	0.0012	159.32	70.177	105.27
4	204.30	4.8947	5.1893	41740	0.2485	4024.7	7.9148	0.0020	126.35	55.653	83.480
5	181.94	5.4964	4.6212	33101	0.3133	3191.7	9.9804	0.0031	100.20	44.135	66.203
6	162.02	6.1721	4.1153	26251	0.3951	2531.1	12.585	0.0050	79.460	35.001	52.501
7	144.28	6.9308	3.6648	20818	0.4982	2007.3	15.869	0.0079	63.014	27.757	41.635

8	128.49	7.7828	3.2636	16509	0.6282	1591.8	20.011	0.0126	49.973	22.012	33.018
9	114.42	8.7396	2.9063	13092	0.7921	1262.4	25.233	0.0200	39.630	17.456	26.185

AWG	Dia-mils	TPI	Dia-mm	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
10	101.90	9.8140	2.5881	10383	0.9989	1001.1	31.819	0.0318	31.428	13.844	20.765
11	90.741	11.020	2.3048	8233.9	1.2596	793.93	40.122	0.0505	24.924	10.978	16.468
12	80.807	12.375	2.0525	6529.8	1.5883	629.61	50.593	0.0804	19.765	8.7064	13.060
13	71.961	13.896	1.8278	5178.3	2.0028	499.31	63.797	0.1278	15.675	6.9045	10.357
14	64.083	15.605	1.6277	4106.6	2.5255	395.97	80.447	0.2031	12.431	5.4755	8.2132
15	57.067	17.523	1.4495	3256.7	3.1845	314.02	101.44	0.3230	9.8579	4.3423	6.5134
16	50.820	19.677	1.2908	2582.7	4.0156	249.03	127.91	0.5136	7.8177	3.4436	5.1654
17	45.257	22.096	1.1495	2048.2	5.0636	197.49	161.30	0.8167	6.1997	2.7309	4.0963
18	40.302	24.813	1.0237	1624.3	6.3851	156.62	203.39	1.2986	4.9166	2.1657	3.2485
19	35.890	27.863	0.9116	1288.1	8.0514	124.20	256.47	2.0648	3.8991	1.7175	2.5762

AWG	Dia-mils	TPI	Dia-mm	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
20	31.961	31.288	0.8118	1021.5	10.153	98.496	323.41	3.2832	3.0921	1.3620	2.0430
21	28.462	35.134	0.7229	810.10	12.802	78.111	407.81	5.2205	2.4521	1.0801	1.6202
22	25.346	39.453	0.6438	642.44	16.143	61.945	514.23	8.3009	1.9446	0.8566	1.2849
23	22.572	44.304	0.5733	509.48	20.356	49.125	648.44	13.199	1.5422	0.6793	1.0190
24	20.101	49.750	0.5106	404.03	25.669	38.958	817.66	20.987	1.2230	0.5387	0.8081
25	17.900	55.866	0.4547	320.41	32.368	30.895	1031.1	33.371	0.9699	0.4272	0.6408
26	15.940	62.733	0.4049	254.10	40.815	24.501	1300.1	53.061	0.7692	0.3388	0.5082
27	14.195	70.445	0.3606	201.51	51.467	19.430	1639.4	84.371	0.6100	0.2687	0.4030
28	12.641	79.105	0.3211	159.80	64.898	15.409	2067.3	134.15	0.4837	0.2131	0.3196
29	11.257	88.830	0.2859	126.73	81.835	12.220	2606.8	213.31	0.3836	0.1690	0.2535

AWG	Dia-mils	TPI	Dia-mm	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
30	10.025	99.750	0.2546	100.50	103.19	9.6906	3287.1	339.18	0.3042	0.1340	0.2010
31	8.9276	112.01	0.2268	79.702	130.12	7.6850	4145.0	539.32	0.2413	0.1063	0.1594
32	7.9503	125.78	0.2019	63.207	164.08	6.0945	5226.7	857.55	0.1913	0.0843	0.1264
33	7.0799	141.24	0.1798	50.125	206.90	4.8332	6590.8	1363.6	0.1517	0.0668	0.1003
34	6.3048	158.61	0.1601	39.751	260.90	3.8329	8310.8	2168.1	0.1203	0.0530	0.0795
35	5.6146	178.11	0.1426	31.524	328.99	3.0396	10480	3447.5	0.0954	0.0420	0.0630
36	5.0000	200.00	0.1270	25.000	414.85	2.4105	13215	5481.7	0.0757	0.0333	0.0500
37	4.4526	224.59	0.1131	19.826	523.11	1.9116	16663	8716.2	0.0600	0.0264	0.0397
38	3.9652	252.20	0.1007	15.723	659.63	1.5160	21012	13859	0.0476	0.0210	0.0314
39	3.5311	283.20	0.0897	12.469	831.78	1.2022	26496	22037	0.0377	0.0166	0.0249

AWG	Dia-mils	TPI	Dia-mm	Circ-mils	Ohms/Kft	Ft/Ohm	Ft/Lb	Ohms/Lb	Lb/Kft	*Amps	MaxAmps
40	3.1445	318.01	0.0799	9.8880	1048.9	0.9534	33410	35040	0.0299	0.0132	0.0198

<http://www.lcardaba.com/articles/awg.htm>

ANEXO 4

(Artículo “in press” aceptado por la revista científica indexada **Tecnociencia**)

PROPUESTA DE UN MODELO MATEMATICO PARA CALCULAR EL CALENTAMIENTO DE CONDUCTORES ELECTRICOS

Dorindo Elam Cárdenas Estrada

Universidad Politécnica de Catalunya; Certified Fire Protection Specialist (CFPS), miembro de National Fire Protection Association, U.S.A. (NFPA); Universidad Tecnológica de Panamá / Ingeniería Atlántico, S.A.
email: dcardenas@i-atlantico.com, de.cardenas@hotmail.com

RESUMEN

El presente artículo tiene el objetivo de exponer los fundamentos físicos teóricos y resultados experimentales que se han obtenido luego de 4 años de investigación y experimentación con incendios en conductores eléctricos. Nos basamos en el concepto de la transformación de energía eléctrica en térmica, en el momento de la conducción eléctrica, lo que comúnmente se conoce como “efecto Joule”. Presentamos una revisión del estado del arte de la ciencia en lo que corresponde a la investigación de modelos de calentamiento de conductores y aplicaciones de modelado que podrían ser utilizadas en ingeniería de protección contra incendios y electricidad, para crear avances en la comprensión de hechos como el investigado por nosotros, el cual se basa en la hipótesis de que los incendios que tienen como fuente de energía primaria un elemento eléctrico, no necesariamente inician cuando existe un arco eléctrico o un corto circuito, sino que pueden iniciar mucho antes, cuando éste elemento se calienta por el efecto Joule y éste calor es el suficiente para ignitar algún material alrededor o afectar alguna parte del mismo elemento conductor. Se ofrece un análisis científico general de la forma como se generan los incendios de causas eléctricas y se propone como resultado de la investigación un nuevo modelo matemático, con el cual se genera un aporte en el campo científico de la electricidad y la ciencia de la protección contra incendios.

PALABRAS CLAVES

Modelo matemático, corriente eléctrica, triángulo del fuego, ignición, resistividad.

ABSTRACT

The present article has the objective to expose the physical theoretical foundations and experimental results that have been obtained after 4 years of research and experimentation with fires in electrical conductors. We are based on the concept of transformation of electric power in thermal, in the moment of the electrical conduction, which commonly is known as "Joule Effect". We present a review of the state of the art of the science in what it concerns to the models' research of warming of conductors and applications of modeling that might be used in fire protection engineering and electricity, to create advances in the comprehension of facts as the investigated at this time, which is based on the hypothesis of which the fires that take an electric element as a primary source of energy, not necessarily initiate when an electric arc or short circuit exists, but they can initiate very much before, when this one element warms up for the Joule Effect and it heat to be the sufficient one for ignite some material around or to affect some part of the own conductor element. We present a scientific general analysis of the form like are generated the fires by electrical causes and based in results of our research, we propose a new mathematical model, doing a contribution in the scientific field of the electricity and the science of the fire protection.

KEYWORDS

Mathematical model, electric current, triangle of fire, ignition, resistivity.

INTRODUCCIÓN

El continuo avance tecnológico de nuestros días implícitamente ha dado como resultado la utilización de una cantidad cada vez mayor de energía eléctrica. Este avance trae consigo múltiples efectos secundarios contraproducentes, entre los que se muestran de forma clara aquellos que afectan directamente al medio ambiente; pero también se pueden determinar aquellos que aunque parecieran no actuar continuamente, producen afecciones aleatorias contra la seguridad humana y el ambiente, en muchos casos desastrosas, hablamos de los incendios, los cuales tienen su origen siempre en una fuente de energía, y esta fuente de energía en una gran cantidad de casos es eléctrica.

Algunas predicciones apuntan a crecimientos energéticos mundiales del 50% en 10 a 15 años; siendo la tendencia global marcada en todas las regiones, y no solo en Iberoamérica, sin embargo se puede ver que el crecimiento de consumo energético de países iberoamericanos es muy acelerado; por ejemplo el de España es uno de los mayores de Europa (Lecuona & Rodríguez, 2005), y Latinoamérica tiene tasas de crecimiento igualmente muy altas, lo que se asocia con la incidencia de incendios por causas de energía eléctrica dando como resultado el alto porcentaje de incidencias que se tiene también en éstas últimas.

Los reportes mas confiables de incendios, publicados por NFPA, incluyen la recapitulación de causas líderes en incendios domésticos (en hogares de E.U.A.); y entre 1999 y 2002; los equipos de distribución eléctrica e iluminación se posicionaron en el tercer lugar con el 9% de las causas, luego de los equipos identificados de cocina con el 20% y los equipos identificados de calefacción con el 11%. (Hall & Cote, 2008). Sin embargo nótese que una gran parte de estos equipos de calefacción son también “equipos eléctricos” (aquellos que trabajan por resistencias eléctricas), y su falla y producción de calor en caso de un incendio, podría computarse también a la electricidad.

Los posibles medios para evitar éstos hechos requieren de conceptos innovadores que proporcionen soluciones viables que puedan ser desarrolladas de forma práctica para su implementación en la vida real. Por esta causa hemos visto la necesidad de investigar una posible solución, considerando ésta investigación como una indagación original planificada que persigue descubrir un nuevo conocimiento, que en nuestro caso es de modelado para efectos de diseño, y una nueva comprensión en el ámbito científico y tecnológico que proporcionará un desarrollo a la aplicación de los resultados de la investigación (Blázquez, 2005), en el área de la ingeniería eléctrica, ingeniería de diseño, e ingeniería de protección contra incendios.

