

Simulación de proceso de división de arco eléctrico en interruptor de bajo voltaje con campo magnético variable

Arc splitting process in low voltage switching devices considering variable magnetic field

Tomás Moreno-Torres¹, José Manuel Luna², Jesús García-González²,
J. Luis Luviano-Ortiz¹, Abel Hernández-Guerrero^{1*}

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca - Valle de Santiago km 3.5 + 1.8, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, México. C.P. 36885. Correo electrónico: abel@ugto.mx.

² Departamento de Ingeniería, Grupo SSC.

*Autor de correspondencia

Resumen

El arco eléctrico es un fenómeno complejo que asocia altas temperaturas y densidades de corriente, por lo cual debe ser erradicado de manera casi inmediata para evitar posibles daños en la red eléctrica de las edificaciones y sistemas de potencia. Una pronta extinción de arco eléctrico en interruptores de bajo voltaje conlleva a la seguridad y protección de dispositivos electrónicos como de sus operadores. Dado que los tiempos de formación y propagación del arco eléctrico son del orden de microsegundos, la toma de decisiones mediante experimentación para el diseño de nuevos interruptores resulta extremadamente costosa y, en muchas ocasiones, poco práctica al no poder cuantificar variables específicas del arco eléctrico. Debido a lo anterior, el modelado es una excelente herramienta para analizar los parámetros más influyentes en la interrupción de corriente. Esta opción permite la optimización de sistemas sin la necesidad de construir y probar una gran cantidad de prototipos con elevados costos. De esta manera se puede profundizar en el análisis y conocimiento de estos dispositivos mediante la propuesta de un modelo magnetohidrodinámico, y así cuantificar variables que experimentalmente resultaría imposible obtener.

Palabras clave: Arco eléctrico; placa divisora; interruptor de bajo voltaje; modelo magnetohidrodinámico; simulación.

Abstract

Electric arc is a complex phenomenon that associates high current densities and temperatures; therefore, this must be extinguished rapidly to avoid future damage in low voltage devices. An early extinction of electric arc in low voltage switching devices leads to safety in industrial processes and protects electronic devices as well as their operators. Since the formation and propagation time is small (micro-seconds), the decision-making through experimentation for the design of new switch models is costly and often ineffective for not being capable of quantifying specific variables of the electric arc. To obtain and propose improvements in the design of low voltage switches, modeling is an excellent tool to analyze the most influential parameters in the current interruption. This option allows systems optimization by a magnetohydrodynamic model without building and testing a lot of expensive prototypes.

Keywords: Electric arc; splitter plate; circuit breaker; magnetohydrodynamic model; simulation.

Recibido: 17 de noviembre de 2017

Aceptado: 11 de enero de 2019

Publicado: 30 de octubre de 2019

Como citar: Moreno-Torres, T., Luna, J. M., García-González, J., Luviano-Ortiz, J. L., & Hernández-Guerrero, A. (2019). Simulación de proceso de división de arco eléctrico en interruptor de bajo voltaje con campo magnético variable. *Acta Universitaria* 29, e2148. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2148>

Conceptos Introdutorios

Interruptores de bajo voltaje (*circuit breakers*)

Interruptores de bajo voltaje son dispositivos importantes en sistemas de potencia para la seguridad y protección de sistemas y de los operadores de estos. Son utilizados para una interrupción de corriente eléctrica de una manera confiable y segura ante cualquier falla en equipos eléctricos y electrónicos, indispensables hoy en día en el uso cotidiano del mundo moderno. Las aplicaciones de los interruptores de bajo voltaje son innumerables, estas van desde el uso doméstico, como apagar una bombilla, hasta complicados selectores de transferencia utilizados en la industria, en la figura 1 se presentan algunos ejemplos ilustrativos.

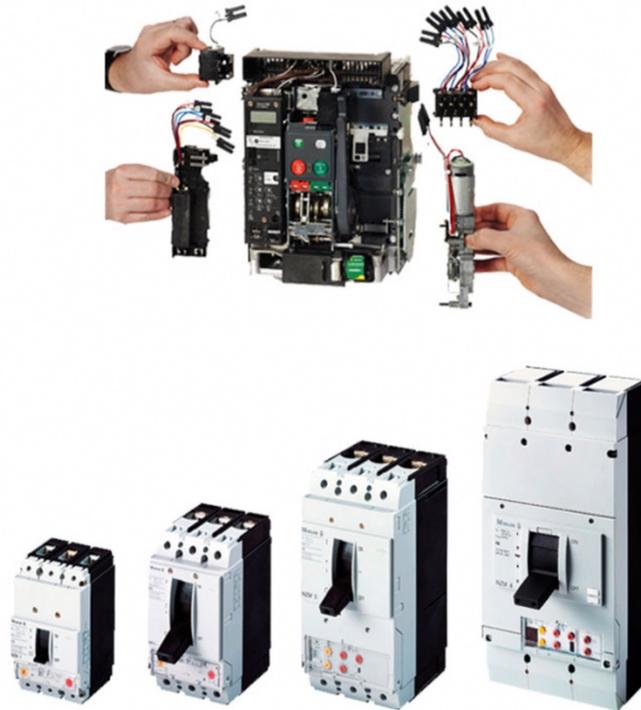


Figura 1. Ilustración de interruptores de bajo voltaje.
Fuente: Moeller-Melcsa (2014).

Contactos en corriente directa (DC)

Las recientes tecnologías han incrementado la demanda de productos que funcionen con alimentación en DC (figura 2), donde la principal dificultad de los dispositivos en DC es interrumpir la corriente. Dicha tarea es posible al hacer una separación entre contactos para cortar de esta manera la corriente o, bien, redirigirla, según sea el caso. Cuando los contactos son separados se genera un arco eléctrico, el cual debe ser extinguido de alguna manera para poder cortar, finalmente, con el flujo de corriente y evitar futuros problemas con la instalación en cuestión. Los arcos de alto voltaje son capaces de generar un daño significativo en los electrodos que componen a los cortacircuitos y a los contactos, acortando su tiempo de vida debido a las altas temperaturas presentes en dicho fenómeno físico, las cuales propician la erosión de los materiales que componen los contactos, por ello es importante de minimizar el tiempo de duración de los arcos eléctricos y extinguirlos de una manera efectiva (Nilsson, 2014).



