



CORTOCIRCUITOS ELÉCTRICOS COMO FUENTE DE IGNICIÓN EFICAZ EN MATERIALES SÓLIDOS COMBUSTIBLES

Palabras clave: cortocircuito, fuente de ignición eficaz, transferencia de calor, pirólisis, materiales sólidos combustibles.

Keywords: short circuit, effective ignition source, heat transfer, pyrolysis, combustible solid materials.

RESUMEN

En condiciones controladas se generaron cortocircuitos en conductores de cobre con tensión de 117 a 122 Volts C.A., sobre 10 materiales sólidos combustibles de baja densidad más comunes encontrados en muebles y equipos en domicilios particulares y oficinas con el fin de observar si originaban un incendio. Cabe mencionar que, se utilizan estos conductores por ser los más utilizados en instalaciones eléctricas residenciales y comerciales. Se documentaron los ensayos y se consideró una serie de variables clave. Las pruebas consistieron en aproximar dos conductores de cobre energizados con las puntas enrolladas, colocando por debajo 10 sendos materiales sólidos combustibles a distancias de 2.5 y 1.0 cm. Lo que produjo calor radiante, flama y partículas incandescentes de cobre fundido. Se registró: 1) distancia de proyección de partículas incandescentes, 2) radio de las partículas incandescentes (0.3910 ± 0.1803 mm), 3) tipo de daño en el material, 4) radio del daño en la muestra por flama, y 5) generación de fuego. Además de videografiar a alta velocidad los ensayos a 2.5 cm. Después de desarrollar un modelo fisicomatemático elemental, por medio de método Montecarlo se calculó el tiempo de fundición de

los glóbulos de cobre (2.86 ms), el tiempo de desplazamiento de las partículas expulsadas (60.67 ms para una altura de un 1 cm, y 94.93 ms para 2.5 cm) y la constante de enfriamiento (26.9 s⁻¹). Los resultados muestran que solo en un caso se produjo una combustión autosostenida en la espuma de poliuretano que muy probablemente causaría un incendio. Sin contradicción, los resultados muestran que los cortocircuitos son ineficaces para producir fuego autosostenido en materiales sólidos combustibles a separaciones mayores de 1 cm, a excepción de la espuma de poliuretano que muy probablemente causaría un incendio.

Diálogo Forense
Núm. 10, Vol. 5, 2024
ISSN: 2789-8458

Vicente Torres Zúñiga
Escuela Nacional de Ciencias
Forenses -ENaCiF-
Universidad Nacional Autónoma
de México -UNAM-
vicentetorres@enacif.unam.mx

José Guadalupe Bañuelos Muñetón
Instituto de Ciencias Aplicadas y
Tecnología -ICAT-
Universidad Nacional Autónoma de
México -UNAM-
guadalupe.banuelos@icat.unam.mx

Francisco Javier Piliado Velasco
Escuela Nacional de Ciencias Forenses
-ENaCiF-
Asociación Nacional de Investigadores
Forenses en Incendios, Explosiones y
Explosivos S.C. -ANIFIEE-
francisco.piliado@aniffee.com.mx

Recibido: 18/09/2024

Aceptado: 19/11/2024

ABSTRACT

Under controlled conditions, short circuits with voltages from 117 to 122 Volts were generated on ten low-density combustible solid materials most common found in furniture and equipment in private homes and offices to observe whether they caused a fire. It is worth mentioning that these conductors are used because they are the most used in residential and commercial electrical installations.

The tests were documented, and a series of key variables were considered. The tests comprised joining the energized copper conductors with the coiled ends, placing 10 solid combustible materials underneath at distances of 2.5 and 1.0 cm. Radiant heat, flame and incandescent particles of molten copper were produced. The following recorded: 1) projection distance of incandescent particles, 2) radius of incandescent particles (0.3910 ± 0.1803 mm), 3) type of damage to the material, 4) radius of damage to the sample by flame, and 5) fire generation. In addition, high-speed videotaping of the tests at 2.5 cm is presented. After developing an elementary physical-mathematical model, the melting time of the copper globules (2.86 ms), the flight time of the ejected particles (60.67 ms for a height of 1 cm, and 94.93 ms for 2.5 cm) and the cooling constant (26.9 s^{-1}) were calculated using the Monte Carlo method. The results show that only in one case did self-sustaining combustion occurs in the polyurethane foam, which would most probable cause a fire. Without contradiction, the results show short circuits are ineffective in producing self-sustaining fire in combustible solid materials at distances greater than 1 cm, except for polyurethane foam, which would most probable cause a fire.

INTRODUCCIÓN

Los incendios intencionales o accidentales son una causa de pérdidas materiales y vidas, por lo cual es un tema forense relevante. La investigación sobre causas de generación de fuego implica un examen tanto de muestras en laboratorio como la revisión del lugar de los hechos (Kaur et al., 2022). No obstante, son más los artículos que tratan el estudio de indicios en laboratorio que en el lugar de investigación (Stauffer, 2020). Aunque existe literatura que aborda adecuadamente el trabajo de campo, sigue siendo un tema de entrecruce de especialidades como puede ser la ingeniería de materiales, la química de la ignición de sustancias o la distribución de calor en circuitos eléctricos (Stauffer, 2020).