Un posible medio de mitigación de estas fallas, sería la aplicación de una metodología de diseño de proyectos que considere las posibles fuentes eléctricas de calor en los proyectos, como un renglón de cálculo en su modelo y desarrollo. El único inconveniente en éste momento para la implementación de un sistema o metodología de diseño que considere las fuentes eléctricas de calor en los proyectos de edificación, es la inexistencia de un modelo matemático que pueda ser aplicado de forma práctica en el diseño; ajustándose a condiciones como la geometría del conductor, las características eléctricas de voltaje, corriente y resistividad del mismo, las características del medio ambiente que lo rodea, etc.

Por ello proponemos este nuevo modelo de ecuaciones para análisis de termoconductividad en conductores eléctricos, utilizando medios matemáticos efectivos con base en hechos físicos y las condiciones específicas de cada conductor.

1. Bases físicas teóricas del nuevo modelo

Lo fundamental aquí es comprender los hechos físicos. Un incendio de causas eléctricas no escapa del esquema general de *ignición* ni del esquema general de *incendio*; y lo menciono de esta forma porque muchas personas confunden los términos y al mencionar cualquiera de ellos se piensa en lo mismo; “en algo que se quema”, sin embargo aunque se habla de eventos relacionados, cada uno de ellos tiene sus condiciones y características propias.

Cuando hablamos de “*ignición*”, nos referimos al estado inicial de la generación del *incendio* (estado transitorio inicial), fenómeno que lleva mas de cien años en estudios (Babrauskas, 2007), y aunque quedan varios puntos sin entender acerca del mismo, ya ha sido formalizada su definición; y cuando hablamos de *incendio*, es el estado desarrollado del evento, el cual en ocasiones es modelado como “estado estable”, pero en el caso de un fuego (refiriéndose al incendio no controlado), muy difícilmente se llega a una condición que pueda ser representada dignamente por un modelo de estado estable, ya que el mismo se define de forma general como un proceso de oxidación rápido automantenido y acompañado por la producción de calor y luz en intensidades variables (Cote & Percy, 1993).

En teoría de incendios, las representaciones de estos estados se dan por medio de lo que se conoce como *triángulo del fuego* y *tetraedro del fuego*. En palabras sencillas el *triángulo del fuego* esta constituido por 1.) Un combustible, 2.) Una fuente de calor o temperatura suficiente; y 3.) Oxígeno. Las literaturas que han incluido un cuarto elemento principal en esta descripción de elementos fundamentales para el fuego, han considerado 4.) Una *reacción en cadena desinhibida*, por medio de la cual se mantiene la combustión; sin embargo este cuarto punto solo es tomado en cuenta realmente como una necesidad para mantener el incendio vivo una vez ha comenzado (o sea cuando está en su ideológico “estado estable”).

Como se aprecia en las imágenes siguientes, el triángulo del fuego trata de representar la ignición o una “chispa” mientras que el tetraedro del fuego trata de representar el incendio o “fuego desinhibido”.

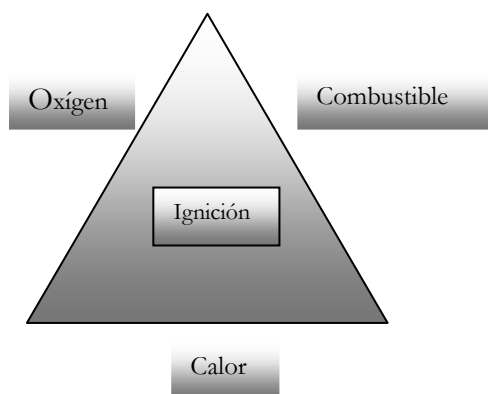


Fig. 1. Representación gráfica del “Triángulo del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para llevar a cabo la ignición.

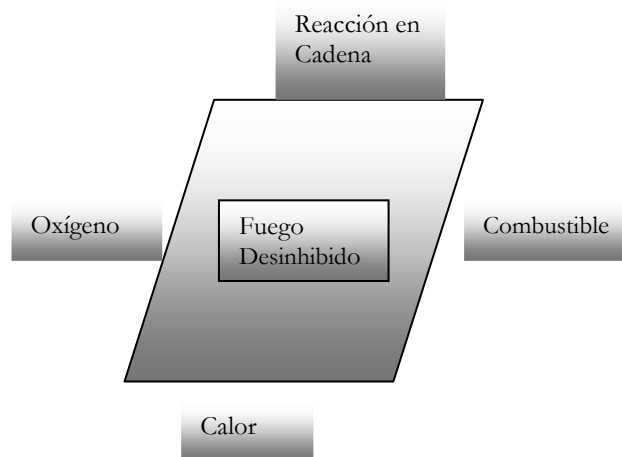


Fig. 2. Representación gráfica del “Tetraedro del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para tener un fuego mantenido.

Esta “*ignición*” es un proceso transitorio, en muchos casos muy inestable, que puede terminar muy pronto, con lo que solo se obtiene “un chispazo”. En caso de líquidos y sólidos a este estado se le llama *punto de inflamación (flashpoint)* (Drysdale, 1985). Cuando el fuego se mantiene por sí solo sin apagarse, se considera que ha salido de la simple inflamación y ha llegado al *punto de fuego (firepoint)* (Kanury, 2002) dentro del proceso de *ignición* y luego que esto se da, si aún se mantiene vivo, ha de convertirse en un *incendio*, y el mismo perdurará hasta que se rompa alguno de los eslabones del *tetraedro del fuego*. La aparición de la “*reacción en cadena desinhibida*” (Friedman, 1991), implica la aparición de llamas y la liberación de mucho más calor (Simmons, 2002).

Cuando la ignición es por causas eléctricas; se dan dos opciones para llegar a ella. La primera, es que la fuente de calor sea un arco eléctrico formado; y la segunda, es que la fuente de calor sea un elemento o dispositivo eléctrico resistivo caliente por termoconducción (Ryan, & Chubb, 1991).

La primera opción se ha estudiado ampliamente, dando como resultado el desarrollo de tecnologías tipo rompe-arco o “breaker” (Milatovich, 2008), y tecnologías digitales y de estado sólido con sistemas de control de lazos mucho más precisos (General Electric, Industrial 2010). También se han desarrollado, aplicaciones específicas tales como los interruptores por falla a tierra (GFCI: Ground Fault Current Interrupters); por falla de arco (AFCI: Arc Fault Circuit Interrupters); y los interruptores por escape de corriente (LCDI: Leakage Current Detection and Interruption) (Faulconer & Faulconer, 2010).

La segunda opción, no ha sido tan estudiada; y el modelado matemático general de la misma debe considerar un análisis tanto de la fuente generadora, como del medio ambiente que la rodea. Un análisis matemático que podría aplicarse con algunos ajustes como una opción para analizar conductores eléctricos, sería el propuesto por Mowrer (Mowrer, 2007), pero por sí solo sería aplicable únicamente a conductores cilíndricos y sin la generación interna de calor causada por el efecto Joule en el conductor.

La metodología de modelado en la ciencia del fuego, se divide en dos grandes ramas, el modelado físico y el modelado matemático; por su parte el modelado físico se subdivide en modelos a escala y modelos fuera de escala; mientras que el modelado matemático se

subdivide en modelos deterministas y modelos probabilistas. Recientemente se han utilizado mucho los modelos computacionales de fluido dinámico CFD (Computational Fluid Dynamics) (Cox & Kumar, 2002), los cuales proveen un formato para el modelado de incendios generales donde se utilizan tres principios elementales; el de conservación de la masa, la segunda ley de Newton, y el de conservación de la energía; expresados como ecuaciones matemáticas generalizadas en sus formas integrales o diferenciales parciales, las cuales son frecuentemente referidas como “ecuaciones de Navier-Stokes” (Beyler et al., 2008).

Para nuestro caso específico, utilizaremos un modelo matemático de tipo determinista o determinístico (Wikipedia, 2010), basado en ecuaciones físicas comprobadas, aplicadas a nuestra necesidad y modificadas teórica y experimentalmente de acuerdo a los resultados de nuestra investigación.

2. Resultados de la Investigación y Experimentación

A finales del siglo pasado, la ingeniería de protección contra incendios era desarrollada de forma muy empírica, dando como resultado que solo el 25% del desarrollo de ésta ingeniería tuviese una base en las ciencias fundamentales (Friedman, 1990). En el presente la investigación científica en la ingeniería de incendios se ha incrementado mucho; y nosotros proponemos un grano mas, al presentar el modelado del comportamiento térmico de los conductores, utilizando una forma de la ecuación diferencial de difusión de calor con generación interna; definida para determinar la transferencia de calor en cualquier volumen con generación interna de calor (Welty et al., 2001), la cual puede ser expresada como:

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [ec. 1]$$

Donde $\nabla^2 T$ es el Laplaciano de la temperatura.

$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ es la una característica definida llamada “difusividad térmica” que tiene dimensiones de [longitud²/tiempo]

ρ es la densidad del cuerpo con dimensiones de [masa/volumen]

C_p es el calor específico a presión constante con dimensiones de [energía/(masa-temperatura)].

k es la conductividad térmica con dimensiones de [energía/(tiempo-longitud-temperatura)]

g es la generación interna de calor relacionada a la energía interna del sistema, con dimensiones [energía/(tiempo-volumen)] ó [potencia/volumen], la cual es la única función que hay que definir desde el punto de vista eléctrico y donde ha repercutido el verdadero trabajo del modelado en nuestra investigación, pues es quien representa al conductor eléctrico.

La anterior ecuación ha sido utilizada en diversos campos de la ciencia y la ingeniería durante años; ahora proponemos aplicarla para la termoconducción de conductores eléctricos, definiendo para ella la fuente generadora de calor como la electricidad por efecto Joule en el conductor, expresada matemáticamente de una forma precisa, a través de nuestro modelo.

El efecto Joule se puede modelar de forma sencilla en un conductor óhmico ideal e isotrópico, al multiplicar el cuadrado de la corriente por la resistencia del conductor y por el tiempo que permanece la corriente fluyendo a través del conductor (Kraus & Carver, 1973). Recordemos que matemáticamente la energía disipada por este efecto en ésta clase de conductor es:

$$W = I^2 R \cdot t \quad [ec. 2]$$

donde W es la energía disipada, o sea aquella que se convierte en calor, y la anterior ecuación es denominada la *Ley de Joule*.