Figura 2. Ilustración de contactos en interruptores de bajo voltaje, vista externa. Los contactos se encuentran dentro del interruptor, mostrando solo los accionadores de los contactos.
Fuente: GE Industrial Solutions (2013).

Arco eléctrico y teoría MHD

El fenómeno de arco eléctrico es un tópico que en los últimos años ha tenido un interés creciente en cuanto a su investigación, lo anterior se debe a su gran campo de aplicaciones a nivel industrial, tal es el caso de soldadura con arco eléctrico, interruptores, hornos de arco, entre otros. La figura 3 ilustra la forma física de un arco eléctrico.

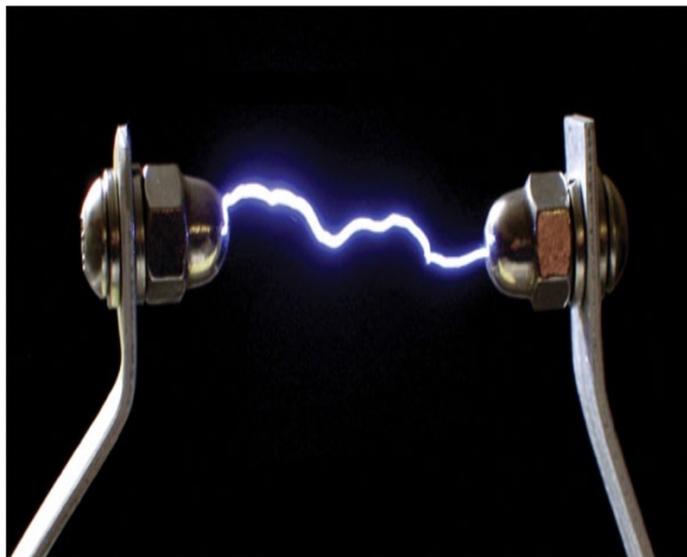


Figura 3. Ilustración de un arco eléctrico.
Fuente: Energy Management (2014).

El arco eléctrico representa un modelo fisicomatemático complejo debido al gran número de fenómenos físicos que interactúan al mismo tiempo durante su formación, propagación y extinción, en tiempos excesivamente cortos del orden de microsegundos, lo que propicia que el grado de complejidad en un estudio de arco eléctrico sea aún mayor. Para poder dar solución a este tipo de problemas, deben ser tomados en cuenta conocimientos relacionados con dinámica de fluidos, electromagnetismo y termodinámica.

Para explicar la interacción de estos fenómenos es indispensable el uso de la teoría magnetohidrodinámica (MHD), esta disciplina estudia la dinámica de fluidos en presencia de campos eléctricos y magnéticos y, específicamente, los efectos que aparecen por estas interacciones al contar con un fluido en movimiento. De manera general, cuando el medio de interacción para la formación del arco eléctrico es aire, este se forma una vez que el aire es ionizado, convirtiéndose así en un conductor eléctrico que permitirá el paso de una corriente eléctrica a través de él. Con el paso de la corriente a través del fluido se produce el calentamiento excesivo en el medio, convirtiendo así el aire en plasma. Dadas las altas temperaturas del plasma, el arco eléctrico posee características eléctricas, magnéticas y térmicas que ningún otro conductor tiene (Iturregi, Barbu, Torre, Berger & Zamora, 2017; Mutzke, Ruther, Kurrat, Lindmayer & Wilkening, 2007), por lo que es necesario aplicar la teoría MHD.

Formación y mantenimiento del arco eléctrico

La formación del arco eléctrico depende principalmente de la separación de los contactos, la corriente aplicada y la ionización en el medio de interacción. Cuando comienza la separación entre contactos, el arco eléctrico aparece y se mantiene si la corriente es suficiente para generar un incremento en la temperatura que fusione el metal, lo volatilice y, de esta manera, ionizar el medio junto con una adecuada distancia de separación entre electrodos. El valor de la corriente es importante al comienzo de la separación de los contactos; si la corriente es baja, el incremento en la temperatura no es suficiente para la ionización del medio ni, por tanto, para la formación del arco (Iturregi, 2013; Nilsson, 2014).

Durante el proceso de apertura de los contactos eléctricos, el medio aislante se convierte en un conductor, permitiendo la circulación de la corriente eléctrica mediante el arco eléctrico. Los gases a temperatura ambiente se comportan como medios aislantes debido a que su composición de átomos y moléculas eléctricamente es neutra. Por lo tanto, es necesaria la presencia de iones y electrones libres en el gas para poder comportarse como un conductor; es decir, es necesario ionizar el gas. Dicha ionización del gas depende de varios factores, tales como temperatura, presión y potencial de ionización del gas. A temperatura ambiente, la cinética del gas es insuficiente para generar la disociación de moléculas por colisión. Sin embargo, al incrementar la temperatura del gas, y por tanto su energía cinética molecular, el gas puede absorber suficiente energía para disociarse a tal grado que se ionice y alcance un estado de plasma. Al comienzo del arco, suficientes electrones son lanzados del cátodo y el movimiento de estos electrodos del cátodo al ánodo causa la ionización del medio. Dicha ionización provoca una rápida aparición de electrones adicionales que permiten mantener al arco. Entonces, el gas no es calentado por agentes externos, sino por la energía presente del mismo arco, conservando así su estado de plasma (Iturregi, 2013).

Características del arco eléctrico

Durante la ionización, el arco se comporta como un conductor con una conductividad que va de 10 S/cm a 100 S/cm, dependiendo de la temperatura que este alcance. Se pueden distinguir tres regiones que

constituyen el arco eléctrico; zona central o columna, región del ánodo y región del cátodo (raíces de arco), como se muestra en la figura 4.

