

## **El recalentamiento eléctrico por termoconducción. Una perspectiva fisicoquímica del calentamiento eléctrico**

### **The thermal electrical overheating. A physicochemical perspective of the electrical warming**

*Dorindo Elam Cárdenas Estrada\*<sup>1</sup>, Santos Gracia Villar<sup>2</sup>, Federico Fernández Díez<sup>3</sup>, Luis Alonso Dzul<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Ingeniería Atlántico. S.A. Calle Higino Arauz Cl 2da Pueblo Nuevo y 12 de Octubre. Ciudad de Panamá, Panamá.

<sup>2</sup> Fundación Universitaria Iberoamericana. Paseo García Faria 29, 08005. Barcelona, España.

<sup>3</sup> Departamento de Proyectos de Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Diagonal 647, Planta 10, 08028. Barcelona, España.

<sup>4</sup> Universidad Internacional Iberoamericana. Ave. José A. Cedeño, N° 521, 00612. Arecibo, Puerto Rico.

(Recibido el 11 de julio de 2011. Aceptado el 3 de septiembre de 2012)

#### **Resumen**

El presente artículo recopila los comportamientos reales observados luego de cinco años de investigación, experimentación y modelado, con conductores eléctricos que fallan 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. Hasta ahora, los experimentos realizados con conductores eléctricos incendiados se limitan en su mayoría a tratar de determinar si el conductor produjo arco eléctrico o fue víctima del incendio, por medio de pruebas fisicoquímicas con los restos del conductor. 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, la selección del conductor adecuado se vuelve una decisión difícil. Estos factores, se consideran separadamente en normas españolas, americanas e internacionales; y los procesos de selección de cableado, desprecian ciertas condiciones que a veces son importantes causas de falla. El modelo presentado, es el resultado de la experimentación,

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 507+6677 1224, fax: + 507+261 3546, correo electrónico: de.cardenas@hotmail.com (D. Cárdenas)

en conjunto con un análisis global que tomó en cuenta todos estos factores simultáneamente; luego de revisar las conclusiones de las investigaciones químicas y físicas más relevantes.

----- *Palabras clave:* Conductor eléctrico, corriente eléctrica, disipación de potencia, modelo matemático, resistividad

### **Abstract**

The present article exposes the actual behaviors observed after five years of investigation, experimentation and modeling, with electrical conductors that had a 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. Till now, the experiments realized with electrical inflamed conductors, in most cases are focused to trying to determine if the electric conductor was ignited by electric arch or if it was a victim of the fire, by means of physicochemical tests with the remains of the conductor. 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, the selection of a suitable conductor becomes a difficult decision. All these factors are considered separately in Spanish norms as in international norms; despising in many cases some conditions that may be important cause of fault. Presented model is result of experimentation and a global analysis that takes care of all these factors simultaneously, after the review of conclusions of the most relevant chemical and physical investigations.

----- *Keywords:* Electric conductor, electric current, mathematical model, power dissipation, resistivity

### **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 [1], reporta 7.300 incendios anuales de causa eléctrica. En Japón, Y. Hagimoto indica un promedio de 3.000 incendios de causas eléctricas anuales [2]. 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 [3].

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 [4].

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 [5].

Hasta ahora no se conoce de investigaciones, normas, ni ensayos de este tipo, solo investigaciones experimentales para determinar la posible existencia de arcos en el conductor. 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.

### **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 [6]. 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.

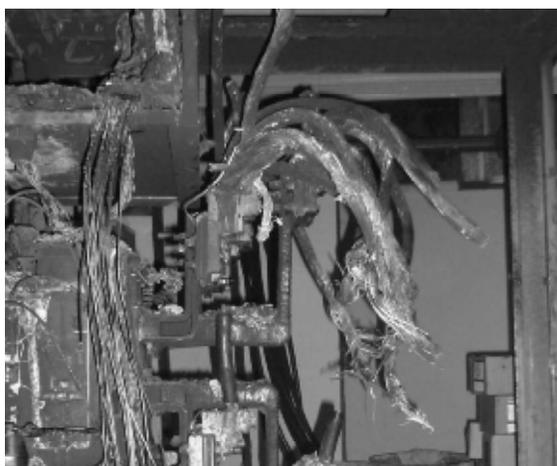
Sin embargo, existe un tipo de falla puntual de conductores eléctricos, donde se ha verificado por peritaje técnico, que en el momento de falla no existe ningún corto circuito o malas conexiones en partes eléctricas terminales que éstos alimenten, la falla es propia del conductor, con fundiciones puntuales 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.