De acuerdo con estadísticas de la *National Fire Protection Association* -NFPA, por sus siglas en inglés- realizadas en Estados Unidos de América EE. UU., entre 2015-2019, se tiene conocimiento que en viviendas familiares se generan incendios con un 19 % en cocinas o área de cocción de alimentos, 12 % en recámaras y 10 % en techos o áticos y 6 % en montajes en muros y espacios ocultos (National Fire Protection Association -NFPA-, 2024). En lo referente a los incendios de casas de habitación causados por fallas eléctricas o mal funcionamiento de algún electrodoméstico, el 49 % de estos incendios se debió a la

instalación de distribución eléctrica y equipo de iluminación, 15 % a instrumentos de cocina, 9 % en aparatos de calefacción y 12% en otros dispositivos. En consecuencia, las instalaciones de distribución eléctrica son causantes potenciales de los incendios domésticos, por fallas como sobrecalentamiento, arcos eléctricos y cortocircuitos. De acuerdo con la NFPA 921 un cortocircuito, es "Una conexión anormal de impedancia relativamente baja, entre dos o más puntos de diferente potencial." (National Fire Protection Association -NFPA-, 2024). Cuando este efecto ocurre la corriente eléctrica se transfiere de un conductor a otro (fase-neutro) produciendo una fusión en el punto de contacto entre ambos conductores, lo que puede generar una muesca y un glóbulo de cobre fundido, al unir los conductores se produce una flama instantánea y la proyección radial de partículas incandescentes de cobre fundido.

Hoy en día, sigue arraigada la idea errónea de localizar el famoso "perlado" (glóbulo formado por la fusión del cobre) y determinar al cortocircuito como iniciador del fuego. El problema radica en dejar de considerar otras fallas eléctricas como el sobrecalentamiento eléctrico por carga de corriente o tensión excesiva en conductores eléctricos, arcos eléctricos generados al cerrar o abrir un circuito, en conexiones deficientes entre partes metálicas

o puestas a tierra, lámparas incandescentes cerca de materiales combustibles y aparatos generadores de calor como hornos, motores, o balastos (Yan et al., 2021; Svare y Hanke, 2023; Korinek, 2022). Si bien se cuenta con publicaciones de análisis metalúrgicos (Riyanto y Ferdian, 2023), termoestructurales (Yu et al., 2020), e incluso por análisis de imágenes por inteligencia artificial (Wang et al., 2022), es escasa la literatura especializada que cuestione la idea de la localización de glóbulos en las puntas de conductores de cobre que implique directamente que la causa de incendio comenzó por un cortocircuito.

Esta investigación tuvo como objetivos medir la distancia de propagación de partículas incandescentes producto de un corto circuito, calcular el tiempo de formación y de desplazamiento de las partículas incandescentes derivados de los cortos circuitos y posteriormente registrar los resultados de los ensayos con cortos circuitos y materiales sólidos combustibles. Para confirmar o descartar si los cortos circuitos generados en

instalaciones eléctricas de 110 a 117 volts pueden generar una combustión autosostenida en materiales sólidos combustibles de baja densidad más comunes localizados en viviendas, oficinas y en pequeños negocios.

El documento presenta una serie de demostraciones de la producción de partículas incandescentes producidas por cortocircuitos y sus efectos en materiales inflamables ubicados a corta distancia de la fuente. Se presentan modelos de tiempo en donde se produce el glóbulo de cobre a alta temperatura. Además, estimamos el tiempo de desplazamiento de estas partículas, variable que relacionamos con la ley de enfriamiento de Newton para obtener el parámetro de enfriamiento. Mediante método Montecarlo se calculan los valores representativos y sus intervalos de incertidumbre. Tanto con los datos cualitativos como con los cuantitativos observamos las limitaciones de este mecanismo para iniciar un incendio. Esperamos que esta información sea útil para realizar investigaciones forenses más exactas.

METODOLOGÍA

Fundamentos y modelos temporales de fuego por cortocircuito

Por consenso, consideramos que el origen es el lugar físico donde se genera o inicia el fuego y la causa son las circunstancias, y condiciones que favorecen la interacción de un combustible, un comburente y calor como fuente de ignición eficaz, resultando en la generación de fuego que posteriormente sin un control adecuado se convertirá en un incendio (Quintiere, 2006). En este sentido de ideas, metodológicamente no es posible determinar una causa, si no existe la primicia sobre el origen del fuego.

Tiempo de formación del glóbulo de cobre

El tiempo necesario para fundir un glóbulo de cobre lo modelamos mediante consideraciones esenciales de física. La corriente eléctrica I que fluye en un cable conductor aumenta su temperatura a causa de la resistencia eléctrica R del material (Riveros, 1998). Teniendo la potencia que disipa el cable (energía por unidad de tiempo) P debida al efecto Joule se puede expresar cómo una función de la resistencia eléctrica R (Riveros, 1998):

$$P=I^2R. \quad (1)$$

Por su parte, las condiciones del caso implican que la resistencia tiene un comportamiento de acuerdo con la ley de Ohm, pues consideramos al material como óhmico hasta el punto de la fundición (Matula, 1979), y la frecuencia de transmisión de la corriente alterna no es alta. De modo que la energía térmica neta Q que se disipa en un tiempo t es (Callen, 1985; Quintiere, 2006):

$$Q = Pt = I^2Rt = I^2 \left(\frac{\sigma L}{A} \right) t, \quad (2)$$

Donde σ es la resistividad del cobre, L es la longitud del elemento de masa utilizado y A el área transversal del cable. Por otro lado, el calor necesario para fundir una masa m de cobre incluye la energía suficiente para elevar la temperatura del cobre hasta su punto de fusión, más el calor latente de fusión para cambiar de fase de sólida a líquida. Lo que se puede escribir como (Callen, 1985; Quintiere, 2006):

$$Q=mc\Delta T+mK_f \quad (3)$$

Donde c es el calor específico del cobre, ΔT es el cambio de temperatura de ambiente hasta su fusión, m es la masa del elemento de cobre y K_f es el calor latente de fusión del cobre. Por ser pequeño el glóbulo, la tensión superficial obliga a la masa fundida metálica a adquirir la forma esférica (Aqra y Ayyad, 2011). Su masa se puede escribir en términos de su radio r y su densidad ρ como: $m = \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)$. De acuerdo con esto calor generado al fluir de la corriente eléctrica en el cable es igual al calor necesario para derretir el cobre. Así, igualamos las ecuaciones 2 y 3, y reescribimos la masa en términos de la densidad. Obtenemos la siguiente expresión:

$$I^2 \left(\frac{\sigma L}{A} \right) t = \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) c \Delta T + \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) K_f \quad (4)$$