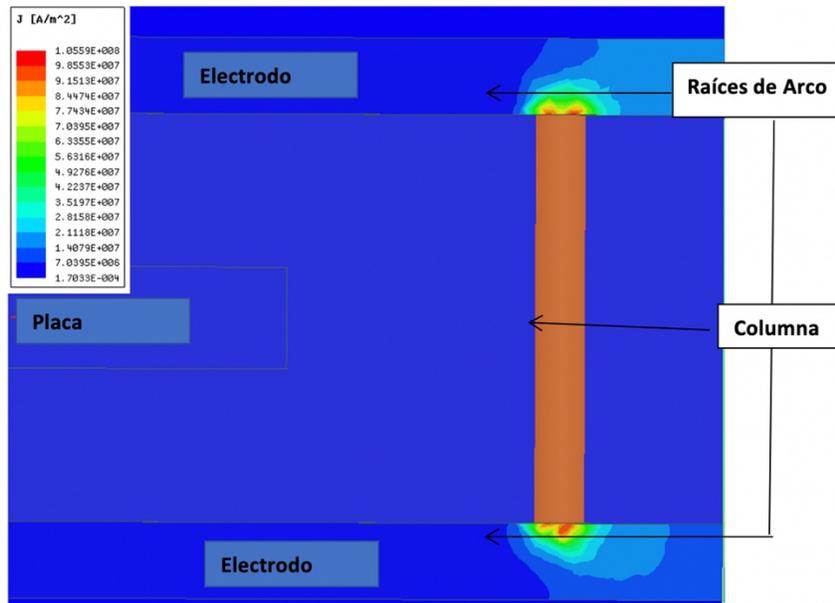


Figura 4. Ilustración de partes de arco eléctrico mediante modelo generado en ANSYS Maxwell. *Dimensiones: electrodos de 4 mm × 1.5 mm × 16 mm, separados entre ellos 8 mm. Placa divisora de dimensiones 4 mm × 2 mm × 7 mm
Fuente: Elaboración propia.

- La región del cátodo está llena de vapores de metal del cátodo, con muchos iones positivos y un número pequeño de electrones, caracterizada por un fuerte campo eléctrico y temperaturas elevadas, así como por altas densidades de corriente al igual que en la columna. El cátodo provee de electrones que son impulsados por el fuerte campo eléctrico existente, estos con suficiente energía para ionizar otras partículas neutras.
- En la columna del arco, el flujo de corriente está dado por el desplazamiento de electrones. Esta zona contiene un exceso de iones positivos que neutraliza la carga de los electrones y contiene altas densidades de energía con pequeñas caídas de voltaje.
- En las cercanías del ánodo, como resultado del rechazo de iones positivos y la atracción de electrones, hay una región con carga positiva que causa una fuerte caída de voltaje, llamada caída anódica.

La energía perdida en las caídas de voltaje en cada región es convertida en calor y disipada a los alrededores mediante conducción, convección y radiación. La energía calórica disipada propicia zonas con temperaturas entre 7 000 K y 25 000 K. La disociación molecular del medio, la difusión de iones y moléculas, conductividad y capacidad térmica de los electrodos, así como las condiciones físicas de los alrededores del arco, tienen una gran influencia en la disipación de calor y, por tanto, en la temperatura y presión de la columna del arco. Otra característica importante del arco eléctrico es el hecho de que la conductividad térmica y la viscosidad varían con la temperatura (Mutzke *et al.*, 2007; Prabu, 2014).

Consecuencias del arco eléctrico

La presencia de un arco eléctrico tiene consecuencias positivas y negativas. Entre los aspectos positivos son que el arco provoca un decremento suave en la corriente hasta llegar a cero; en caso de que ocurriese lo contrario, y que la corriente callera repentinamente a cero, la energía almacenada en la inductancia (L) causaría un sobre voltaje, acorde a la ecuación 1:

$$V = -L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

En la mayoría de los casos, sobrepasar los valores establecidos de voltaje puede causar graves problemas a los equipos conectados a la línea de corriente; los problemas pueden ir desde el desgaste prematuro de los equipos, posibles incendios o destrucción de estos. Sin este fenómeno, los diseñadores de interruptores deberían solucionar el problema de las sobrecargas generadas; de aquí que el arco eléctrico sea un fenómeno físico indispensable en la interrupción de corriente. Sin embargo, otras consecuencias de los arcos es que pueden ser fatales para los interruptores (figura 5), afectando su diseño y la selección de materiales para su construcción. La erosión del material de los contactos es uno de los problemas más grandes presentes en la formación de arcos, reduciendo el tiempo de vida esperado durante el diseño de estos dispositivos. Este fenómeno ocurre en ambos electrodos, ánodo y cátodo, debido al calentamiento excesivo que sufren durante la formación y propagación del arco, excediendo la temperatura de fusión y ebullición del material de diseño. La temperatura del arco es tan alta que la erosión del material ocurre durante el movimiento del arco que mantiene contacto con las superficies. La erosión depende de muchos parámetros relacionados con el arco y con el diseño de los interruptores, tales como:

- corriente del circuito
- tiempo de propagación del arco
- apertura de los contactos
- material de diseño en los contactos
- tamaño y forma de los contactos
- movimiento del arco



Figura 5. Daño provocado por fallas eléctricas en instalaciones.
Fuente: Energy Management (2014).