I es la corriente eléctrica en el conductor

R es la resistencia eléctrica del conductor

t es el tiempo que pasa mientras fluye la corriente a través del conductor.

En el caso de un conductor cualquiera con una resistencia no uniforme respecto al tiempo en el que el mismo es sometido al paso de la corriente (que es la mayor parte de los casos reales) podría expresarse la Ley de Joule como:

$$W = \int I^2 \cdot R \cdot dt. \quad [ec. 3]$$

y utilizando la ley de Ohm podemos expresar:

$$W = \int V \cdot I \cdot dt \quad [ec. 4]$$

El punto clave del modelo está entonces en definir de una forma real esta resistencia del conductor, directamente relacionada al “voltaje de pérdida” reflejado en el mismo, la cual no es constante a lo largo del conductor como se asume muchas veces, ni tampoco tiene una disposición de incremento linealizada. Comúnmente se asume un factor de incremento térmico constante, en una propiedad intrínseca del material conductor llamada “resistividad”, que es el inverso de una propiedad física llamada “conductividad” definida como la capacidad del material para conducir cargas libres (Reitz & Milford, 1967). La función de resistividad puede expresarse en función de la temperatura según la ecuación 5.

$$\rho_c = m \cdot (T - T_o) + \rho_{co} \quad [ec. 5]$$

Esta ecuación es aplicable a un evento general de conducción donde el rango de valores a estudiar esté muy lejano a cero en la escala térmica; por lo que referenciamos a un valor inicial, que llamamos ρ_{co} , que se da en un valor de temperatura $T_o \neq 0$, que generalmente es el valor de diseño o valor de referencia del elemento eléctrico estudiado. La figura 3 representa gráficamente la ecuación *ec 5*

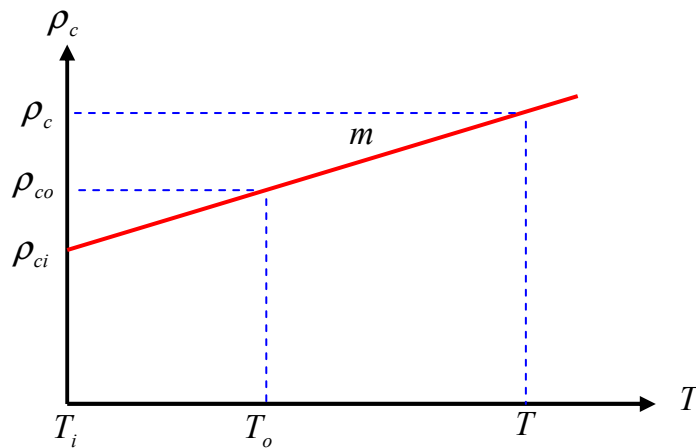


Fig. 3. Representación gráfica de una función ρ_c linealizada, y corregida para que la temperatura inicial sea cualquiera diferente de cero.

La definición de m , puede realizarse con base en evidencias físicas como:

$$m = \rho_{co} \cdot \alpha \quad [ec. 6]$$

donde α es la función característica de incremento térmico del material en unidades de $\frac{1}{^\circ C}$ ó $\frac{1}{^\circ F}$ ó $\frac{1}{^\circ K}$ ó $\frac{1}{^\circ R}$. y ρ_{co} ya se tiene tabulada por medio de la experimentación para muchos materiales (Sapiensman, 2010).

En nuestra investigación encontramos que la función α sólo puede modelarse como constante en pocos casos cuando las características del material así lo permiten, y eso es en un rango de valores muy controlado; pero de forma general debemos considerar que la misma función podría tener variaciones con la temperatura a la que es sometido el material, por lo cual debe ser una función dependiente de T , con lo que nuestra primera proposición de cambio es en ese sentido.

$$\rho_c = \rho_{co} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad [ec. 7]$$

Como paso siguiente realizamos una corrección a la definición clásica de la resistencia del conductor, adjuntando la anterior ecuación de la siguiente forma:

$$R = \frac{\rho_c \cdot L}{A_p} = \frac{\rho_{co} \cdot L}{A_p} \cdot \left[1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad [ec. 8]$$

Donde L es la longitud del conductor y A_p es la sección transversal del mismo.

Sin embargo el conductor puede cambiar sus propiedades de resistividad e incluso su sección transversal a lo largo de su desarrollo longitudinal, situación que modelamos y consideramos en nuestra investigación, y realizando el desarrollo matemático de las

condiciones modeladas, encontramos que un elemento diferencial de conductor puede modelarse como:

$$dR = \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p} \cdot dl + \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p} \cdot \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \cdot dl \quad [ec. 9]$$

Donde puede reemplazarse a A_p por una función de corrección $A_p \cdot \text{función_de_corrección} = A_{p(L)}$ que se escriba en función de las variaciones de sección del conductor a lo largo de su longitud, con lo que la resistencia del conductor tendrá una parte totalmente en función de la temperatura de diseño (o de referencia) T_0 y una parte en función de los incrementos térmicos y la longitud, ésta última será la variación por temperatura real de la resistencia del conductor presentada por la ecuación *ec 10*.

$$R_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + R_{(T_0,L)} f_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + \Delta R_{(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad [ec. 10]$$

Al combinarse las ecuaciones *ec 3*, *ec 10* y la ecuación general de potencia instantánea real disipada en el conductor que presentamos como:

$$P_c = \frac{dW}{dt} \quad [ec. 11]$$

Se desarrolla obteniendo:

$$P_{c(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2_{(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad [ec. 12]$$

Donde ρ_{co} es la resistividad del material a la temperatura de referencia T_0 (por lo general la temperatura de diseño del conductor) y en función también de la longitud L que tenga el conductor (solo si hay cambios en el material).

$\alpha_{(T,L)}$ es la función de incremento térmico en función de la temperatura y longitud del conductor.

$I_{(T,L)}$ es la función de corriente que pasa a través del conductor, en función de la temperatura y la longitud del conductor (pues se puede inyectar o sacar corriente a lo largo del mismo).

$A_{p(L)}$ es el área transversal del conductor a cada punto de la longitud L
 T_0 es la temperatura de referencia o temperatura de diseño del conductor.

T es la temperatura a la que realmente se encuentra el ambiente del conductor, bajo las condiciones reales.

L , dl representan la longitud del conductor y se consideran posibles cambios de características a lo largo de la misma.

La anterior ecuación *ec 12* es la base de nuestro modelo, y nos da la potencia disipada con una precisión muy alta, por unidad de área transversal del conductor. Al ser probada experimentalmente, la diferencia entre los valores predichos por el modelo respecto de los medidos fueron inferiores al 0.1% en las zonas de mayor disipación (cuando hay peligros de incendio por calentamiento).

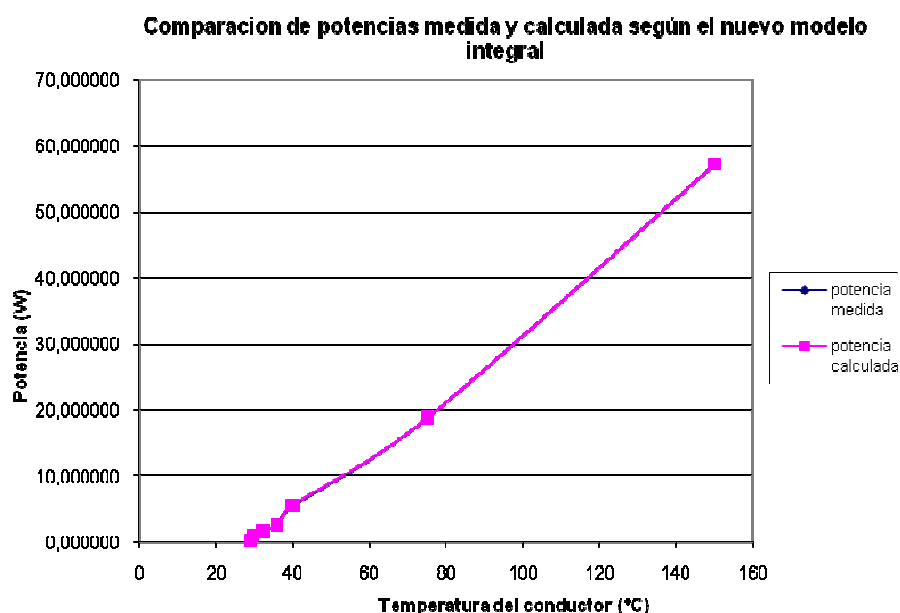


Fig. 4. Muestra la comparación entre las potencias medidas y calculadas según el modelo integral presentado por en 4 pies de conductor 24 AWG. Obsérvese que la potencia calculada está en todo momento casi perfectamente sobre la línea descrita por las mediciones experimentales. A los 150 ° el cable comenzó a quemar su propio aislante, disipando más de 55 watts usando fuente DC, por cada 4 pies de cable.

El experimento preliminar que diseñamos tiene como base un circuito muy sencillo, mostrado en la imagen 5, y con lo cual se probó el comportamiento de algunos cables comerciales, conectados en serie con los elementos limitadores de corriente (resistores de potencia y potenciómetro) y con una fuente de energía eléctrica. El protocolo de experimentación consistió en dar diferentes niveles de resistencia predeterminados para cada prueba, utilizando los resistores y potenciómetro; a fin de ver lo que sucedía con los voltajes, corrientes y temperaturas en el cable y sus alrededores, bajo diferentes condiciones de carga predeterminadas, incrementando la misma hasta llevar el cable a la falla de su aislante. El voltaje de pérdida en el cable se midió con un medidor eléctrico de alta precisión en las terminales del conductor; la medida de corriente se tomó con otro medidor conectado antes del regreso de la fuente, y se utilizó una moderna cámara termográfica Flir i-60 que registró en tiempo real las temperaturas del conductor en los diferentes estados.

El ambiente externo al cable fue controlado a 29°C y humedad relativa 50-60%. Para seleccionar cada anotación de temperatura se dejó que el conductor estuviese bajo la condición de carga prediseñada para cada medición por lo menos por medio minuto a forma de ver que se tomara una medida cercana al estado estable de cada condición. Por medio de los datos recopilados se pudo medir la pérdida de potencia instantánea en el cable bajo cada condición de carga, y verificar el calentamiento real del mismo, el cual no fue lineal y dio prueba de las variaciones de su resistividad.