La característica más visible de esta falla, es que es puntual, tal como se aprecia en las figuras 1 y 2.



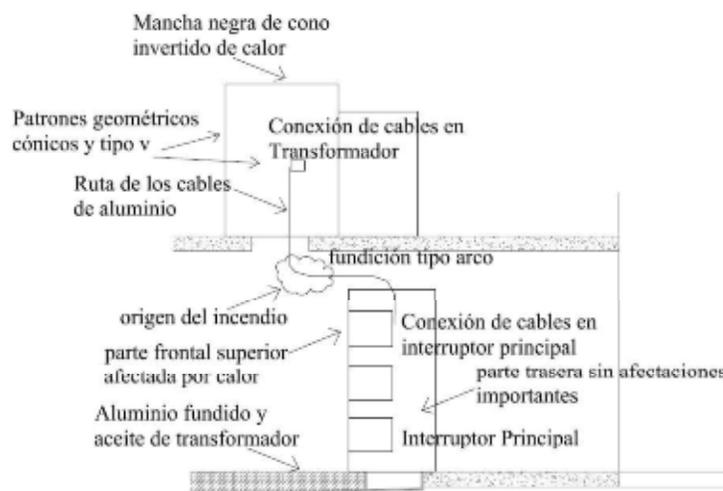
**Figura 1** Cables fundidos en la acometida de un rascacielos, bajando desde el transformador principal



**Figura 2** Muestra los mismos cables de la figura uno, pero el pedazo que quedó llegando al interruptor principal en la caja general de protección

El esquema de la figura 3, muestra que los cables de la acometida bajaban un nivel desde el transformador principal y hacían un ángulo de 90° para recorrer horizontalmente hasta el primer elemento de protección; denominado “Caja General de Protección” (CGP), según las normas UNE 20460 [7]; o “Interruptor Principal” (IP) según el NFPA 70 [8].

Pueden verse los conductores fundidos haciendo un corte limpio y recto a mitad de su recorrido entre el transformador 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.



**Figura 3** Esquema de conexión del cableado para el caso presentado en las figuras 1 y 2

### Características fisicoquímicas actuales de los cables de baja tensión

Tanto la norma UNE 20460-5-523 como la NFPA-70, definen dos grupos de cables que nos interesan, por ser los grupos más utilizados en las instalaciones de baja tensión; los cables termoplásticos (thermoplastic) y los cables termoestables (thermoset), siendo los primeros de uso corriente a temperaturas medias de

operación con aislamientos que se debilitan fisicoquímicamente con la temperatura, y los segundos son cables con aislamiento resistente a mayores temperaturas de operación, con características fisicoquímicas estables ante el aumento térmico [9]. Tradicionalmente se hacen los aislamientos de cables termoplásticos a base de PVC (policloruro de vinilo), poliolefinas Z1, o materiales con comportamiento similar, que según la norma española 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 [7]. La normativa americana exige por su parte que los cables termoplásticos soporten 75°C y los termoestables 90°C en operación normal [8].

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 mundialmente es el de goma silicona, que fue 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.

Más 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), y cumplen 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 AS, y adicionalmente pueden brindar el servicio durante e incluso después del incendio, conforme a lo normado en UNE EN 50200, siendo así capaces de soportar incendios de 842°C durante 90 minutos. Estos últimos son los cables con mayor resistencia al fuego en baja tensión que se consiguen comercialmente hasta la fecha de culminación de ésta investigación.

En Estados Unidos existe una gran variedad de cables dependiendo de la aplicación. Entre las tecnologías de cable más utilizadas hoy día, están 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) [10]. Los conductores para servicio de entrada deben tener una designación especial, indicada como “SE” [11], y su tecnología debe ser termoestable.