El área transversal es un círculo y la longitud es el diámetro de la esfera, es decir: $L = 2r$. Entonces, la relación de la ecuación 4 la podemos simplificar como:

$$I^2 \left(\frac{2\sigma}{\pi r} \right) t = \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) (c \Delta T + K_f) \quad (5)$$

El tiempo de fundición es la variable estimable de una medición independiente para el cobre con los datos de σ , ρ , c , K_f y la temperatura de fusión T_f , pues han sido reportadas en la literatura especializada (Lide, 2015), mientras que la temperatura inicial es la temperatura ambiente y r se puede obtener del promedio de las dimensiones de los productos obtenidos en ensayos controlados. Despejando t obtenemos:

$$t(r) = \frac{2\pi^2}{3} \left(\frac{\rho r^4}{\sigma I^2} \right) (c \Delta T + K_f) \quad (6)$$

Tiempo de desplazamiento de partículas incandescentes

Del punto de la fuente las partículas incandescentes son expulsadas sin una dirección preferencial, por lo que podemos suponer una dispersión homogénea de los fragmentos de cobre. Es decir, forma una esfera con centro en la punta del cable. Así, el conjunto de trayectorias proyecta un círculo en la superficie horizontal e inferior a la punta del cable. Si el punto $(X, -Y)$ es parte de la circunferencia, entonces la velocidad mínima de la partícula proyectada según Walker y Syed (2008) es:

$$v_{min0} = \sqrt{g \left(-Y + \sqrt{X^2 + Y^2} \right)} \quad (7)$$

Pueden existir velocidades más altas que v_{min0} para alcanzar el punto $(X, -Y)$, por lo que sus trayectorias pueden ser diversas. Por ejemplo, una partícula a alta velocidad puede alcanzar $(X, -Y)$ en trayectoria recta. Sin embargo, v_{min0} acota la velocidad mínima de las partículas para formar el patrón observado.

Por otro lado, la trayectoria más corta en el patrón circular es la que parte del punto de origen y desciende en caída libre hasta la superficie del material incandescente. La ecuación general de caída libre según Serway y Jewett (2019) es:

$$y(t) = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (8)$$

Considerando que la partícula parte del punto $(0, 0)$ y alcanza la coordenada $(0, -Y)$ podemos escribir:

$$-Y = -v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (9)$$

Es decir

$$\frac{1}{2} g t^2 + v_0 t - Y = 0 \quad (10)$$

Que es una ecuación cuadrática con la forma:

$$a t^2 + b t + c = 0, \quad (11)$$

Donde

$$\begin{aligned} a &= \frac{g}{2}, \\ b &= v_0, \\ c &= -Y. \end{aligned} \quad (12)$$

La solución general de t es (Lehmann, 1990):

$$t = \frac{-v_0 \pm \sqrt{v_0^2 + 2gY}}{g} \quad (13)$$

El tiempo debe ser positivo, por lo que la única solución coherente es:

$$t = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2gY} - v_0}{g} \quad (14)$$

Esta ecuación es congruente, pues depende de la velocidad inicial y una contribución de la distancia vertical, la cual es corregida. Es decir, el tiempo solo es cero cuando $Y = 0$ y aumenta monótonamente siguiendo una ecuación parabólica. Considerando la velocidad mínima de lanzamiento de partículas (Ec. (7)). Podemos escribir:

$$t = \frac{\sqrt{v_{\min 0}^2 + 2gY} - v_{\min 0}}{g} = \frac{\sqrt{g(-Y + \sqrt{X^2 + Y^2}) + 2gY} - \sqrt{g(-Y + \sqrt{X^2 + Y^2})}}{g} \quad (15)$$

Simplificando

$$t = \frac{1}{\sqrt{g}} \left(\sqrt{\sqrt{X^2 + Y^2} + Y} - \sqrt{\sqrt{X^2 + Y^2} - Y} \right) \quad (16)$$

Si consideramos R como el radio del círculo proyectado por las partículas incandescentes, entonces podemos simplificar la ecuación a:

$$t(R(X, Y), Y) = \frac{1}{\sqrt{g}} (\sqrt{R + Y} - \sqrt{R - Y}) \quad (17)$$

Este es el mayor tiempo en que viaja la partícula de la punta del conductor a la base considerando que forma un círculo de radio R. La raíz siempre existe, porque $R \geq Y$. Si la altura es cero, el tiempo es cero. Si $X = 0$, entonces el círculo proyectado solo es un punto, en tal caso el tiempo es $t = \sqrt{(2Y/g)}$, que es un resultado conocido de las ecuaciones de caída libre (Serway y Jewett, 2019). Durante el tiempo de desplazamiento la temperatura de la partícula disminuye de la temperatura de fundición a una inferior que incluso puede ser menor a límite para que el material comience la pirolisis. Completamos este tiempo de desplazamiento con un modelo de disminución de temperatura en función del tiempo.