Interrupción de arco eléctrico en DC

La operación de interrupción de arco generalmente se basa en modificar la conductividad del arco eléctrico reduciendo su energía; por lo tanto, una forma de lograr extinguir el arco es produciendo un enfriamiento en la temperatura del plasma, esta acción involucra la recombinación de partículas y reduce el grado de ionización y conductividad en el arco. Existen varios métodos aplicados para tratar este fenómeno, especialmente, para limitar la corriente:

- mover y ensanchar el arco
- apretarlo entre paredes aislantes
- enfriándolo por gases en las paredes

Cuando los contactos comienzan a separarse, la corriente no desaparece instantáneamente, manteniendo un flujo a través del arco formado entre los contactos y, posteriormente, entre las correderas de arco. Por esto, a diferencia de los circuitos AC, en los circuitos DC es necesario forzar que la corriente sea cero para disipar el arco. Aunado a lo anterior, también es necesario disipar la energía magnética almacenada en el circuito, donde el comportamiento del circuito queda dado por la ecuación 2:

$$E = L \frac{dl}{dt} + RI + U_a \quad (2)$$

Agrupando términos en la ecuación 2, es posible representar las variaciones presentes como una sola diferencia de potencial, como se muestra en la ecuación 3:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} [(E - RI) - U_A] = \frac{V}{L} \quad (3)$$

En la ecuación 3 se observa que una reducción del voltaje en el arco implica una disminución de la corriente; por lo cual, el voltaje del arco se debe disminuir rápidamente para forzar que la corriente sea cero y con esto extinguir el arco (Iturregi, 2013; Nilsson, 2014).

Acorde al estado del arte referente, el método más efectivo es separar el arco en una serie de arcos más pequeños mediante placas divisoras metálicas, generalmente de acero, debido a que sus propiedades ferromagnéticas atraen y mantienen el arco en las placas divisoras. Así pues, el voltaje del arco es incrementado mediante múltiples caídas anódicas y catódicas, disminuyendo del mismo modo su energía al separarlo gradualmente. Durante la división del arco en las placas, se debe tener presente una caída de voltaje adicional en cada lado de la placa, esto se logra al doblar la columna de plasma, y apretándolo de nuevo en contra de la parte frontal de la placa divisora. Este comportamiento ha sido verificado a través de mediciones y descrito a detalle en el estado del arte (Mutzke *et al.*, 2007; Prabu, 2014).

Metodología

Principios del método de simulación

El comportamiento del arco está dado por la interacción de fenómenos magnetostáticos, flui-dinámicos y térmicos, dando lugar a los fenómenos MHD cuya disciplina es la encargada de estudiar la interacción de estos fenómenos físicos. La idea base de la MHD es que los campos magnéticos pueden inducir fuerzas de flujo en un conductor, provocando así su movimiento, variando a la vez, con el paso del tiempo, el campo magnético del fluido de estudio. Las ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden que describen este fenómeno son una combinación de las ecuaciones de momento de Navier–Stokes de la dinámica de fluidos (ecuaciones 4-6) encargadas de describir el flujo de aire caliente en el dominio de fluido:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \bar{V}) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla h \right) + \sigma E^2 - q_{rad} + q_{\eta} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{V}) = \nabla \cdot (\eta \nabla v) + \frac{\partial \rho}{\partial x} + (\bar{J} \times \bar{B}) \quad (6)$$

Junto con las leyes de Maxwell del electromagnetismo, las cuales describen la columna de energía eléctrica que representa el arco eléctrico y con los campos eléctricos y magnéticos generados por el mismo arco, ecuaciones 7-9:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (7)$$

$$\nabla \times \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \times \bar{B} = 0 \quad (9)$$

donde el campo magnético \vec{B} y eléctrico \vec{E} están dados por las ecuaciones 10 y 11:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{H} \quad (10)$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (11)$$

Como se ilustra en la figura 6, la corriente que atraviesa la columna del arco genera un calentamiento de Ohm o efecto Joule. El efecto Joule es un fenómeno irreversible en el que, al circular una corriente eléctrica en un conductor, parte de la energía cinética de los electrones en la corriente se transforma en calor debido a los constantes y continuos choques que sufren con los átomos del material. De igual forma, la corriente presente en el arco induce un campo magnético que, a su vez, da lugar a fuerzas de atracción magnéticas conocidas como fuerzas de Lorentz.

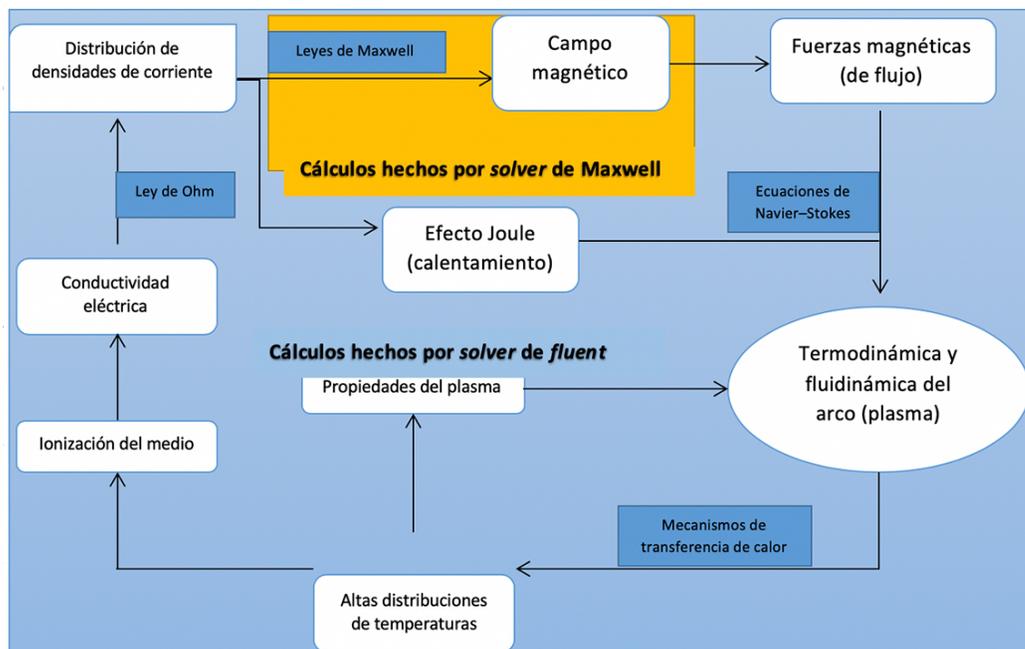


Figura 6. Procesos físicos que interactúan en la formación y propagación de arco eléctrico, así como en la función de cada solver en la resolución del modelo matemático.
Fuente: Elaboración propia.