## Resultados y discusión

Como primer acercamiento al análisis de falla del conductor en un incendio, se pueden diferenciar dos 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 [12]. La termoconducción en el cable puede darse por dos fuentes de calor; la primera, 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 [12].

Con base en éstas referencias, se han guiado peritajes de incendios reales, como el expuesto en 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 en algún momento. Para determinar 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 con alguna metodología científica; 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.

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 [13]. Su hipótesis se basó en que las gotas del material “causa” se encuentran en una atmósfera rica en oxígeno, mientras que las del material “víctima” estarán 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 [14].

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 a identificar de forma fiable al material causa, pues las identificaciones acertadas no superan el 60% de los casos [15].

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 [16]. Aparte de eso, Miyoshi en sus experiencias con técnicas similares, encontró que la cantidad de huecos es mucho más abundante en el material víctima que en el material causa [17].

Sin embargo, contrario a lo estipulado por Miyoshi y el Departamento de Bomberos de Tokio; los investigadores Ishibashi y Kishida, al utilizar métodos de microscopía, concluyen en su trabajo que estos huecos son más abundantes en el material causa que en el víctima [18]. 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 [19].

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 después de esto el arco.

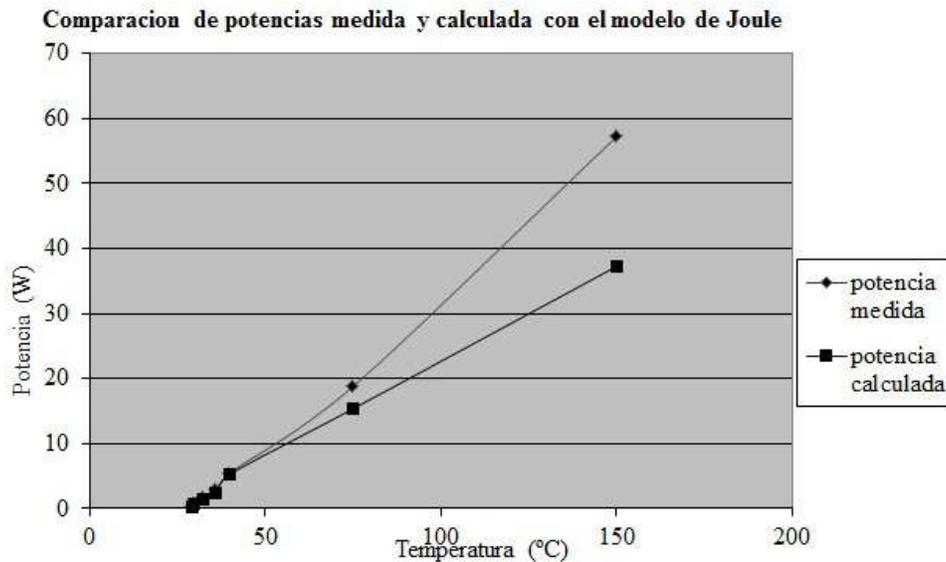
Tampoco hay registros de investigaciones donde se analice la hipótesis de un conductor eléctrico que al estar recalentado haga que algún otro material combustible llegue a su punto de ignición. Por lo general estas causas de incendio permanecen ocultas y muchas se confunden con investigaciones de autoignición de materiales.

En nuestra investigación, el único método que validamos para determinar la existencia de arco eléctrico fue el dado por NFPA 921 [12]. 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 simple de Joule [20], para el calentamiento de conductores, encontrando errores porcentuales de potencia