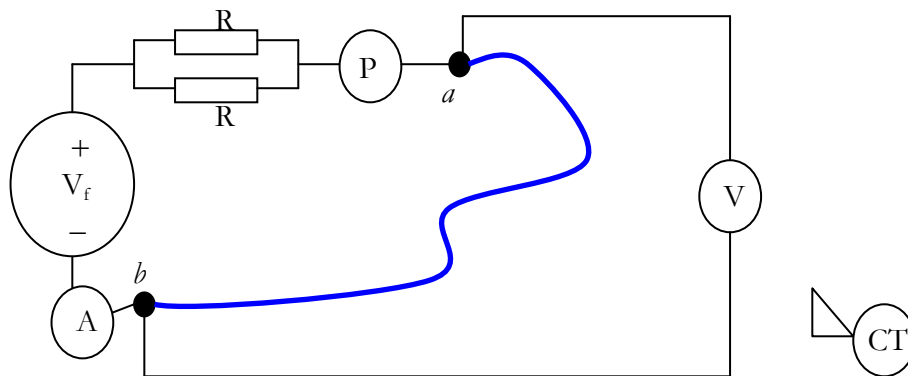


Fig. 5. Representación gráfica del circuito de pruebas experimentales. El conductor a probar se encuentra entre los terminales *a* y *b*. Las simbologías utilizadas representan:

- R: resistores de alta potencia en la configuración requerida para cada caso.
- P: potenciómetro de alta potencia.
- V: medidor de voltaje de alta precisión.
- A: medidor de corriente de alta precisión.
- V_f: fuente de energía eléctrica de alta amperidad.
- CT: cámara termográfica de última generación.

Sumado a esto y llegando un poco mas lejos, con el simple hecho de dividir la ecuación de potencia presentada por la longitud del conductor, tendríamos una ecuación de generación de potencia eléctrica convertida a calor por unidad de volumen, que es precisamente lo que necesitamos para definir la *g* de la ecuación *ec 1*, con lo cual quedaría propuesta como se indica en la ecuación *ec 13*.

$$g = \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2(T_0,L)}{A_{p(L)}} + \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2(T,L)}{A_{p(L)}} \cdot dT \quad [ec 13]$$

3. Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

La necesidad de modelar en ingeniería de incendios es parte del trabajo diario del profesional que se desarrolla de forma seria en ésta ciencia; ya que aún hoy se tienen muchas incógnitas para la comprensión de los diferentes tipos de incendios, y la forma mas conveniente de encontrar respuestas a las mismas, es por medio de la investigación científica y en una gran parte de aplicaciones esa investigación debe ser por medio del modelado; pues es muy difícil, peligroso y costoso realizar experimentación destructiva en múltiples eventos para recopilar información, por lo que la información experimental que se recopila, es en base a pocos experimentos controlados, de los cuales se extrae la mayor cantidad de información medible posible, y de allí en adelante se modela. Luego estos modelos se aplican a eventos reales a escala, y se observa la similitud de las predicciones.

A futuro en nuestra investigación, tenemos la intención de experimentar con una mayor cantidad y variedad de conductores, para ajustar aún más la precisión de las ecuaciones y hacerlas prácticas, realizando versiones mas sencillas de las mismas que puedan despreciar condiciones no necesarias en algún caso, de forma que puedan ser utilizadas de manera práctica para el diseño de protección contra incendios y el diseño eléctrico de los sistemas en la edificación.

Para ello considero necesario primeramente contar con una localidad segura, a prueba de fuego, arcos eléctricos y con ambiente controlado, donde se puedan hacer pruebas destructivas de cables eléctricos comerciales que requieren del manejo de altos amperajes, pues mientras mas grueso es el conductor a probar, mayores cargas y mayores riesgos representa, sumado a fuentes eléctricas mas costosas, que son las que suministrarán las cargas de la prueba.

Esta clase de estudios son los que pueden llevar a determinar mejoras en el uso y aplicaciones de los diferentes sistemas de conducción de potencia eléctrica para nuevos diseños e instalaciones, y pueden incluso dar fundamento científico a investigaciones de incendios eléctricos relacionados con el cableado y sistemas de conducción de potencia eléctrica en las instalaciones actuales.

REFERENCIAS

Babrauskas V. (2007). “Ignition: A Century of Research and an Assessment of Our Current Status”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol 17, N° 3 (), pp 165-183, doi: 10.1177/1042391507059434.

Blázquez A. (2005). “Innovación en Construcción: Teoría, Situación, Perspectivas y otras consideraciones”, *Informes de la Construcción*, Vol 57, pp 111-132, doi: 10.3989/ic.v57.i499-500.487.

Beyler C.L., DiNemo P.J., Carpenter D.J. et al. (2008). “Introduction to Fire Modeling”, *Fire Protection Handbook*, 20th Edition, National Fire Protection Association, Quincy Massachusetts, pp 3-93 a 3-105.

Cote A. & Percy B. (1993). *Principios de Protección Contra Incendios*, p. 45, NFPA y CEPREVEN, España.

Cox G. & Kumar S. (2002). “Modeling Enclosure Fires Using CFD”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd edition, Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, pp 3-194 3-218.

Drysdale D. (1985). *An Introduction to Fire Dynamics*, pp 197, John Wiley & Sons, Chichester-NewYork-Brisbane-Toronto-Singapore.

Faulconer JoAnn & Faulconer Mike; *The HomeTeam Inspection Service* [en línea] URL: <http://www.kansascity-homeinspections.com/home-owners-2.html> [consulta: 8 de abril de 2010].

Friedman, R. (1990). “Fire Protection Engineering - Science or Art?”; *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol 2, N° 1, pp 25-32, doi: 10.1177/104239159000200103.

Friedman R. (1991). “Teoría de la Extinción del Fuego”, *Manual de Protección Contra Incendios*, 17va edición, MAFPRE, National Fire Protection Association, España, pp 1-81 1-91 / 81 - 91.

General Electric. Industrial; [en línea] URL: <http://www.geindustrial.com/products/manuals/GEH-6273E.pdf> [consulta: 15 de marzo de 2010].

Hall John R. Jr. & Cote Arthur E. (2008). “An Overview of the Fire Problem and Fire Protection”. *Fire Protection Handbook*, 20th Edition, National Fire Protection Association, Quincy Massachusetts, pp 3-14 a 3-15.

Kanury A. M. (2002). “Ignition of Liquid Fuels”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd edition, Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, pp 2-188 2-199.

Kraus J.D. & Carver K.R. (1973). *Electromagnetics*, pp 112-113, McGraw-Hill & Kogakusha LTD, Tokyo and other cities.

Lecuona A., Izquierdo M. & Rodríguez P., (2005). “Investigación e Impacto Ambiental de los Edificios. La Energía”; *Informes de la Construcción*, Vol. 57, N° 498, pp 47-61, doi: 10.3989/ic.2005.v57.i498.477.

Milatovich R. M. (2008). “Electrical Systems and Appliances”, *Fire Protection Handbook*, 20th Edition, National Fire Protection Association, Quincy Massachusetts, pp 8-127 8-173.

Mowrer F. W. (2007). “Thermal Response to Fire of Insulated Cylindrical Steel Elements”, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol 17, N° 2, pp 129-143, doi: 10.1177/1042391506069337.

Reitz J. & Milford F. J. (1967). *Foundations of Electromagnetic Theory*, pp. 127-130, Addison Wesley Publishing Company, Massachusetts & other cities.

Ryan R.W. & Chubb M. (1991). “Riesgos en las Instalaciones de los Edificios”, *Manual de Protección Contra Incendios*, 17va edición, MAFPRE, National Fire Protection Association, España, pp 6-179 6-190 / 1273 - 1284.

Sapiensman [en línea] URL: <http://www.sapiensman.com/electrotecnia/electrotecnia1.htm> [consulta: 7 abril 2010].

Simmons R.F. (2002). “Premixed Burning”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd edition, Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, pp 1-144 1-154.



Welty J.R., Wicks C.E. & Wilson R.E. (2001). *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*, pp. 304 – 396, Limusa – Wiley, México.

Wikipedia; [en línea] URL:

http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_determin%C3%ADstico [consulta 25 de abril de 2010].

Recibido abril de 2010, aceptado octubre de 2010.

ANEXO 5

(Artículo en revisión por la revista científica indexada)

**EL RECALENTAMIENTO ELECTRICO TERMOCONDUCTIVO
EN LAS EDIFICACIONES. UNA FUENTE POTENCIAL PARA
LA GENERACIÓN DE INCENDIOS.**
***THE THERMAL-CONDUCTIVE ELECTRICAL OVERHEATING IN THE
BUILDINGS. A POTENTIAL SOURCE FOR GENERATION OF FIRES.***

**Dorindo Elam Cárdenas Estrada^{ab*}, Santos Gracia Villar^{cc}, Federico Fernández^c,
Luis Alonso Dzul López^{de}, Roberto Marcelo Alvarez^{de}**

^aIngeniería Atlántico, S.A. Calle Hignio Arauz Cl 2da Pueblo Nuevo y 12 de Octubre, Panamá. ^bUniversidad Tecnológica de Panamá; Ave Universidad Tecnológica, Campus Victor Levi Sasso, Panamá.

^cDepartamento de Proyectos de Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Diagonal 647, Planta 10, 08028 Barcelona, España.

^dUniversidad Internacional Iberoamericana. Ave. José A. Cedeño, #521, Arecibo, Puerto Rico 00612.

^eFundación Universitaria Iberoamericana. Paseo García Faria 29, 08005 Barcelona, España.

*Telf (507) 66.77.12.24 / (507) 261.35.36. e-mail: dcardenas@i-atlantico.com / de.cardenas@hotmail.com

RESUMEN

El presente artículo recopila los comportamientos reales observados luego de cuatro años de investigación, experimentación y modelado, con conductores eléctricos sobrecargados y llevados a su punto de falla por alta conducción térmica, con el fin de rendir un aporte que pueda sumarse a las normativas existentes para la selección del cableado de proyectos eléctricos en baja tensión. Cuando se consideran factores como la intensidad de corriente, el tipo de instalación, la temperatura ambiental, fuentes cercanas generadoras de calor, condiciones de sobrecarga, y la sección transversal efectiva de conducción luego de considerar el efecto piel y los giros del cable, puede verse que la selección del conductor adecuado es una decisión difícil. Estos factores, son considerados y estudiados separadamente tanto en normas españolas como internacionales; donde se dan procesos de selección de cableado, despreciando ciertas condiciones que a veces son importantes causas de falla. El modelo presentado, es el resultado de un análisis global que tomó en cuenta todos los factores simultáneamente; y se provee una herramienta matemática muy poderosa para la simulación de comportamientos reales, en investigaciones de incendios eléctricos relacionados con conductores.

