



## **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 trabajo 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. El estudio se basa 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”. Se presenta 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. Se propone la hipótesis 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 encender 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**

This paper has the purpose of exposing the physical theoretical foundations and experimental results that have been obtained after 4 years of research and experimentation with fires in electrical conductors. It is 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". A review of the state of the art is presented, concerning the models research of heating of conductors and applications of modeling that might be used in fire protection engineering and electricity, to create advances in the comprehension of facts. It is proposed the hypothesis that fires that take place with an electric element as a primary source of energy, not necessarily initiate when an electric arc or short circuit exists, but they can initiate long before, when this element is heated according to the Joule Effect and this is enough for ignite some material around or to affect some part of the conductor element itself. A scientific general analysis is given on the way fires are generated the by electrical causes, and a new mathematical model is proposed as a contribution to the scientific field of electricity and fire protection science.

## **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 *triangulo 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”.

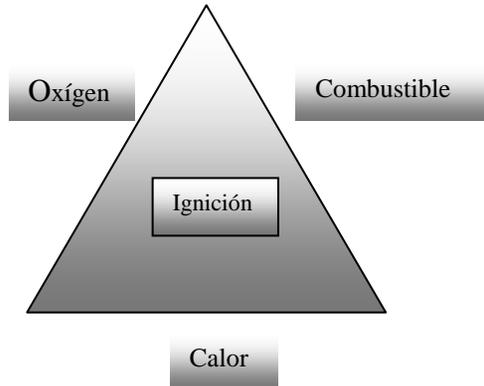


Fig. 1. Representación gráfica del “Triángulo del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para llevar a cabo la ignición.

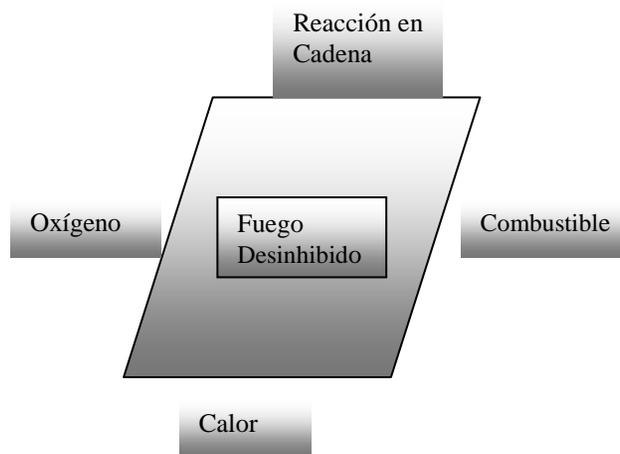


Fig. 2. Representación gráfica del “Tetraedro del Fuego” para describir la combinación de los elementos necesarios para tener un fuego mantenido.

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 si 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 si 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:

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [1]$$

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 [longitud<sup>2</sup>/tiempo]

$\rho$  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:

$$W = I^2 R \cdot t \quad [2]$$

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:

$$W = \int I^2 \cdot R \cdot dt. \quad [3]$$

y utilizando la ley de Ohm podemos expresar:

$$W = \int V \cdot I \cdot dt \quad [4]$$

El punto clave del modelo está entonces en definir de una forma real esta resistencia del conductor, directamente relacionada al “voltaje de perdida” 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.

$$\rho_c = m \cdot (T - T_o) + \rho_{co} \quad [5]$$

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  $\rho_{co}$ , 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*

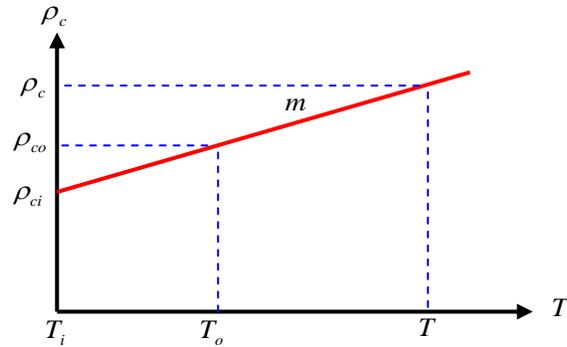


Fig. 3. Representación gráfica de una función  $\rho_c$  linealizada, y corregida para que la temperatura inicial sea cualquiera diferente de cero.

La definición de  $m$ , puede realizarse con base en evidencias físicas como:

$$m = \rho_{co} \cdot \alpha \quad [6]$$

donde  $\alpha$  es la función característica de incremento térmico del material en unidades de  $\frac{1}{^\circ C}$  ó  $\frac{1}{^\circ F}$  ó  $\frac{1}{K}$  ó  $\frac{1}{^\circ R}$ . y  $\rho_{co}$  ya se tiene tabulada por medio de la experimentación para muchos materiales (Sapiensman, 2010).

En nuestra investigación encontramos que la función  $\alpha$  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.

$$\rho_c = \rho_{co} \cdot \left[ 1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad [7]$$

Como paso siguiente realizamos una corrección a la definición clásica de la resistencia del conductor, adjuntando la anterior ecuación de la siguiente forma:

$$R = \frac{\rho_c \cdot L}{A_p} = \frac{\rho_{co} \cdot L}{A_p} \cdot \left[ 1 + \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \right] \quad [8]$$

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:

$$dR = \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p} \cdot dl + \frac{\rho_{co(T_0)}}{A_p} \cdot \int_{T_0}^T \alpha_{(T)} \cdot dT \cdot dl \quad [9]$$

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*.

$$R_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + R_{(T_0,L)} f_{(T,L)} = R_{(T_0,L)} + \Delta R_{(T,L)} \quad [10]$$

$$= \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl$$

Al combinarse las ecuaciones *ec 3*, *ec 10* y la ecuación general de potencia instantánea real disipada en el conductor que presentamos como:

$$P_c = \frac{dW}{dt} \quad [11]$$

Se desarrolla obteniendo:

$$P_{c(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2_{(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl$$

[12]

Donde  $\rho_{co}$  es la resistividad del material a la temperatura de referencia  $T_o$  (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  $L$   
 $T_o$  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).