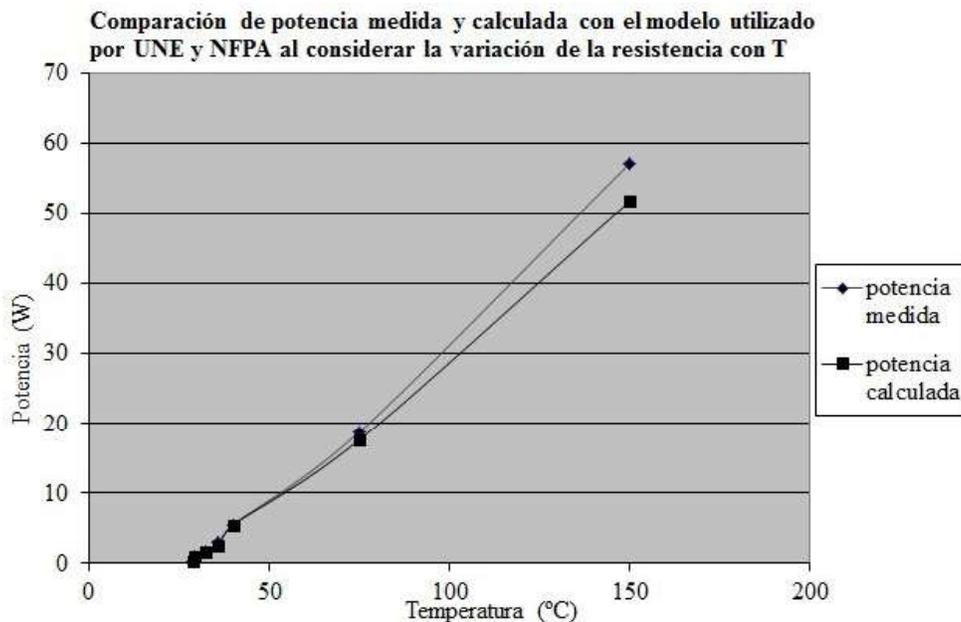
disipada adicional real versus la calculada de más del 10% en niveles de operación a media carga; y más de 20% cuando el conductor es llevado a su temperatura máxima de operación normada. Luego se llevo el conductor hasta el punto de falla de su aislante (150° C aproximadamente) y el error porcentual fue de más del 50%, con temperatura ambiental controlada de 29°C [21]. Los resultados del comportamiento real versus el teórico calculado con el modelo de Joule simple pueden verse en la figura 4.



**Figura 4** Muestra la potencia medida y calculada según el modelo de Joule en 1,22 metros de cable termoplástico 24 AWG (sección 0,205 mm<sup>2</sup>), llevado a sobrecarga controlada hasta derretir su aislante a 150°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 [7, 8, 22]. La ecuación que corrige las ampacidades en las normas citadas en nuestra investigación, 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, siendo los errores porcentuales más altos en el régimen de operación normado del orden de 5%. 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 por el modelo corregido. En base a esto creemos que la alta termoconducción no se da únicamente en conductores “víctimas” del incendio; puede ser la “causa” del mismo, y pasa en muchas ocasiones desapercibida como causa. Los resultados de pruebas y cálculos con éste modelo corregido se aprecian en la figura 5.



**Figura 5** Muestra la potencia medida y calculada según el modelo de Joule corregido con el modelo de incremento de resistencia por temperatura usado por UNE y NFPA, en 1,22 metros de cable termoplástico 24 AWG (sección 0,205 mm<sup>2</sup>)

El modelado matemático teórico que considera todas las demás condiciones especiales que se hacen notables durante la sobrecarga, incluyendo los cambios en las propiedades intrínsecas del cable, así como los efectos geométricos, medioambientales y forma de la onda de corriente, fue desarrollado y demostrado con las experiencias realizadas por Cárdenas [21], dando como resultado general la ecuación 1, resultado que fue obtenido al considerar un elemento conductor real con una resistencia no uniforme (dependiente del medio y sus propias características internas), buscando un modelado matemático para un conductor disipador de calor con resistividad variable con su estructura material, dimensional, y con las condiciones térmicas ambientales circundantes al utilizar la ecuación diferencial de difusión de calor con generación interna propuesta por Fourier. La ecuación 1 es la forma macroscópica que modela al conductor, como la fuente generadora de calor en la inobjetablemente exacta ecuación de Fourier.

$$P_{c(T,L)} = \int_0^L \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot I^2_{(T_0,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dl + \int_0^L \int_{T_0}^T \frac{\rho_{co(T_0,L)} \cdot \alpha_{(T,L)} \cdot I^2_{(T,L)}}{A_{p(L)}} \cdot dT \cdot dl \quad (1)$$

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 ( $\alpha_{(T,L)}$ ).