Palabras clave: corriente eléctrica, conductor eléctrico, resistividad, disipación de potencia, modelo matemático.

ABSTRACT

The present article exposes the actual behaviors observed after four years of investigation, experimentation and modeling, with electrical conductors overloaded and tested to their point of fault by high thermal conduction, with the principal purpose of

producing a contribution that could be added to the existing regulations for the selection of wiring of electrical projects in low voltage. When we consider factors like the intensity of current, type of installation, environmental temperature, heat sources nearby conductors, conditions of overload, and the transverse effective section of conduction after consider skin effect and turns of cable, you can see that the selection of a suitable conductor becomes a difficult decision. All these factors are considered and studied separately in Spanish norms as in international norms; despising in many cases some conditions that may be important cause of fault. Present model is result of a global analysis that takes care of all these factors simultaneously, and provides a very powerful mathematical tool for simulation of actual behaviors for investigations of electrical fires related to conductors.

Key words: electric current, electric conductor, resistivity, power dissipation, mathematical model.

1. Introducción

Los cables eléctricos en las edificaciones, aunque son los que transportan energía en los niveles de tensión más bajos de la red de potencia eléctrica, son los que han estado relacionados históricamente, con la mayor cantidad de casos de incendios eléctricos con fatalidades. En España, la Plataforma para la Revisión de Instalaciones Eléctricas (PRIE, 2010), reporta 7,300 incendios anuales de causa eléctrica; mientras que otras fuentes hablan hasta de 10,300 (Hellín, 2009). En Japón, Y. Hagimoto indica un promedio de 3,000 incendios de causas eléctricas anuales (Hagimoto, 1992). Estados Unidos, tiene cifras aún más alarmantes; según Hall y Cote, hay en promedio 45,700 incendios estructurales anuales, sin contar los incendios en hogares, los cuales son 32,400 incendios anuales adicionales; todos por el sistema de distribución eléctrica o iluminación de las edificaciones (Hall y Cote, 2008).

Nuestra investigación se enfoca en eventos reales donde el origen del incendio no ha sido otro que el mismo conductor eléctrico que falla en alguna sección limpia, sin conexiones, ni elementos receptores en cortocircuito. El objetivo principal es proporcionar un método para estudiar las causas de éste tipo de eventos, que en su mayor parte se dan en conductores de alta carga y difícil disipación de calor, como las acometidas de edificaciones, o líneas generales de alimentación.

Los niveles de calentamiento por conducción de corriente, fenómeno que de aquí en adelante llamaremos *termoconducción*, no se dan de forma lineal, como plantean las ecuaciones clásicas, y como se obtiene de experiencias controladas de laboratorio. En situaciones reales, el almacenamiento de calor, las distorsiones en la forma de la onda, las variaciones medioambientales, las afecciones a la sección del conductor por dobleces, golpes, etc., pueden crear circunstancias temporales que no son consideradas por los diseños actuales, pero causan fallas en conductores, que no se ajustan a ninguna de las fallas eléctricas clásicas.

La determinación de la cantidad de energía perdida al momento de la falla es crítica, y no depende solo del conductor, sino también de sus condiciones de operación y posibilidades de disipación, lo que es muchas veces más determinante que su voltaje y corriente para decidir si el conductor opera o no en un nivel técnicamente adecuado, y conocer si la falla es por defecto mecánico, de fabricación, golpes, o una condición ambiental inadecuada, ya que se producen concentraciones de calor (Ryan y Chubb, 1991).

Hasta ahora no se conoce de investigaciones, normas, ni ensayos de este tipo, solo investigaciones experimentales para determinar la posibilidad de que el conductor haya pasado por un arco. La normativa española tiene modelos con aplicaciones bastante

específicas, pero en la práctica, hay muchas instalaciones que no se ajustan a estas normas. Los fabricantes por su lado han desarrollado cables muy especializados, realizando modelos de laboratorio donde las condiciones de prueba son totalmente ideales, y no pueden ser utilizados para verificar su funcionamiento en eventos reales. Las investigaciones anteriores, dan por hecho que el arco eléctrico es la causa inicial que conduce al incendio eléctrico, despreciando la posibilidad de que una alta termoconducción podría preceder al arco, e incluso ignitar algún material sin necesidad del arco.

2. Material y métodos utilizados.

Luego de revisar casos reales de incendios en conductores con alta intensidad de corriente y difícil disipación de calor, identificamos varios factores comunes, sometiendo los más importantes a pruebas controladas, comparando los resultados con los incendios reales.

La mayoría de los incendios eléctricos, tienen como origen conexiones defectuosas que puedan crear puntos calientes, los cuales surgen cuando se aflojan las conexiones por vibraciones, fatiga y el paso del tiempo, que da lugar a corrosión, creando un aumento puntual en la resistencia, y por ende un aumento en la caída de potencial en ese punto, propiciando la generación de calor (Vergara, 2006).

Cuando la causa es un receptor en cortocircuito, el conductor eléctrico es afectado por el calor y la alta intensidad de corriente de forma homogénea en todo su recorrido, muchas veces carbonizando todo el aislante. La mayoría de los métodos investigativos consisten en la detección de alguna de éstas anomalías.

Sin embargo, existe un tipo de falla puntual, donde se ha verificado por peritaje técnico, que en el momento de falla no existe ningún corto circuito o malas conexiones en partes eléctricas terminales que éstos alimenten, la falla es propia del conductor, con fundiciones puntuales en secciones limpias, en las que la instalación parece no tener nada que ver; y que a primera vista pareciera ser algún defecto de fabricación.

Las acometidas eléctricas de las edificaciones, y líneas generales de alimentación, son lugares ideales para encontrar conductores de alta intensidad y difícil disipación térmica, y es precisamente en éstos lugares, donde encontramos más incidencia de éste tipo de falla.



Figura 1

Figura 1: Muestra los cables fundidos de una de las acometidas de un rascacielos, los cuales viajaban dando un giro de 90° hasta conectarse a la caja general de protección.

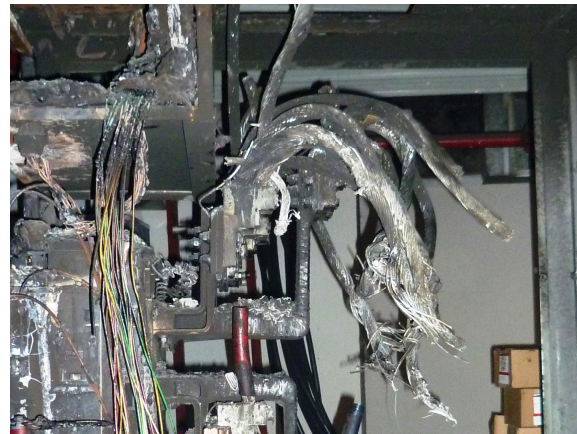


Figura 2

Figura 2: Muestra los mismos cables de la figura uno, pero el pedazo que quedó pegado a los terminales la caja general de protección.

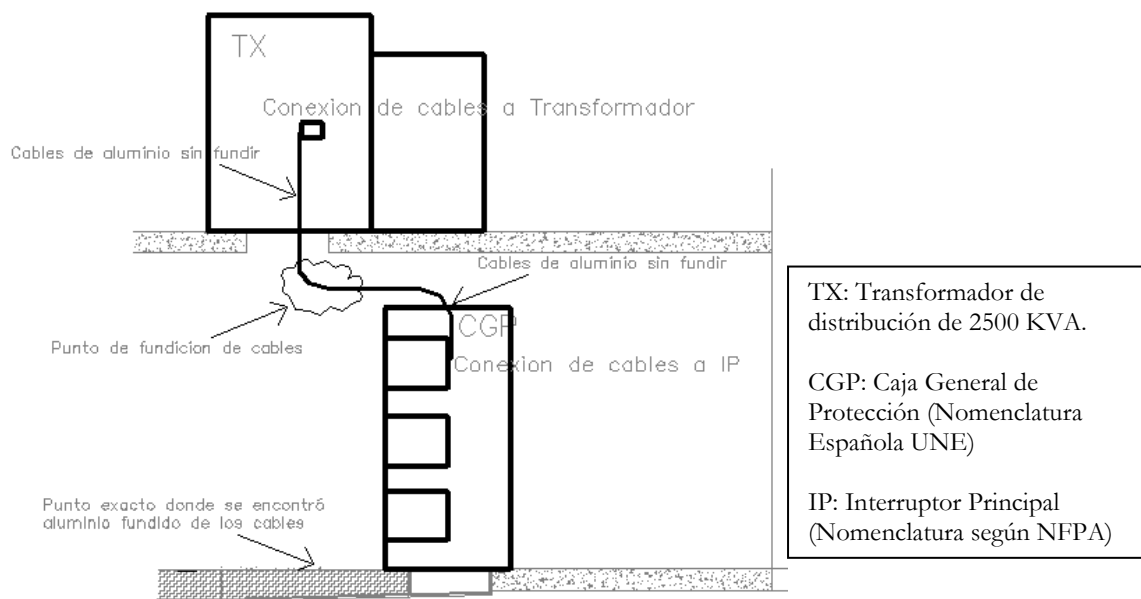


Figura 3: Muestra el esquema de conexiones del caso presentado en las figuras 1 y 2.

La característica más visible de esta falla, es que es puntual, tal como se aprecia en las figuras 1 y 2. El esquema de la figura 3, muestra que los cables de la acometida bajaban un nivel y hacían un ángulo de 90° para recorrer horizontalmente hasta el primer elemento de protección; denominado en España “Caja General de Protección” (CGP), según las normas UNE (UNE 20460); o “Interruptor Principal” (IP) según el NFPA 70.

Pueden verse los conductores fundidos haciendo un corte limpio y recto a mitad de su recorrido entre el transformador (TX) y la CGP (IP). El corte se dio justo donde estaba el giro de 90°, y el cable delante y detrás de éste punto, no fue fundido e incluso buena parte del aislamiento se conservó intacta.