Tanto las fuerzas de Lorentz como el calentamiento de Ohm son considerados términos fuente en las ecuaciones de Navier-Stokes, propiciando así el movimiento y el calentamiento de la columna de plasma en el arco. El calentamiento presente en el arco eléctrico permite, mediante los mecanismos de transferencia de calor, altas distribuciones de temperatura, tanto en el arco como en sus alrededores. Las temperaturas en algunos puntos entre 20 000 K y 30 000 K (Mutzke et al., 2007; Prabu, 2014), así como las altas presiones generadas, permiten que el plasma se mantenga junto con sus propiedades, las cuales influyen directamente en el comportamiento del arco.

Las altas temperaturas presentes junto con un valor suficiente de corriente permiten la ionización del medio, el cual pasa de ser un aislante a ser un conductor, al variar su conductividad eléctrica; la conductividad eléctrica, por su parte, afecta al potencial eléctrico, el cual conlleva una relación con la densidad de corriente acorde a lo propuesto por Ohm, cerrando de esta manera el ciclo del arco eléctrico.

Justificación del modelo desarrollado

Una vez presentada la importancia de los interruptores de corriente directa, aclarado el concepto de arco eléctrico y sus consecuencias, junto al complejo modelo matemático que este representa, en este manuscrito se representa un modelo reducido de cámara de división de arco eléctrico, simplificado a una sola placa divisora, sin considerar los típicos materiales ferromagnéticos utilizados para una mejor división de arco. Lo anterior se hace con el objeto de reducir los tiempos de simulación para, posteriormente, comparar los resultados obtenidos con resultados ya reportados previamente en artículos científicos, tanto experimentales como numéricos (Nilsson, 2014; Prabu, 2014). La finalidad es garantizar que se cuenta con una propuesta de modelo numérico adecuado; una vez logrado el objetivo principal, se plantea extender los modelos propuestos a geometrías y dimensiones reales, buscando proponer nuevas geometrías de interruptores, cámaras de división de arco y *stacks* de placas divisoras que garanticen una pronta extinción de arco eléctrico.

Consideraciones

Para la generación y reproducción del modelo propuesto se consideran los siguientes puntos:

- Campo magnético variable, calculado cada time step. Esta consideración es la aportación más importante del modelo aquí propuesto. Tras una extensa búsqueda, solamente se reporta un artículo de carácter internacional con dicha consideración.
- Propiedades del aire-plasma tales como conductividad eléctrica y térmica, calor específico, viscosidad y densidad se encuentran en función de la temperatura.
- No se consideran condiciones de simetría en el modelo 3D.
- No se considera algún modelo de radiación.
- No se considera ignición del arco o apertura de contactos.
- No se considera modelo de caídas de voltaje en las raíces de arco.

Modelo: Geometría y condiciones de Frontera

Se considera una cámara de propagación simple, buscando reducir los tiempos de simulación, compuesta por dos electrodos de cobre, al igual que una placa divisora del mismo material y su correspondiente dominio de fluido, en este caso, aire. Las dimensiones de las correderas de arco son 4 mm × 1.5 mm × 16 mm, separadas entre ellas a 8 mm. Mientras que la placa divisora cuenta con dimensiones de 4 mm × 2 mm × 7 mm, cuya parte superior coincide con la extensión de fluido de 8 mm de longitud (Mutzke *et al.*, 2007). En el modelo construido, se consideran dominios laterales de fluido para una mejor disipación de calor; buscando evitar problemas de convergencia, evaluar el efecto de calentamiento en los alrededores y el calentamiento en los sólidos del modelo. Lo anterior se ilustra en la figura 7.

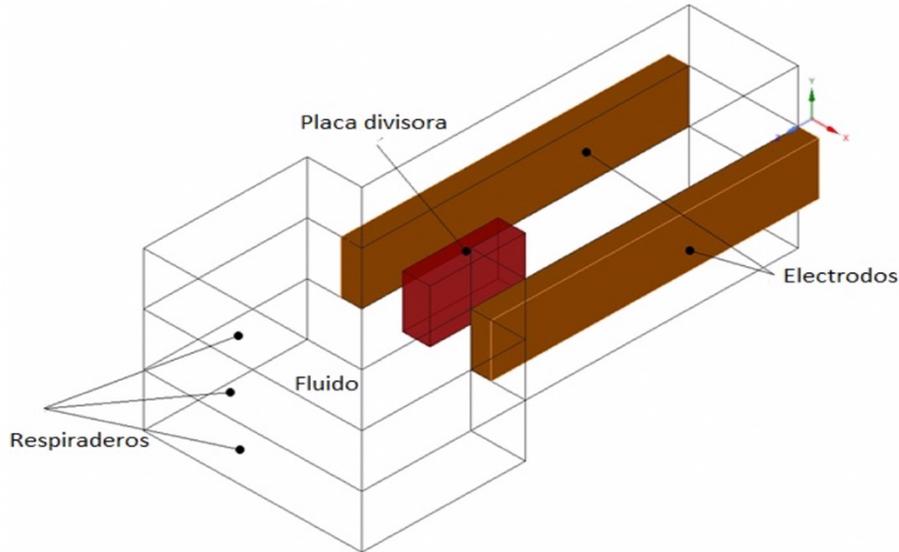


Figura 7. Ilustración del modelo generado.
Fuente: Elaboración propia.