Modelo de enfriamiento de la esfera

Durante el desplazamiento la esfera se enfría, y mediante la ley de enfriamiento de Newton describimos el cambio de la temperatura en función del tiempo. Considerando que h es el coeficiente de transferencia de calor entre la esfera y el medio, también conocida como constante de enfriamiento. Escribimos la relación de la disminución de la temperatura en el tiempo como (Davidzon, 2012):

$$\frac{dT(t)}{dt} = -h(T(t) - T_{\infty}) \quad (18)$$

Con las condiciones iniciales de $T(0) = T_i$ y por simplicidad supondremos $T_{\infty} \rightarrow T_m$. Es decir, el equilibrio se alcanza a la temperatura ambiente T_m . Por lo que obtenemos:

$$T(t) = T_i \cdot e^{-ht} \quad (19)$$

Con los datos recabados podemos calcular h. Sea la temperatura de fundición T_f , que disminuye hasta la cantidad límite de ignición del material T_2 . En un lapso de t_1 a t_2 . Podemos escribir:

$$h = \frac{1}{t_1 - t_2} \ln \left(\frac{T_1 - T_m}{T_2 - T_m} \right) \quad (20)$$

El modelo es funcional y simple, pues no considera la disminución de temperatura por otros medios, excepto la interacción de la partícula viajando por el aire, formado una corriente de convección de primer orden.

Demostración empírica

Realizamos una demostración clara y efectiva con 10 materiales sólidos combustibles, colocados a una distancia de entre 2.5 cm y posteriormente a 1 cm, respecto a la unión de los polos eléctricos de cables cortocircuitados para generar partículas incandescentes y observar sus efectos en los materiales. Como instalación se utilizó un laboratorio de electromagnetismo para la enseñanza de la física a nivel licenciatura, donde se eliminaron las corrientes de aire cerrando ventanas y puertas, además se conservó la temperatura ambiente promedio a 27°C (300.15 K). Se utilizó una mesa de laboratorio con cubierta de madera, donde se colocó un lienzo negro de tela poliéster para contrastar con el fondo y mejorar la observación de los efectos del cortocircuito. Sobre el lienzo se instaló un soporte universal metálico para sujetar una terminal del cable conductor, debajo de esta terminal, con las puntas enrolladas se colocaron recuadros de 15×15 cm de las muestras de materiales combustibles, respectivamente (figura 1).

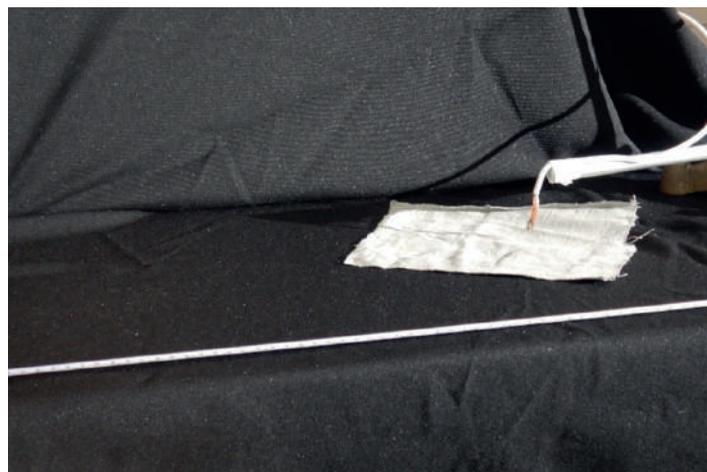


Figura 1. Fotografía del área de experimentación de los cortocircuitos.

El circuito eléctrico se conformó de tres metros de cable dúplex del calibre 14 AWG, en uno de los extremos se colocó una clavija de baquelita para su conexión eléctrica polarizada con un suministro de 122 V en corriente alterna, respaldado por un interruptor termomagnético de 15 A en su respectivo gabinete. En el otro extremo, el forro aislante fue retirado dos cms en ambas terminales, para realizar la unión de la fase y neutro. Además, fue colocado material combustible debajo de ambos cables con las puntas enrolladas, posteriormente, se energiza el circuito y se realizaron los ensayos a 2.5 cm y a una distancia de 1 cm de separación entre el cable y el material combustible. Los conductores energizados fueron unidos y se generó el cortocircuito. Así, se fueron producidas flamas y partículas incandescentes por la fundición de cobre, que contactaron directamente con el material combustible, incluyendo el lienzo negro de colocado al fondo. Este experimento se realizó 2 veces con cada muestra (figura 2).



Figura 2. Fotografía de la maniobra para generar uno de los cortocircuitos sobre materiales sólidos combustibles

El contacto eléctrico se videograbó con una cámara de alta velocidad, Chronos, modelo 1.4.4, con una velocidad de captura de 1,057 fps y una resolución de 1280 x 1024 píxeles. Se utilizó iluminación continua con una lámpara de led, Godox, modelo SL200. Cabe mencionar, que no se utilizó una caja de Faraday para proteger a la cámara de los pulsos electromagnéticos producidos por el cortocircuito, por lo que la cámara no logro registrar algunos eventos pese a estar desconectada de la toma de corriente del laboratorio. Para futuros trabajos es conveniente considerar la protección electromagnética de la cámara.