3. Revisión las normativas actuales para el cableado de baja tensión y sus cambios.

Tanto en España como en Estados Unidos, hay estudios indicando que muchas de las fallas en los conductores se deben a secciones insuficientes. Toledano, De Las Casas y Bedoya indican que la sección insuficiente en los cables es uno de los tres defectos mas comunes encontrados en las acometidas de las instalaciones eléctricas de enlace existentes, y este error es también uno de los defectos mas comunes en las líneas generales de alimentación y puestas a tierra (Toledano, De Las Casas y Bedoya, 2009).

La normativa eléctrica española ha prestado mucha atención a las condiciones reales de instalación en baja tensión, y se han reemplazado normas antiguas, basándose en resultados de nuevas investigaciones. Hay nuevos criterios para intensidades admisibles, que consideran aproximaciones más reales de las condiciones de operación de los cables, se reemplazó la tabla 1 de la ITC-BT 19 para la selección de cables, por la norma UNE 20460-5-523 de noviembre del 2004, como resultado de la adaptación del Documento de Armonización del CENELEC HD-384 a las condiciones de España, lo que también corresponde con la recomendación del Comité Electrotécnico Internacional IEC 364 (FACEL, 2010), donde se recogen esquemas de condiciones reales de instalación llamados “modos de instalación e instalaciones tipo”, y consideran una gran cantidad de condiciones de instalación, encerramiento, enterramiento, tipo de fijación, etc. para luego ser llevados a

una comparación con alguno de ocho “métodos de referencia para instalación” de la norma, los cuales son intrínsecamente simulaciones físico-matemáticas resumidas en tablas, aproximándose a condiciones reales de operación.

NFPA también ha desarrollado inclusiones y correcciones a su norma eléctrica, el NFPA-70, pero no con tanto detalle de las condiciones reales de trabajo como en la normativa española. Al momento de escribir esto, rige en Estados Unidos la NFPA-70 del 2008; pero ya se está revisando la del 2011. La mayoría de los países que utilizan NFPA aparte de Estados Unidos, tienen en rigor revisiones anteriores a las del 2008, por efecto más que todo de traducciones y adaptaciones a la condición de cada país.

Con la revisión de la norma en España, se determinó que las secciones de conductor que antes se consideraban correctas, realmente pueden presentar severos problemas al instalarse en condiciones de encerramiento, aparte de la nueva tabla de intensidades permisibles, se verifican las tablas de los factores de corrección por temperaturas del ambiente y terreno, y se cambian dramáticamente las consideraciones sobre resistividad del terreno. Anterior a la revisión, en España era común hablar de resistividades de terreno de $1\text{ }^{\circ}\text{K.m/W}$, valor que cambió dramáticamente a $2.5\text{ }^{\circ}\text{K.m/W}$ según la nueva norma UNE 20460-5-523 (nov-04), con esto las intensidades admisibles de cables enterrados se redujeron aproximadamente en un 40%.

En lo que si son congruentes las normativas UNE y NFPA, es en el criterio de ampacidad límite del cable versus la temperatura a la que el mismo se encuentre; lo cual es la base de cálculo de casi todas las demás condiciones especiales desarrolladas. Ambas normativas muestran ecuaciones y tablas técnicas de reducción de ampacidad por incremento térmico similares. La única diferencia apreciable entre ambas normas, son las unidades de medida que manejan, ya que NFPA maneja una combinación de unidades de medida tradicionales de Estados Unidos más algunas del Sistema Internacional, y las normas UNE se ajustan al Sistema Internacional de Unidades de Medida. La figura 4 muestra una comparación del comportamiento de los factores de corrección por temperatura para la ampacidad permisible del cableado termoplástico, en las normas NFPA-70 y UNE 20460-5-523.

Ambas normas también son congruentes al relacionar los tipos de cables y sus tecnologías de acuerdo a su comportamiento respecto de las altas temperaturas, y los límites de calor por termoconducción que soporten sus aislamientos. Tanto la norma UNE 260-5-523, como la NFPA-70; establecen dos grandes grupos de cables; los termoplásticos y los termoestables, a los cuales NFPA llama “thermoplastic” y “themoset” respectivamente (Earley, Sheehan y Caloggero, 1999). Los primeros son cables de uso corriente con temperaturas de operación medias cuyo aislamiento se debilita físicamente con la temperatura, y los segundos son cables cuyos aislamientos resisten mayores temperaturas de operación y mantienen su firmeza con el aumento térmico.

En ambas normas, el tipo de cableado adecuado para las locaciones con condiciones de alta carga y temperatura, son los cables termoestables; sin embargo es común encontrar instalaciones de éste tipo, con cableado termoplástico. Para ambas normas, los cables termoestables deben tener temperatura de servicio hasta 90°C . La única diferencia entre las normas; es que UNE requiere que los cables termoplásticos tengan temperatura de servicio hasta 70°C , mientras que NFPA requiere que sea hasta 75°C ; pero la principal causa de fallas en ambas normas, no son 5°C de diferencia, sino la utilización de un cable termoplástico, donde debe estar uno termoestable.

Factor de Corrección NFPA

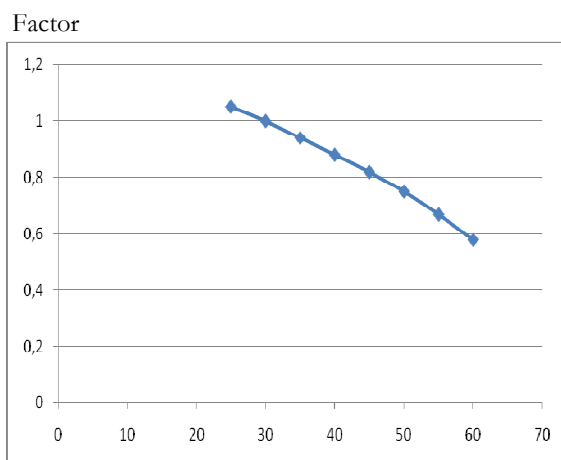


Figura 4.a. Temperatura en °C

Factor de Corrección UNE

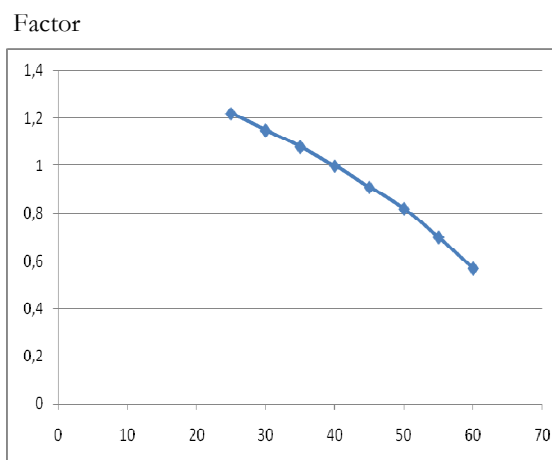


Figura 4.b. Temperatura en °C

Fig. 4.a. y 4.b. Comparan las similitudes que hay entre los resultados de aplicar las ecuaciones de corrección de ampacidad por la temperatura en el cable según la NFPA-70 (fig 4.a.), y la UNE 20-460-523 (fig 4.b.), ambas para sus respectivos cables termoplásticos. Véase que la temperatura de referencia de NFPA es 30°, mientras que la de UNE es 40°.

4. Las tecnologías actuales en los cables de baja tensión.

En España hay muchas designaciones de cables y muchos ingenieros optan por utilizar “guías de cables” dadas por fabricantes, donde resumen las normativas de aplicación y las características de cada tipo de cableado. Tradicionalmente se hacen los aislamientos de cables termoplásticos a base de PVC (policloruro de vinilo), poliolefinas Z1, o materiales con comportamiento similar, que según norma deben soportar 70°C en régimen permanente y 160°C en cortocircuito; y los cables termoestables deben tener comportamientos térmicos como el del tipo XLPE (polietileno reticulado), poliolefinas Z, EPR (etileno propileno), o siliconas; que soportan 90°C en régimen permanente y 250°C en cortocircuito.

Las poliolefinas Z1 respondieron a la necesidad de tener un cable termoplástico con características no propagadoras de incendio, y con emisión de humos y opacidad reducida. Por parte de los cables termoestables, un aislamiento ya conocido en España es el de goma silicona, designado por el símbolo “S” según la norma UNE 20434, el cual tiene propiedades termoestables y adicionalmente tiene comportamientos de resistencia al fuego según IEC-332-1 e IEC-331; y baja corrosividad de los gases emitidos según IEC-754-2.

Mas allá de eso, hay cables de alta seguridad, designados por UNE como “AS”, cuya diferencia primaria con los cables de PVC es la ausencia del gas ácido halógeno (HCl), que emana cuando se queman, por lo que se les conoció tradicionalmente como “libres de halógenos”; sin embargo, eso no es suficiente; para cumplir realmente como AS, pues la norma indica que deben cumplir adicionalmente con los requerimientos de los ensayos UNE EN 50265-2-1 para no propagación de la llama; UNE EN 50266-2-4 para no propagación del incendio; UNE EN 50267 para baja corrosividad de gases y UNE EN 50268 para baja emisión de humos.

Se tiene también la designación “AS+”, que son cables que cumplen con lo requerido por los AS, y adicionalmente tienen capacidad de brindar el servicio durante e

incluso después del incendio, conforme a lo normado en UNE EN 50200. Estos cables se usan para servicios de seguridad no autónomos o servicios con fuentes autónomas centralizadas. Bajo lo estipulado en la norma, este tipo de cable debe ser capaz de soportar incendios de 842°C durante 90 minutos, y por ahora no tiene similares comerciales en el mundo.

En Estados Unidos existe una gran cantidad de cables dependiendo de la aplicación. Algunas tecnologías muy utilizadas actualmente, son el termoplástico resistente al calor (THHN), termoplástico resistente a calor y humedad (THHW y THWN); y la tecnología termoestable con polietileno de enlace cruzado (XHHW) (Milatovich, 2008). Los conductores para servicio de entrada deben tener una designación especial, indicada como “SE” (McParland, 1995), y su tecnología debe ser termoestable.

5. Resultados de la experimentación e investigación científica.

Como primer acercamiento al análisis de falla del conductor en un incendio, se pueden diferenciar 2 tipos de fundiciones básicas en los cables; la primera es aquella causada por el calor que rodea el cable llegando a su temperatura de fusión; y la segunda, aquella causada por un arco eléctrico en el cable.