Para inicializar el modelo se considera una temperatura inicial en todo el dominio de 300 K y una presión atmosférica al inicio de la simulación. Las paredes externas en el modelo se consideran como adiabáticas y sin deslizamiento, exceptuando los respiraderos que servirán de salida del aire caliente y recirculan aire a temperatura ambiente; la condición de presión a la salida de los respiraderos es la estándar. Respecto a las condiciones electromagnéticas, la conductividad en todo el dominio de fluido es una función de temperatura acorde a lo propuesto por A.B. Murphy (1995); de igual forma, el campo magnético es variable en todo el dominio de fluido. Las corrientes iniciales manejadas son 100 A, idóneas para comparar los resultados obtenidos con los de la literatura (Lindmayer, Marzahn, Mutzke, Rütter & Springstubbe, 2016; Mutzke et al., 2007; Singh, Ahmmed & Atharparvez, 2015).

Mallado

El proceso de mallado se realizó en el *software* especializado ANSYS *Meshing*; a su vez, la malla fue hecha a base de celdas tetraédricas a fin de tener una menor cantidad de elementos y de esta forma asegurar la convergencia en cada iteración. Aunado a lo anterior, se hizo una malla lo más fina posible con aproximadamente un millón de celdas, procurando tener un balance entre el tamaño de los time steps y el tiempo de cómputo que conlleva hacer el cálculo en las celdas, esto con la finalidad de optimizar el tiempo de procesamiento. La malla final se muestra en la figura 8, mientras que la tabla 1 nos muestra los tamaños de celda y los parámetros de calidad de malla.

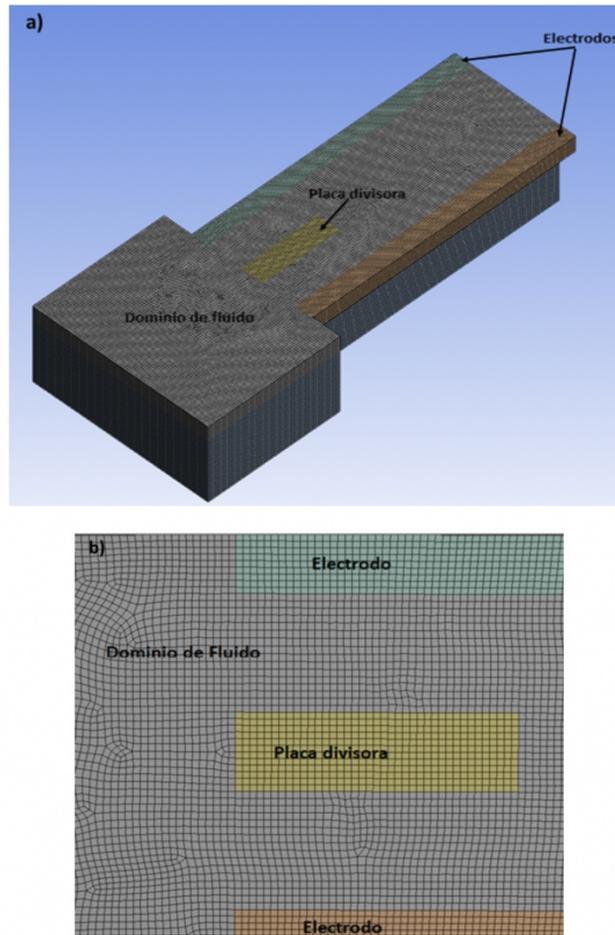


Figura 8. a) Malla generada para el análisis. Sección transversal de corte de la malla realizada en ANSYS Meshing. b) Malla generada para el análisis. Vista a detalle de una sección de la malla generada.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Estadísticas de la malla generada.

Número de elementos	868572
Volumen máximo de celda	$8.43 \times 10^{-12} \text{ m}^3$
Volumen mínimo de celda	$3.18 \times 10^{-12} \text{ m}^3$
Min. Orthogonal Quality	0.74
Max. Ortho Skew	0.25
Razón de aspecto máxima	3.36

Fuente. Elaboración propia.

Acoplamiento de modelo MHD

La solución del modelo propuesto es calculada mediante el *software* comercial ANSYS Fluent (CFD) y ANSYS Maxwell (FEA), mediante una función definida por el usuario (UDF). Siguiendo la figura 6, el *solver* de Fluent determina las densidades de corriente con base en la conductividad de la iteración anterior;

posteriormente, *Fluent* hace un mapeo de su malla exportando parámetros tales como conductividad eléctrica, densidad de corriente y potencial eléctrico de Maxwell. Una vez que se tiene el mapeo hecho, el *software* FEA resuelve las ecuaciones magnetostáticas correspondientes para la obtención de los campos magnéticos presentes en el dominio de fluido. Ya que se ha hecho el cálculo del campo magnético, se hace un mapeo inverso en Maxwell para enviar la solución obtenida al *software* CFD.

Fluent mediante la UDF se encarga de calcular los términos fuente en las ecuaciones de Navier-Stokes, el efecto Joule y las fuerzas magnéticas de Lorentz, al contar con los cálculos hechos por Maxwell. Por lo tanto, *Fluent* resuelve la fluidodinámica del plasma presente, cuantificando presiones, temperaturas, velocidades, entre otros. Finalmente, con base en la distribución de temperaturas obtenida, el *solver* CFD obtiene los nuevos parámetros eléctricos (basándose en Murphy, 1995) para proseguir con el siguiente *time step*.

Resultados y Discusión

Densidades de corriente

La figura 9a muestra el arco formado de 1 mm de diámetro durante su inicialización a 5 mm de la placa divisora en un plano medio, creado para una mejor visualización. El arco es ilustrado mediante los contornos de densidad de corriente, teniendo a las raíces de arco como las mayores concentradoras de energía, asemejando a modelos realizados anteriormente por investigadores. A su vez, la figura 9b muestra el comportamiento del arco al acercarse a la placa divisora, como poco a poco empieza a alargarse reduciendo su diámetro y se va doblando, consiguiendo, con esto, reducir su energía para dar lugar a una reducción gradual en la ionización, la cual llevará a la extinción del arco.