Los videos obtenidos se editaron en el programa Tracker-Physics, que permite la selección precisa de fotogramas. Así para ajustar el lapso del proceso, se consideraron 20 fotogramas preliminares para marcar el primer fotograma donde hacen contacto los cables y se

produce una iluminación intensa, el último fotograma se consideró después de la producción de las flamas y partículas incandescentes que impactaron en las muestras. Para observar mejor las imágenes, se utilizó un filtro con brillo y contraste de 66 y 73 unidades del programa, respectivamente.

RESULTADOS

Durante el desarrollo de los experimentos se observaron los efectos físicos, los cuales fueron documentados mediante videos, fotografías y mediciones. Se puede consultar el video (con efectos de sonido) de 9 materiales no se incluye el plástico para emplear) que resume la experiencia a 2.5 cm en la dirección electrónica <https://youtu.be/ii9PgRCKUn4>.

En la figura 3, se observan los daños ocasionados por la flama y partículas incandescentes a los materiales sólidos combustibles. En la figura 4 podemos notar la forma en la que se midió el daño a cada una de las muestras, lo que fue documentado.



Figura 3. Fotografía de las muestras colocadas a 1 cm de distancia de la fuente del cortocircuito.



Figura 4. Fotografía con acercamiento de la muestra dañada por los productos del cortocircuito.

En las terminales de los cables utilizados en los cortocircuitos, observados en la figura 5, se puede notar que presentan fusión de cobre con formas de muescas o huecos producidos por la transferencia de material del primer conductor y glóbulos generados por el aporte de material sobre el segundo conductor, en ambos casos debidos al impacto al paso de la corriente eléctrica.



Figura 5. Fotografía de las puntas de los cables con fusión de cobre por cortocircuito.

Los glóbulos o perlas de cobre fundido proyectados durante los experimentos también se recolectaron para observar sus características físicas mediante microscopia estereoscópica, utilizando un equipo marca Leika, modelo EZ4 (figura 6). Es importante mencionar que y mediante es uso de un Tracker-Physics se realizaron mediciones del radio de la circunferencia ajustada a los contornos de los glóbulos (figura 7). El radio mínimo medido fue 0.1164 mm y el máximo de 0.9297 mm, en una distribución asimétrica como puede observarse en la Figura 8, con un valor promedio de 0.3910 ± 0.1803 mm. En cuanto a la forma de la distribución como el tamaño de las partículas, cabe resaltar que estas medidas son coherentes a las reportadas por Riyanto y Ferdian (2023), Yu et al. (2020) y Wang et al. (2022).

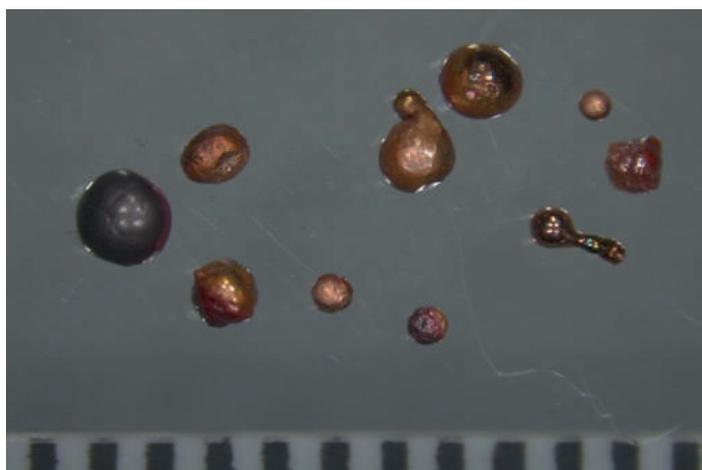


Figura 6. Fotografía de glóbulos de cobre. Un milímetro es representado por el periodo entre líneas.

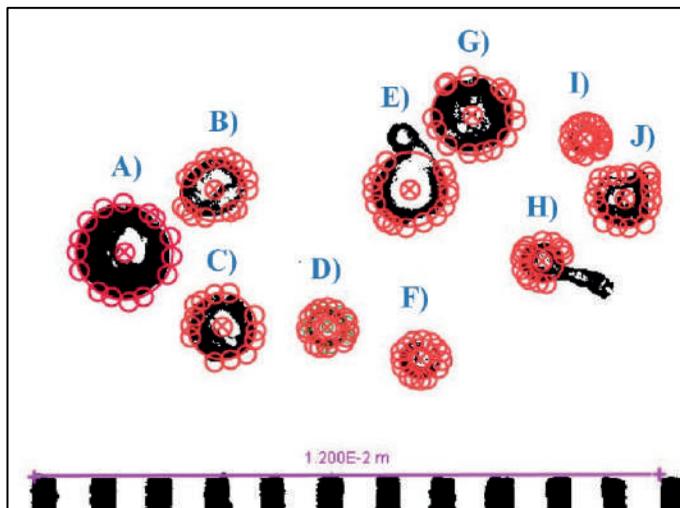


Figura 7. Imagen de las muestras etiquetadas para cada partícula y los puntos marcados para ajustar circunferencias para calcular el radio.

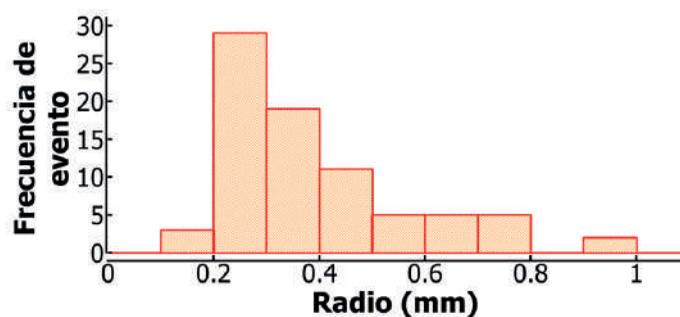


Figura 8. Distribución de los radios de las partículas producidas durante las pruebas de cortocircuito.