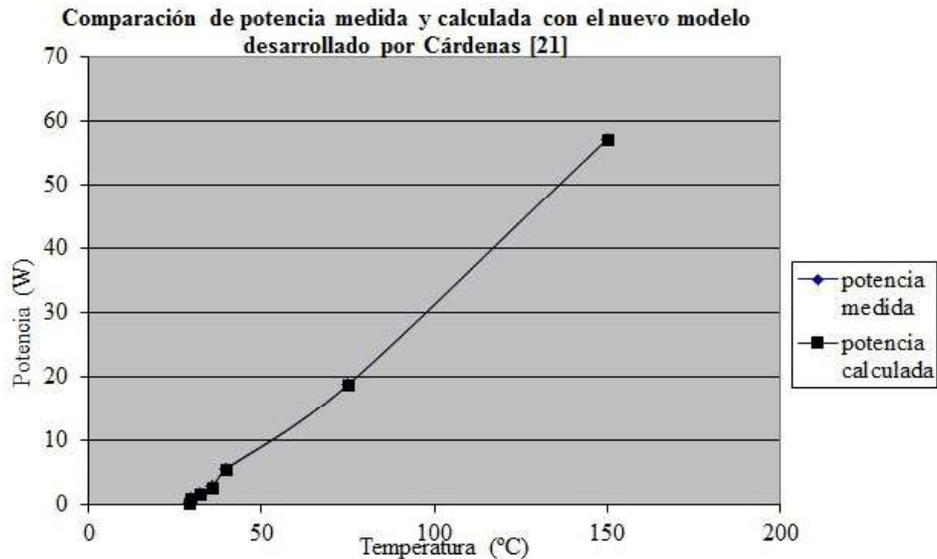
Para considerar solamente las características propias del cable, sin incluir efectos por la forma de la señal de voltaje, realizamos pruebas en corriente directa y simplificamos el modelo a la ecuación 2. Con ésta nueva ecuación simplificada a partir de nuestro modelo integral general, obtuvimos valores de disipaciones de potencia en forma de calor con errores

porcentuales muy bajos respecto de los valores reales de disipación en cualquier condición; incluso en la región de sobrecarga el error fue de solo 0,06%; lo que significa que el nuevo modelo tiene por lo menos 150 veces mayor precisión que el modelo utilizado por UNE y NFPA, y es casi 900 veces más preciso que el modelo clásico de Joule [21].

$$P_{e(T,I)} = R_{(T_0,L)} \cdot I^2 + I^2 \cdot [0.0128945 \cdot \ln(T) + 8.00835 \times 10^{-4} \cdot T - 0.0664392] \quad (2)$$

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 técnicas actuales dadas en el Anexo 2 de la Guía Técnica de Aplicación BT [22] y en la Tabla Propiedades de Conductores del Anexo del NFPA 70 [8], 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. La figura 6 muestra el gran nivel de aproximación que se obtuvo con el nuevo modelo desarrollado respecto de las pruebas reales.



**Figura 6** Muestra la potencia medida y calculada por el nuevo modelo simplificado en la ecuación 2. La potencia calculada es en todo momento muy próxima a la potencia medida

### 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.

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 entre ellos. 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 en 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 es la causa de la falla, al darnos datos precisos de temperaturas reales en condiciones de difícil disipación, que son comparadas con las capacidades térmicas del aislante; con lo que puede determinarse si el aislante perdió su rigidez dieléctrica y demás propiedades fisicoquímicas de aislamiento por causa de la temperatura. El modelo calcula con gran exactitud los comportamientos térmicos de los conductores.