La NFPA ha desarrollado investigaciones con incendios controlados en conductores eléctricos, donde han encontrado formas de diferenciar claramente en los restos de conductores fundidos, si la causa de la fundición fue el calor que afectó al cable (termoconducción), o un arco eléctrico en el cable. La termoconducción en el cable puede darse por dos fuentes de calor; la más estudiada, es el fuego que rodea el cable y lo calienta en el momento del incendio (cable víctima del incendio); pero también puede darse por la resistividad del mismo cable al conducir una sobrecarga de corriente.

Cuando la fundición es por fuego externo, la superficie del conductor tiende a hacerse lisa; y en el caso del cobre, cuando se vuelve a solidificar puede formar glóbulos de forma irregular y distintos tamaños, los cuales frecuentemente pueden tener puntas, y no hay una demarcación visible entre la superficie fundida y la no fundida del conductor. Cuando la fundición es por arco, se funde en zonas puntuales del conductor, justo donde se origina el arco, y normalmente es un área pequeña de conductor; y se puede diferenciar una línea muy marcada entre la superficie fundida y no fundida de conductor. (NFPA 921, 2008).

Con base en éstas referencias, se han guiado peritajes de incendios reales, como el expuesto por la figura 3, donde por el tipo de fundición se determinó que el cable sufrió un arco eléctrico en ese punto.

Esto no asegura que el arco eléctrico ha sido la causa del incendio, pero indica la existencia del arco. Para poder indicar si el arco es la causa, faltaría demostrar que el mismo fue el primer evento de liberación de calor descontrolada en el área del incendio, lo que implícitamente indicaría un fallo puntual en el aislamiento del conductor, que habría entonces que investigar; pero la mayoría de los investigadores han decidido identificar a priori, los conductores con muestras de arco como de “causa”, y a los que no muestran señales de arco como “víctimas” del incendio.



Figura 5.a.

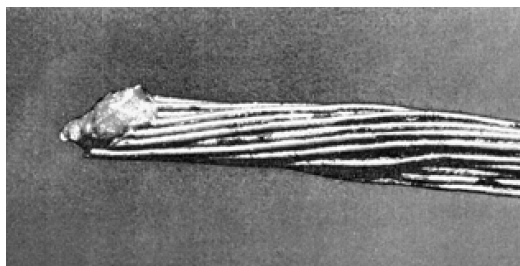


Figura 5.b.

Fig. 5.a. y 5.b. Se ven los efectos de fundición en un conductor de cobre por causa de fuego externo (fig 5.a) y por arco eléctrico (fig 5.b), según clasificación de la investigación de NFPA (NFPA 921).

Otros investigadores han enfocado sus trabajos en análisis químicos de las gotas de material fundido que quedan en los conductores luego del incendio (beads). MacCleary y Thaman, indican en su investigación que un análisis químico por espectroscopía electrónica de Auger (AES), puede revelar si las gotas son de “causa” o son “víctimas” del fuego, valiéndose de la concentración de oxígeno de las mismas (MacCleary y Thaman, 1980). Su hipótesis se basó en que el material “causa” se encuentra en una atmósfera rica en oxígeno, mientras que el material “víctima” estará en medio del fuego desinhibido, en una atmósfera pobre en oxígeno, por lo que el oxígeno atrapado en ellas será menor.

Por otro lado, investigadores japoneses en investigaciones similares, concluyeron algo totalmente contrario; utilizando un espectrómetro de masas de iones secundarios (SIMS), encontraron que la concentración de oxígeno en las gotas “causa” es menor que la de las gotas “víctimas”; y su hipótesis fue que las gotas víctimas están en un ambiente mucho más caliente que las gotas causa, lo que ayuda a la difusión del oxígeno dentro de las mismas. (Satoh et al, 1998).

Otras investigaciones se han encaminado a determinar la existencia de material carbonizado incrustado en las gotas fundidas del conductor, que en primera instancia viene del aislamiento, pero no se han establecido parámetros que ayuden identificar de forma fiable al material causa, pues las identificaciones acertadas no superan el 60% de los casos (Lee et al, 2002).

El Departamento de Bomberos de Tokio, utilizando análisis metalúrgicos con microscopio de escaneo electrónico, ha dirigido investigaciones donde establecen diferencias entre materiales causa y víctima por la forma de los “huecos” en la estructura metalúrgica de las gotas; e indican que los huecos en las gotas “causa” son más pequeños y superficiales que los de las gotas “víctimas” del fuego (Tokio Fire Department, 1992). Aparte de eso, Miyoshi en sus experiencias encontró que la cantidad de huecos es mucho más abundante en el material víctima que en el material causa (Miyoshi, 2000).

Sin embargo, contrario a lo estipulado por Miyoshi y Departamento de Bomberos de Tokio; los investigadores Ishibashi y Kishida concluyeron en su trabajo, que estos huecos son más abundantes en el material causa que en el víctima (Ishibashi y Kishida, 1990). Erlandsson y Strand por su parte, al estudiar secciones transversales de las gotas fundidas con distintas metodologías, concluyen que en una atmósfera con aire, las gotas de material fundido muestran muchos huecos, pero aquellas gotas resultantes de la fundición del cobre por una sobrecorriente, no presentan huecos. (Erlandsson y Strand, 1985)

Ninguna de las investigaciones mencionadas incluye un material diferente del cobre, y ninguna incluye ni siquiera hipotéticamente la posibilidad de que la causa inicial del incendio sea una alta termoconducción en el cable, que puede existir antes del arco debilitando el aislante y propiciando el arco.

Tampoco hay registros de investigaciones donde se analice la hipótesis de un conductor eléctrico que al estar recalentado haga que algún otro material combustible

llegue a su punto de ignición. Por lo general estas causas de incendio permanecen ocultas y muchas se confunden con investigaciones de autoignición de materiales.

En nuestra investigación, el único método que validamos para determinar la existencia de arco eléctrico fue el dado por NFPA 921. Adicionalmente analizamos el comportamiento térmico de conductores termoplásticos, sometiendo muestras a corrientes controladas, donde medimos simultáneamente el voltaje que reflejó el conductor, la corriente que paso, la potencia que se perdió y se termografió el conductor para ver su temperatura, aumentando la carga desde niveles de operación normal, sobrecarga y hasta quemar el aislamiento.

Los resultados de nuestra experiencia fueron comparados con el modelo de Joule, para el calentamiento de conductores, encontrando errores porcentuales de potencia disipada adicional real versus la calculada aproximada de hasta 10% en niveles de operación a media carga; y hasta 20% cuando el conductor es llevado a su temperatura máxima operación normada. Luego se llevo el conductor hasta el punto de falla de su aislante (150° C aproximadamente) y el error porcentual fue de más del 50%, con temperatura ambiental de 29°C.

Tanto las normas UNE como NFPA, utilizan factores de corrección por temperatura en la ampacidad permisible de los conductores, basados en la ecuación de variación de la resistividad con la temperatura, la cual ha sido probada en materiales conductores sin carga (UNE 20.460-5-523, 2004; Guía BT-Anexo 2, 2003 y NFPA-70, 2008). La ecuación que corrige las ampacidades en ambas normas es teóricamente la misma; y solo depende del material conductor y su función característica de incremento térmico; la cual tiene un valor constante para el cobre y otro para el aluminio. Al incluir las variaciones de la resistencia por la temperatura en el modelo de Joule, los resultados calculados se aproximaron mucho más a los que encontramos en nuestros experimentos; los errores porcentuales mas altos en el régimen de operación normado, fueron solo del 5%.

Lo anterior nos indica que la corrección que hacen éstos factores en las ampacidades normadas, es sumamente importante, y no deben obviarse al momento de diseñar sistemas eléctricos. Sin embargo, cuando el conductor entra en la región de sobrecarga, la cantidad de potencia disipada real, fue hasta un 10% mayor que la cantidad de potencia calculada.

En base a esto creemos que la alta termoconducción no necesariamente está en conductores “victimas” del incendio; puede ser “causa” del mismo, y pasa desapercibida como causa.

Las condiciones de sobrecarga prolongada, que son permisibles en cierta medida por los elementos de protección más grandes, son situaciones probables en los conductores principales de los edificios, por efectos de que en el diseño se usan factores de demanda o diversidad más bajos. Con el resultado encontrado, vemos que éstas sobrecargas son sinónimos de calentamientos termoconductorivos, mucho más severos de los que pensábamos hasta ahora.

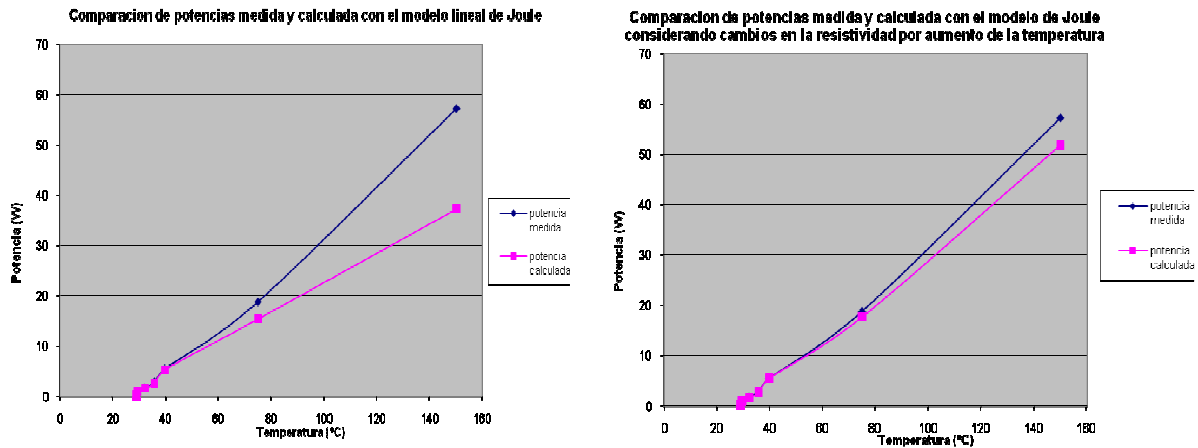


Fig. 5.a. y 5.b. Muestra las potencias disipadas calculada y medida en 4 pies de cable termoplástico 24 AWG (sección 0.205 mm²), llevado en sobrecarga controlada hasta derretir su aislante a 150°C y causar corto circuito. La Fig 5.a. muestra cálculos según Ley de Joule; la fig 5.b. muestra cálculos considerando función de resistividad por temperatura utilizada por UNE y NFPA.