Como se mencionó, por medio de video se registraron las distancias de proyección de las partículas incandescentes, tomando como distancia de proyección su localización, ya que las partículas impactan en la superficie horizontal y rebotan. También fue documentado el radio del daño causado por los efectos del cortocircuito a los recuadros. Por último, fue registrada durante la experimentación, una combustión autosostenida que progresó en la generación de fuego en el material sólido combustible; resaltamos que este efecto únicamente fue observado en la espuma rígida de poliuretano que se encontraba a 1 cm de altura. Los resultados se resumen en la tabla 1, en cuanto a las temperaturas de ignición a las que se hacen referencia en la tabla fueron obtenidas de la literatura (*National Fire Protection Association -NFPA-*, 2024; NFPA, 2009).

Tabla 1. Cortocircuitos a 2.5 cm del material y con puntas enroscadas de los cables.

#	Material Combustible	Composición	Temperatura de ignición (°C)	Distancia de proyección (cm)	Radio del daño (mm)	Distancia de proyección (cm)	Radio del daño (mm)
				Altura 2.5 cm		Altura 1.0 cm	
1	Guata	Poliéster	450-560	12	0.5-2.0	15	0.5-1.0
2	Mezclilla	Algodón	255-400	18	0.5	40	0.25-1.5
3	Chifón	Rayón	790	21	0.5-1.5	43	0.25
4	Servilleta	Celulosa de baja densidad	255	24	0.5-1.0	40	0.25-2.0
5	Cartón Kraft	Celulosa	300-400	18	0.5-1.0	42	0.25-1.25
6	Cartón corrugado	Celulosa	300-400	9	0.25-0.5	40	0.25-1.0
7	Hule cristal	PVC	250-430	26	0.5-1.0	65	0.25-1.0
8	Acrílico	Polímero de metil metacrilato	460-565	14	0.25	75	0.25-1.0
9	Espuma rígida	Poliuretano	271-378	10	0.25-2.0	40	1.0-2.0
10	Plástico para emplayar	Poliétileno de baja densidad	350-390	26	0.5-3.0	65	0.5-3.0

Método Montecarlo para la estimación de parámetros

El método Montecarlo, aplicado para obtener incertidumbres, es una técnica de cálculo que permite simular diferentes escenarios posibles mediante la generación de variables aleatorias (Curiel, 2019). Por lo regular, se emplea una computadora para obtener una cantidad de datos representativa de simulaciones, esto posibilita la estimación de incertidumbres complejas en sistemas con múltiples variables interdependientes, ofreciendo una visión estadística robusta de los posibles resultados. Su efectividad radica en su capacidad para manejar problemas no-lineales y distribuciones de probabilidad no-gaussianas en la entrada de datos. Es especialmente útil en situaciones donde los métodos analíticos tradicionales son poco prácticos. Sin embargo, requiere una gran cantidad de rondas de cálculos, ya que su precisión depende del número de simulaciones, de modo que solo son realizables en computadoras. Cuanto mayor sea este número, más precisa será la estimación cuando converge en un valor, pero también mayor será el costo computacional. Además, los resultados obtenidos dependen en gran medida de la calidad y representatividad de las distribuciones de probabilidad

iniciales que se utilizan para modelar las variables. En este contexto, la "Máquina de Incertidumbre" (<https://uncertainty.nist.gov>) del *National Institute of Standards and Technology* -NIST, por sus siglas en inglés se presenta como una herramienta avanzada y de fácil implementación del método Montecarlo. Este es un software que permite realizar simulaciones y análisis de incertidumbre con precisión y confiabilidad (Possolo y Mejia, 2020). Sin embargo, es importante considerar que este programa no elimina la necesidad de una correcta definición del modelo y sus parámetros, lo cual sigue siendo crítico para el éxito en la estimación de incertidumbres.

En este estudio se utilizó la versión 1.6.2 de la Máquina de Incertidumbre con 106 rondas, definiendo 14 variables para realizar los cálculos de las ecuaciones 6, 17 y 20. Las propiedades del cobre según Lide (2015) y mostradas en la tabla 2, se consideraron como distribuciones gaussianas con desviaciones estándar equivalentes a la mitad de la mínima cifra significativa, dado que estas son mediciones conocidas y estables (Possolo y Mejia, 2020). El mismo criterio se aplicó al valor de g y a las temperaturas, las cuales se registraron en grados kelvin.

Propiedad	Densidad	Resistividad	Calor específico	Temperatura de fusión	Calor latente de fusión
Símbolo	ρ	σ	c	T_f	K_f
Unidad	kg/m ³	$\Omega \cdot m$	J/kg·K	K	kJ/kg
Valor	8,960	1.68×10^{-8}	385	1,358	205

Asimismo, las mediciones de las alturas fueron modeladas con distribuciones gaussianas. Sin embargo, otros parámetros presentaron distribuciones distintas a esta. El valor de la corriente eléctrica se modeló como una distribución uniforme en un rango de 500 a 1000 A, que representa el intervalo mínimo en los picos de amperaje en caso de cortocircuito (Riyanto y Ferdian, 2023; ASTM, 1995).

Las mediciones del alcance horizontal se modelaron como distribuciones uniformes en un intervalo de 0.25 a 1 cm. Para las alturas de 1 cm y 2.5 cm, se utilizaron distribuciones uniformes con intervalos de 1 cm y 2 cm, respectivamente.