### Referencias

1. PRIE. *Plataforma para la Revisión de Instalaciones Eléctricas*. Disponible en: <http://www.plataformaprie.com/nivel02.asp?id03=5>. 2005. Consultado el 2 de julio de 2010.
2. Y. Hagimoto. "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*. Vol 15. 1992. Disponible en: <http://www.tcf forensic.com.au/docs/japan/15.html>. Consultado el 15 de abril de 2010.
3. J. Hall, A. Cote. *An Overview of the Fire Problem and Fire Protection*. Fire Protection Handbook. 20<sup>th</sup> ed. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts, USA. 2008. pp. 3-3 a 3-30.
4. D. Cárdenas. "La Electricidad como Fuente Generadora de Incendios". *El Tecnológico*. Vol 18. 2010. pp. 24-26.
5. R. Ryan, M. Chubb. *Riesgos en las Instalaciones de los Edificios*. Manual de Protección Contra Incendios. 17<sup>a</sup> ed. MAFPRE & National Fire Protection Association. Madrid, España. 1991. pp. 6-179 6-190 / 1273 - 1284.
6. M. Vergara "Uso de Cámaras Termográficas en Aplicaciones Eléctricas". *Revista Electroindustria*. Vol 31. 2006. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=449&tip=7>. Consultado el 5 julio de 2010.
7. 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. Ed. AMV Ediciones. Madrid, España. 2004. 1-13.
8. D. Harold, M. Earley, J. O'Connor. NFPA-70. *National Electrical Code*. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts (USA). 1999. pp.70-61 a 70-70
9. M. Earley, J. Sheehan, J. Caloggero. *Wiring Methods and Materials*. National Electrical Code Handbook. 8<sup>a</sup> ed. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts, USA. 1999. pp. 211-392.
10. R. Milatovich. *Electrical Systems and Appliances*. Fire Protection Handbook. 20<sup>th</sup> ed. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts, USA. 2008. pp. 8-127 8-173.
11. J. McPartland, B. McPartland. *Lighting and Appliance Branch Circuits*. Handbook of Practical Electrical Design. 2<sup>da</sup> ed. Ed. McGraw-Hill. New York, USA. 1995. pp. 15-171.
12. D. Churchward, C. Watson. NFPA-921. *Guide for Fire and Explosion Investigations*. National Fire Protection Association. Quincy, Massachusetts, USA. 2008. pp. 67-90.
13. R. MacCleary, R. Thaman. "Method for Use in Fire Investigation". U.S. Patent N.º 4,182,959. 1980.
14. K. Satot, H. Fukusima, S. Sigeru, M. Iwaki. *Verification SIMS Applied to the Fire Investigation for Short Circuit*. Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg. Tokyo, Japón. 1998. pp. 336-336.
15. E. Lee, H. Ohtani, Y. Matsubara, T. Seki, H. Hasegawa, S. Imada, I. Yashiro. "Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue". *Fire Safety Journal*. Vol. 37. 2002. pp. 353-368.
16. Tokio Fire Department. "Research on First and Second Fused Mark Discrimination on Electric Wires". *Journal Japan Assn. for Fire Science and Engrg*. N°2. 1992. pp. 15-20.
17. S. Miyoshi. *Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads*. 4<sup>th</sup> Asia-Oceania Symp. On Fire Science &

- Technology. Asia-Oceania Assn. for Fire Science & Technology. Tokyo, Japan. 2000. pp. 653-656.
18. Y. Ishibashi, J. Kishida. *Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires*. Annual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg. Tokyo, Japón. 1990. pp. 83-90.
  19. R. Erlandsson, G. Strand. "An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage". *Fire Safety Journal*. Vol. 8. 1984. pp. 97-103.
  20. M.N.O. Sadiku. *Campos eléctricos en el espacio material*. Elementos de electromagnetismo. 3ª ed. Oxford University Press. Inc. USA. 2003. pp. 161-198.
  21. D. Cárdenas. "Propuesta de un Modelo Matemático para calcular el Calentamiento de Conductores Eléctricos". *Tecnociencia*. Vol. 12-2. 2010. pp. 71-88.
  22. Ministerio de Ciencia y Tecnología. – *Anexo – Cálculo de las Caídas de Tensión*. Guía BT Anexo 2: Guía Técnica de Aplicación. Revisión 1. Madrid, España. 2003. pp.1-14.