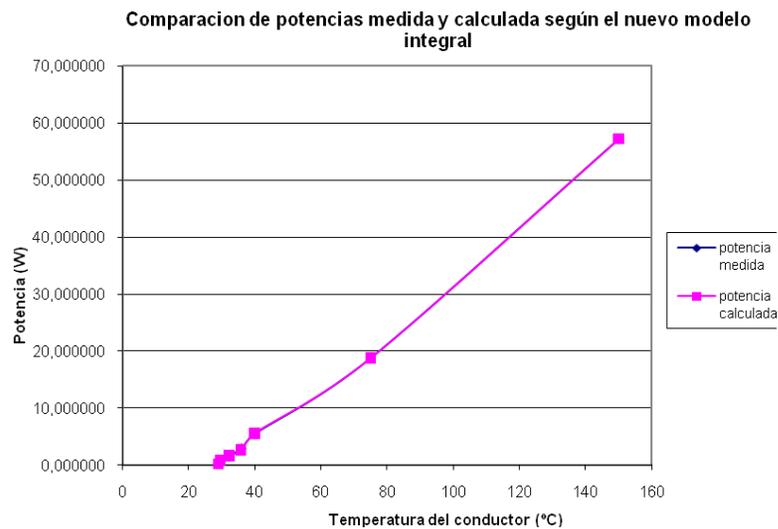


Fig. 4. Muestra la comparación entre las potencias medidas y calculadas según el modelo integral presentado por en 4 pies de conductor 24 AWG. Obsérvese que la potencia calculada está en todo momento casi perfectamente sobre la línea descrita por las mediciones experimentales. A los 150 °C el cable comenzó 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.

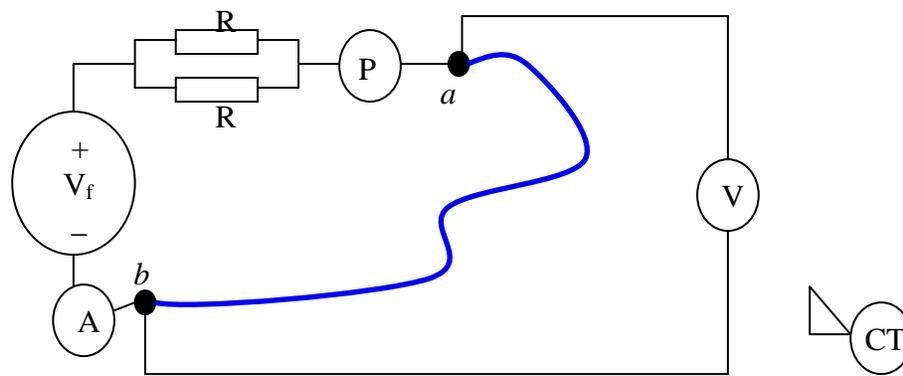


Fig. 5. Representación gráfica del circuito de pruebas experimentales. El conductor a probar se encuentra entre los terminales *a* y *b*. Las simbologías utilizadas representan:

- 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*.

$$g = \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2(T_0,L)}{A_{p(L)}} + \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2(T,L)}{A_{p(L)}} \cdot dT \quad [13]$$

### 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 desprejar 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., P.J. DiNemo, D.J. Carpenter. 2008. “Introduction to Fire Modeling”, *Fire Protection Handbook*, 20<sup>th</sup> Edition, National Fire Protection Association, Quincy Massachusetts, pp 3-93 a 3-105.

Cote, A. & B. Percy. 1993. *Principios de Protección Contra Incendios*, p. 45, NFPA y CEPREVEN, España.

Cox, G. & S. Kumar. 2002. “Modeling Enclosure Fires Using CFD”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3<sup>rd</sup> 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, J. & Mike Faulconer; *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, Nº 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. & E. Cote Arthut. 2008. "An Overview of the Fire Problem and Fire Protection". *Fire Protection Handbook*, 20<sup>th</sup> 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*, 3<sup>rd</sup> edition, Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, pp 2-188 2-199.

Kraus, J.D. & K.R. Carver. 1973. *Electromagnetics*, pp 112-113, McGraw-Hill & Kogakusha LTD, Tokyo and other cities.

Lecuona, A., M. Izquierdo & P. Rodríguez. 2005. "Investigación e Impacto Ambiental de los Edificios. La Energía"; *Informes de la Construcción*, Vol. 57, Nº 498, pp 47-61, doi: 10.3989/ic.2005.v57.i498.477.

Milatovich, R. M. 2008. "Electrical Systems and Appliances", *Fire Protection Handbook*, 20<sup>th</sup> 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, Nº 2, pp 129-143, doi: 10.1177/1042391506069337.

Reitz, J. & F. J. Milford. 1967. *Foundations of Electromagnetic Theory*, pp. 127-130, Addison Wesley Publishing Company, Massachusetts & other cities.

Ryan, R.W. & M. Chubb. 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*, 3<sup>rd</sup> edition, Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, pp 1-144 1-154.

Welty, J.R., C.E. Wicks & R.E. Wilson. 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](http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_determin%C3%ADstico)

[consulta 25 de abril de 2010].

***Recibido abril de 2010, aceptado octubre de 2010.***