De acuerdo con los resultados de la Figura 8, la distribución del radio de las partículas se modeló como una distribución triangular asimétrica, cuyos parámetros (límite inferior, moda y límite superior) fueron: 0.1, 0.2 y 0.6 mm, respectivamente. Con estos datos, se obtuvieron las figuras 9 y 10. El tiempo de fundición del cobre en glóbulos es 2.86 ms, sin superar los 3.59 ms, lo que justifica el utilizar cámaras de alta velocidad para registrar el efecto del cortocircuito.

Por otro lado, los tiempos de vuelo de las partículas fueron 60.67 ± 5.59 ms para una altura de un 1 cm, 94.93 ± 4.72 ms para una altura de 2.5 cm. El valor de la constante de enfriamiento más probable es de 26.9 s^{-1} en un intervalo entre 19.9 y 33.9 s^{-1} . Estos valores son coherentes con la literatura especializada (Holman, 1999, p.34; Dewitt et al., 2006, p.8). Las estimaciones presentadas son valiosas para el modelado de fenómenos relacionados con la producción de incendios. En particular, demuestran que la generación de fuego requiere que las partículas incandescentes contacten más allá de la superficie del material sólido. De lo contrario, no se produce el intercambio térmico necesario para promover la pirólisis y, por tanto, la generación y autosostenimiento del fuego.

En otras palabras, las condiciones en las que un cortocircuito puede causar un incendio requieren factores adicionales, más allá de la simple presencia del fenómeno eléctrico. Es crucial que la distancia entre la fuente de partículas incandescentes y el material sea del orden de un centímetro, especialmente en conexiones eléctricas de viviendas. Además, es necesario que estas partículas penetren en el material, permitiendo que la transferencia de calor se realice por contacto, un mecanismo más eficiente para desencadenar el proceso de ignición.

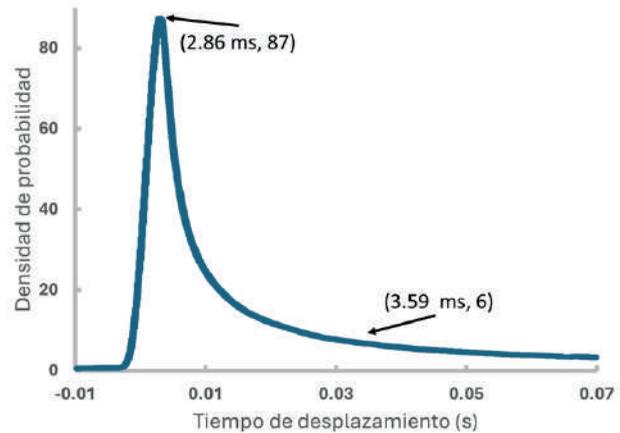


Figura 9. Resultados Montecarlo de la estimación del tiempo de fundición del glóbulo de cobre.

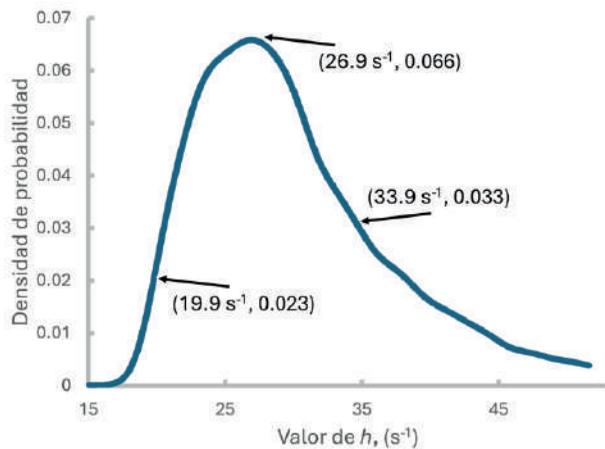


Figura 10. Resultados Montecarlo de la estimación de la constante de enfriamiento.

DISCUSIÓN

La creación del fuego requiere cuatro elementos esenciales que conforman la teoría del “tetraedro del fuego”, la cual está conformada por: 1) combustible, 2) comburente, 3) calor o fuente de ignición eficaz y 4) reacción química en cadena; con la interacción de estos cuatro elementos se puede generar fuego en los materiales combustibles (Quintiere, 2006).

De los resultados de los experimentos de cortocircuito sobre materiales sólidos combustibles, se determina que el diámetro promedio de las partículas generadas es insuficiente para almacenar o retener calor durante un tiempo adecuado para causar el fuego. Es decir, existe transferencia de calor desde las partículas incandescentes de cobre fundido y la flama al material combustible, pero por un lado exiguo para que el material combustible se caliente lo necesario e inicie un proceso de descomposición química autosostenida; por el otro el tiempo de contacto entre el material combustible y las partículas incandescentes es menor a un segundo por lo que si existe un contacto, pero no con el tiempo suficiente para que el calor sea transferido adecuadamente al material combustible. Por ende, con estas condiciones descritas no se puede producir la pirólisis del material combustible para la generación de combustión autosostenida.

Del análisis anteriormente descrito podemos establecer que, se cuenta con tres elementos del tetraedro del fuego. Primero, podemos mencionar a los materiales combustibles en estado sólido como las telas, y plásticos, entre otros; segundo, el comburente obtenido del oxígeno del medio ambiente y por último las fuentes de ignición como llama o partículas incandescentes de cobre fundido. Es importante mencionar que estas últimas partículas, no podemos considerarlas como fuentes de ignición eficaz o competentes, ya que por su diámetro no retiene calor suficiente para que sea transferido adecuadamente al

material combustible, además que el tiempo de contacto es instantáneo lo que no permite la reacción química en cadena.