En la figura 9c se denota de una mejor manera el proceso de extinción del arco, el cual se ve reducido en energía gracias al efecto de doblar y ensanchar el arco que genera la placa divisora, este comportamiento es acorde a los métodos de extinción de arco mencionados anteriormente y a lo reportado por diversos artículos científicos. Se denota una variación en las escalas de densidad de corriente entre las figuras 9a y 9c para distinguir de manera clara la columna de arco eléctrico con el paso del tiempo.

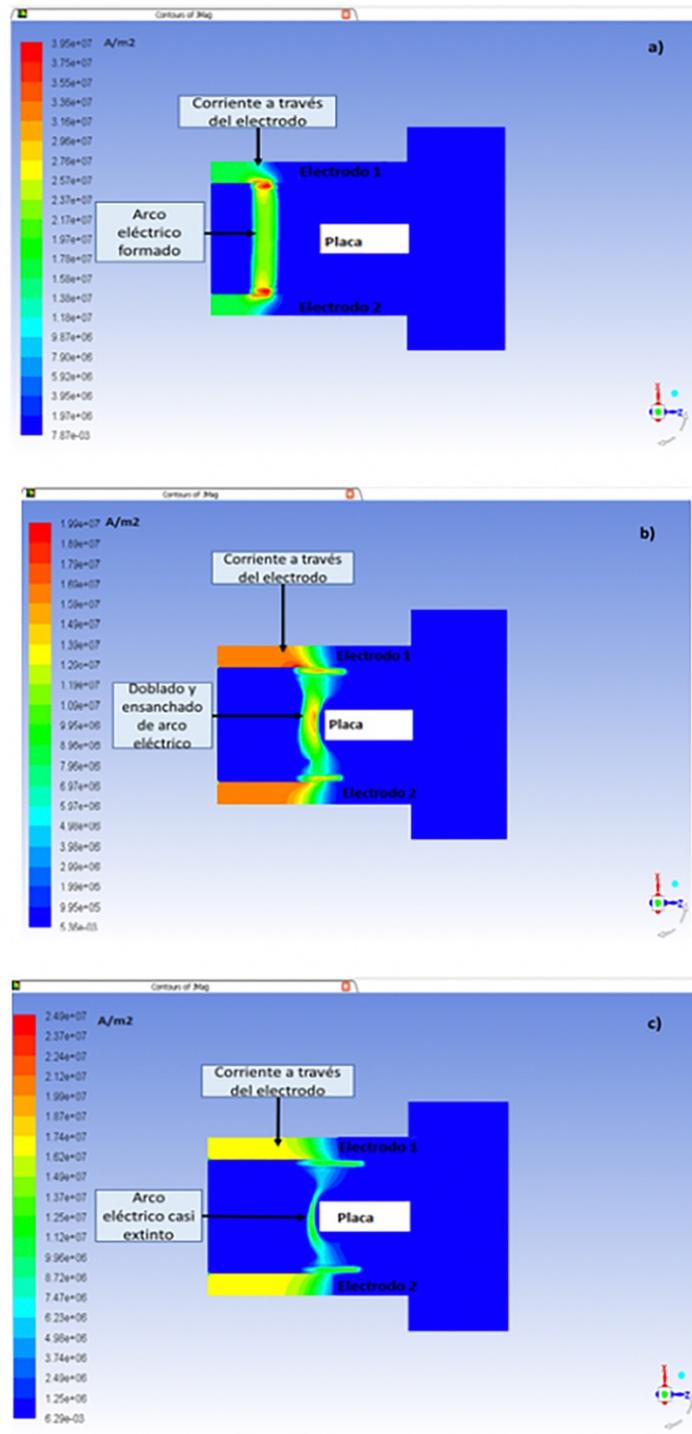


Figura 9. a) Ilustración del arco generado en Fluent, b) Ilustración del arco en las cercanías de la placa divisora, c) Ilustración del arco extinguiéndose en la placa divisora.
Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas

En la figura 10a se denotan los contornos de temperatura, mostrando la columna a alta temperatura compuesta por plasma durante la ignición de arco. Aquí, para una corriente de inicialización de 100 A, se alcanza una temperatura cercana a los 14 000 K, suficientes para consumir las correderas de cobre. En la figura 9b se ilustra la columna de plasma, dividiéndose en dos más pequeñas durante el proceso de división del arco; del mismo modo, da una aproximación del proceso de disipación de energía en el aire y las temperaturas que pueden alcanzar los alrededores cercanos. De igual forma, la temperatura presente en el plasma se ve considerablemente disminuida debido a la reducción de energía a la que se ve sometida el arco durante su proceso de extinción. Al igual que en el caso de las densidades de corrientes, las escalas varían para la figura 10a y la figura 10b con la finalidad de distinguir de manera más clara la columna de plasma en ambas.