El modelado matemático de las experiencias, dio como resultado general la ecuación 1

$$P_{c(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2(T_0,L)}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2(T,L)}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad [ec.1]$$

En la ecuación 1, $P_{c(T,L)}$ es la potencia real disipada en función de diferencia térmica entre el ambiente y el cable, la longitud del cable, la función de resistividad del cable ($\rho_{co(T_0,L)}$), la función de corriente al cuadrado ($I^2(T,L)$), una función que describe la sección transversal ($A_{p(L)}$) considerando variaciones en los giros; y la función de incremento térmico del material ($\alpha_{(T,L)}$).

Para considerar solamente las características propias del cable, sin incluir efectos por la forma de la señal de voltaje, realizamos pruebas en corriente directa y simplificamos el modelo a la ecuación 2, la cual redujo el error porcentual bajo cualquier condición, incluso sobrecarga, al 0.06%; unas 150 veces más preciso que el modelo utilizado por UNE y NFPA, y casi 900 veces mas preciso que el modelo clásico de Joule. Este modelo tiene mucha utilidad para analizar condiciones de sobrecarga; y ninguna normativa ni investigación actual, contempla ésta posibilidad.

$$P_{c(T,L)} = R_{(T_0,L)} \cdot I^2 + I^2 \cdot [0.0128945 \cdot \ln(T) + 8.00835 \times 10^{-4} \cdot T - 0.0664392] \quad [ec.2]$$

La ecuación 2 utiliza el valor de resistencia estándar del cable ($R_{(T_0,L)}$), dado por los fabricantes para temperaturas entre 25 a 30 grados centígrados; y luego ingresamos la temperatura real de operación T , que puede ser leída directamente de un análisis termográfico en instalaciones hechas, o puede calcularse despejando de las ecuaciones de resistividad dadas en el Anexo 2 de la Guía Técnica de Aplicación (Guía – BT – Anexo 2, 2003) y en la Tabla Propiedades de Conductores del Anexo del NFPA 70 (NFPA-70, 2008), sacando las potencias disipadas con Joule al usar éstas resistividades, e iterando las potencias resultantes con la ecuación 2, hasta que el error de cálculo sea pequeño.

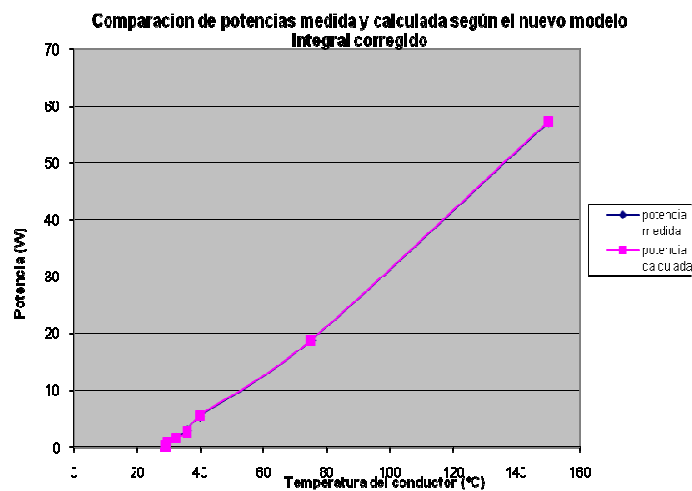


Fig. 6. Muestra que la potencia calculada según el nuevo modelo cuyo resultado simplificado está en la ecuación 2, sigue casi perfectamente los valores que se obtuvieron de las experiencias realizadas.

6. Discusión y conclusiones

La falla por termoconducción en los cables es difícil de identificar, y muchas veces es confundida con otros eventos, como los efectos en los conductores cuando hay receptores en corto circuito. Al ver que la falla ha sido en medio de un conductor limpio, sin fundir más que una pequeña longitud definida de conductor, se puede identificar que ha ocurrido un arco en el conductor.

Este arco tiene dos posibles causas; una falla mecánica en el aislante, o alta termoconducción que ha calentado demasiado el aislante en ese punto, debilitándolo hasta perder su rigidez dieléctrica. La primera causa, es típica de conductores rectos, donde la sección no varía y por lo tanto el calentamiento del conductor es homogéneo, fallando por algún lado golpeado o fisurado; la segunda es típica en lugares donde hay giros en el cableado, o en tramos rectos que pasan por canalizaciones o ambientes que ofrecen mayor resistencia a la disipación de calor que el resto del recorrido del cable.

Las experiencias y pruebas hasta ahora, han demostrado que ningún análisis químico ni metalúrgico de los conductores quemados, es suficientemente fiable para determinar el tipo de falla que existió en el cable; incluso muchos estudios importantes se contradicen. El único método que demostró ser fiable para determinar algún tipo de antecedente causal, es el método físico dado por NFPA-921; sin embargo éste solo determina si el cable existió un arco o no; y deja indeterminada la causa del arco en caso de existir.

El nuevo modelo propuesto, ayuda a determinar si la alta termoconducción ha sido causa de la falla, al darnos datos precisos de temperaturas reales en condiciones de difícil disipación, que pueden ser comparadas con las capacidades térmicas del aislante; con lo que puede determinarse si el aislante perdió su rigidez dieléctrica por causa de la temperatura o no. Este modelo puede tener una aplicación muy amplia en el diseño de líneas de alta intensidad, al calcular con precisión sus comportamientos térmicos.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo técnico y económico de Ingeniería Atlántico, S.A., y el Sr. Rafael Watson Rojas, P.E., CFPS, SFPE, NFPA.

8. Referencias Bibliográficas

Earley Mark W., Sheehan Joseph V., Caloggero John M.; *National Electrical Code Handbook*, 8ª edición ingles, Quincy Massachussets, National Fire Protection Association, 1999, 1063 p. ISBN: 0-87765-437-9

Erlandsson R., Strand G. “An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage”, *Fire Safety Journal*, Vol. 8, 1984, p.97-103.

FACEL (2010), “Clasificación Temática de las Normas UNE en Vigor”, *Asociación Española de Fabricantes de Cables y Conductores Eléctricos y de Fibra Óptica*,

[en línea],

<http://www.facel.es/docs/PF-01+02%20UNE%20BT%20y%20MT%20Rev%202010-03-31.pdf>

[Consulta: 28 de junio de 2010]

Hagimoto Y., “Protection Failure of Short-circuit by Arcing along the Insulating Material between Two Conductors of Wiring or Wiring Devices”, *Journal of Tokyo Electric Management Engineering Association*, NRIPS, Japan, January 1992. [en línea],

<http://www.tcforensic.com.au/docs/japan/15.html>

[Consulta: 15 de abril de 2010]

Hall John R., Cote Arthur E.; “An Overview of the Fire Problem and Fire Protection”. *Fire Protection Handbook* 20th Edition, Quincy Massachussets, National Fire Protection Association, 2008, p 3-3 a 3-30, ISBN-10:0-87765-758-0 ISBN-13: 978-0-87765-758-3

Hellin J (2009), “La Electricidad como Origen de los Incendios”, *Cosas de Bomberos*, [en línea],

http://www.cosasdebomberos.es/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=42&Itemid=4

[Consulta: 1 de julio de 2010]

Ishibashi Y., Kishida J. “Research on First and Second Fused Mark Dscrimination of Electric Wires” *Annual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg.*, Japón, 1990, p.83-90.

Lee E., Ohtani H., Matsubara Y. et al. “Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue”, *Fire Safety Journal*, Vol. 37, 2002, p.353-368.

MacCleary R., Thaman R. “Method for Use in Fire Investigation,” US Patent 4,182,959; Estados Unidos, 1980.

McPartland J, McPartland B. *Handbook of Practical Electrical Design*, 2^{da} edición, U.S.A., McGraw-Hill, 1995, 732 p. ISBN 0-07-045820-0

Milatovich, R. M.; “Electrical Systems and Appliances”, *Fire Protection Handbook*, 20th Edition, Quincy Massachussets, National Fire Protection Association, 2008, p.8-127 8-173, ISBN-10:0-87765-758-0 ISBN-13: 978-0-87765-758-3

Ministerio de Ciencia y Tecnología, *Guía BT Anexo 2: Guía Técnica de Aplicación – Anexo – Cálculo de las Caídas de Tensión*, Revisión 1, España, sep. 2003, 14 p.

Miyoshi S. “Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads”, *4th Asia-Oceania Symp. On Fire Science & Technology*, Asia-Oceania Assn. for Fire Science & Technology / Japan Assn. for Fire Science & Engineering, Tokyo, 2000, p.653-656.

NFPA-70: National Electrical Code, National Fire Protection Association, Edición 2008, Quincy, MA.

NFPA-921: Guide for Fire and Explosion Investigations , National Fire Protection Association, Edición 2008, Quincy, MA.

PRIE (2005), “Plataforma para la Revisión de Instalaciones Eléctricas” [en línea], <http://www.plataformaprie.com/nivel02.asp?id03=5>
[Consulta: 2 de julio de 2010]

Ryan, R.W. Chubb, M.; “Riesgos en las Instalaciones de los Edificios”, *Manual de Protección Contra Incendios*, 17va edición, España, MAFPRE, National Fire Protection Association, 1991, p.6-179 6-190 / 1273 – 1284, ISBN 84-7100-645-6

Satot K, Fukusima H, Sigeru S et al. “Verification SIMS Applied to the Fire Investigation for Short Circuit”, *Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg*, Japón, 1998, p. 336.

Tokio Fire Department, “Research on First and Second Fused Mark Discrimination on Electric Wires”, *Journal Japan Assn. for Fire Science and Engrg*, Vol. 42 N^o2, 1992, p. 15-20.

Toledano, J., de las Casas, J., & Bedoya, C. “Rehabilitación de las instalaciones eléctricas en los edificios destinados principalmente a viviendas.” **Informes de la Construcción**, Vol **61**, N^o516, 2009, p.67-82

UNE 20.460-5-523:2004. “Instalaciones Eléctricas en Edificios. Parte 5: Selección e instalación de los materiales eléctricos. Sección 523: Intensidades admisibles en sistemas de conducción de cables”. *Normas UNE del REBT.*, AMV Ediciones – C/Almansa, 94-28040, 2004, Madrid.

Vergara M (2006), “Uso de Cámaras Termográficas en Aplicaciones Eléctricas” *Revista Electroindustria*, [en línea], <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=449&tip=7>
[Consulta: 5 de julio de 2010]