En futuros trabajos de investigación se deberán utilizar materiales con un grosor mayor que permita la penetración para que las partículas impacten directamente sobre las muestras.

CONCLUSIONES

Se realizaron 20 cortocircuitos eléctricos sobre 10 materiales combustibles sólidos diferentes, que permitió estudiar y documentar los efectos ocasionados, como la generación de flama y proyección de partículas incandescentes de cobre fundido. De la primera fase de ensayos a una distancia de 2.5 cm y con las terminales de los cables enrollados sobre los 10 materiales, no existió generación de fuego. En la segunda fase con 10 materiales a 1.0 cm de distancia y los cables enrollados, solo en la espuma rígida de poliuretano se generó fuego autosostenido.

Con estos resultados podemos mencionar que en materiales sólidos combustibles expuestos a flama y partículas incandescentes de cobre fundido producidos por un cortocircuito eléctrico, no se encontró una fuente de ignición eficaz o competente para generar fuego, por lo que existe una baja probabilidad de ocurrencia de incendio derivado de un cortocircuito. Cabe mencionar que esta probabilidad disminuye considerablemente a medida que los materiales sólidos combustibles se localizan a una distancia mayor de la fuente donde se genere el cortocircuito, llegando a un punto en donde la partícula incandescente carecerá de calor suficiente para transferirlo al material sólido combustible y no se podrá generar fuego.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Donají Xóchitl Cruz López, del laboratorio de electricidad de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México; a Maribel Gómez Pérez y a Vania Guadalupe Olguín Quiroz, por su asistencia en el trabajo y al programa CATIC 2023.

REFERENCIAS

- Aqra, F., y Ayyad, A. (2011). Surface energies of metals in both liquid and solid states. *Applied Surface Science*, 257(15), 6372-6379. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.01.123>
- ASTM . (1995). *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens* (ASTM E3-95). Annual Book of ASTM Standards, 3(1-8).
- Callen, H. (1985). *Termodinámica, Introducción a las teorías físicas de la termostática del equilibrio y de la termodinámica irreversible*. Wiley.
- Curiel, L. (2018). Simulaciones Montecarlo para análisis de la incertidumbre en mediciones criminalísticas [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio Universidad Nacional Autónoma de México.
- Davidzon, M. (2012). Newton's law of cooling and its interpretation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21-22), 5397-5402.
- Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., Lavine, A. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass transfer* (6a ed.). John Wiley & Sons.
- Holman, J. (1999). *Transferencia de calor*. CECSA.
- Kaur, E., Singh, J., y Awasthi, S. (2022). *Fire Investigation: Arson or Accidental*. En Singh, J., Sharma, N. R. (eds) *Crime Scene Management within Forensic Science* Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6683-4_12
- Korinek, T. (2022). FE Investigation and Analysis of Poor Electrical Connections and Related Fire Investigation Case Studies. *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, 39(1), 57-69.
- Lehmann, C. (1990). *Geometría analítica* (14 ed.). Noriega.
- Lide, D. (2015). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (95th ed.). CRC Press.
- Matula, R. (1979). Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 8(4), 1147-1298. <https://doi.org/10.1063/1.555614>
- National Fire Protection Association -NFPA-. (2009). *Manual de Protección Contra Incendios* (5a ed.). NFPA. National Fire Protection Association -NFPA-. (2024). *Guía para Investigaciones de Incendios y Explosiones* (NFPA 921). <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/nfpa-921-standard-development/921>
- Possolo, A., y Meija, J. (2020). *Measurement Uncertainty: A Reintroduction*. Sistema Interamericano de Metrología
- Quintiere, J. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. Wiley & Sons, Ltd.
- Riveros, H. (1998). *Electricidad y magnetismo, preguntas y respuestas*. Trillas.
- Riyanto, S. A., y Ferdian, D. (2023). Forensic Investigation of Electrical Conduct Copper Bead Microstructure as an Effort to Identify Causes of Fire. *Jurnal Mesin Nusantara*, 6(2), 179-192. <https://doi.org/10.29407/jmn.v6i2.20180>

Serway, R. , y Jewett, J. (2019). *Física para ciencias e ingeniería*. CENGAGE Learning.

Stauffer, É. (2020). Interpol review of fire investigation 2016–2019. *Forensic science international: Synergy*, 2, 368-381.

Svare, M. y Hanke, N. (2023). Forensic Examination of Post-Fire Damaged Electrical Conductors by Quantitative Measurement. *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, 40(1), 41-55.
<https://doi.org/10.51501/jotnafe.v40i1.856>

Walker, E., y Syed, R. (2008). Tiger tales: A Critical Examination of the Tiger's Enclosure at the San Francisco Zoo. *arXiv: Physics and Society*, 1-4.

Wang, G., Chen, T., Wang, Z., Gao, Z., y M, W. (2022). Beads and Globules from Fires: Can They Be Differentiated through Metallurgical Analysis Based on Machine Learning Algorithms? *Fire*, 5(4), 123.
<https://doi.org/10.3390/fire5040123>

Yan, H., Marr, K. C., y Ezekoye, O. A. (2021). Towards fire forensic characteristics of failed cylindrical format lithium-ion cells and batteries. *Fire Technology*, 57, 1723-1752.
<https://doi.org/10.1007/s10694-020-01079-6>

Yu, Z., Chen, S., Deng, J., Xu, X., y Wang, W. (2020). Microstructural characteristics of arc beads with overcurrent fault in the fire scene. *Materials*, 13(20), 4521. <https://doi.org/10.3390/ma13204521>