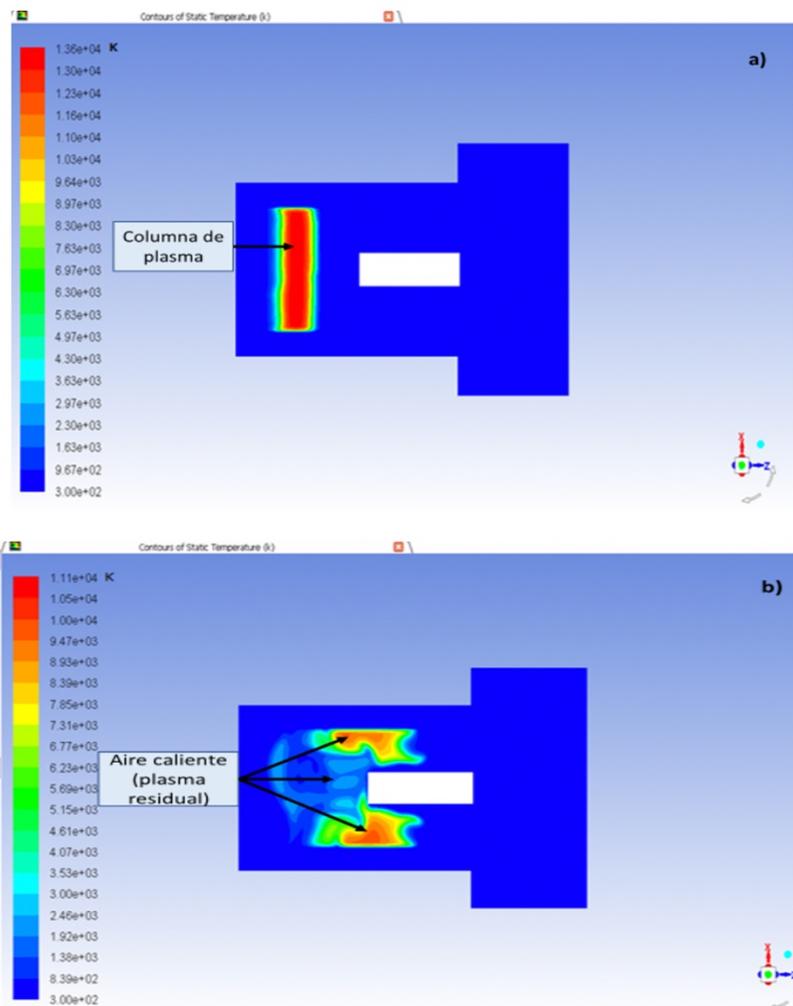


Figura 10. a) Ilustración de la columna de plasma formada, contornos de temperatura en el modelo. b) Ilustración del plasma dividiéndose, contornos de temperatura en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La formación del arco eléctrico en un corta circuitos es mediante la conducción de una corriente eléctrica. A través del medio que rodea a los contactos, la conducción empieza al abrirlos, y el arco eléctrico debe ser interrumpido de manera inmediata para evitar posibles daños en los interruptores.

- El arco eléctrico resulta ser un proceso complicado físico, al tener que interactuar distintas físicas en tiempos extremadamente pequeños, dificultando, la capacidad de emular su comportamiento.
- Un factor importante en la formación y propagación del arco eléctrico es la temperatura. Al incrementarse la temperatura, el medio se ioniza, convirtiéndose en plasma y en un medio conductor. La temperatura también influye en propiedades del medio como la conductividad eléctrica, conductividad térmica y la viscosidad, siendo así el parámetro más importante calculado durante la simulación cada time step.
- Al comparar los resultados obtenidos contra la bibliografía, se denota un comportamiento cualitativo semejante a lo reportado, por lo cual podemos concluir que el modelo generado con la metodología desarrollada es válido para el desarrollo de futuros trabajos.

De manera general, en cuanto a los conocimientos requeridos para el desarrollo de este proyecto, se pueden destacar los siguientes:

- Comprensión teórica de los fenómenos MHD (Magnetohidrodinámicos)
- Comprensión de la compleja física que implica fenómeno de arco eléctrico
- Desarrollo de habilidades en el manejo de software especializados tales como Space Claim, Desing Modeler, ANSYS Meshing, ANSYS Fluent y ANSYS Electronic Desktop
- Entendimiento de funciones definidas por el usuario (UDF) para la generación de secuencias en software especializado ANSYS *Fluent*.

Agradecimientos

A mis asesores, por considerarme para dicho proyecto y encaminarme durante su desarrollo. A Grupo SSC, por ser parte fundamental en el desarrollo de este trabajo, al prestar sus instalaciones y los recursos necesarios (equipos de cómputo y licencias de *software*). Al personal capacitado que permitió un desarrollo integro como profesional.

Referencias

- Moeller-Melcsa (2014). *Interruptores de bastidor abierto/ caja moldeada*. México, DF: Melcsa.com.
- GE Industrial Solutions (2013). *Interruptores (Breakers)*. México, DF: mx.geindustrial.com.
- Energy Management (2014). Arco eléctrico: consecuencias normas y protección. México, DF: e-management.mx.
- Iturregi, A. (2013). *Modelization and analysis of the electric arc in low voltage circuit breakers* (Tesis de Doctorado). Universidad del país Vasco.

- Iturregi, A., Barbu, B., Torres, E., Berger, F., & Zamora, I. (2017). Electric Arc in Low- Voltage Circuit Breakers: Experiments and Simulations. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45(1), 113-120.
- Lindmayer, M., Marzahn, E., Mutzke A., Rütter, T., & Springstubbe, M. (2016). The Process of Arc-Splitting Between Metal Plates in Low Voltage Arc Chutes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 29(2), 310-317.
- Murphy, A. B., (1995). Transport coefficients of air, argon-air and oxygen-air plasmas. *Chemistry and Plasma Processing*, 15(2), 297-397.
- Mutzke, A., Ruther, T., Kurrat, M., Lindmayer, M. & Wilkening, E.D. (2007). Modeling the Arc Splitting Process in Low-Voltage Arc Chutes. *Proceedings of 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Pittsburgh, PA, USA.
- Nilsson, A. (2014). Pre-stud of Arc Extinguish Techniques for a 4-Pole 1500 VDC Contactor (Tesis de Maestría en Física Aplicada). Chalmers University of Technology.
- Prabu, A. (2014). An inverse problem approach to modeling of circuit breaker arc voltage. *International Symposium of Fundamentals of Electrical Engineering*. Bucharest, Romania.
- Singh, A. K., Ahmmed, N. & Atharparvez, M. (2015). Numerical simulation of arc splitting process in a LV switching device considering thermo-field emission mechanism. *IEEE 61st Conference on Electric Contacts*. San Diego, CA, USA.
- Yang, F., Rong, M., Sun, Z., Wu, Y. & Wang, W. (2008). A numerical study of arc-splitting processes with eddy-current effects. *17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications*. Cardiff, UK.