

## Estudio de sensibilidad de Arc Flash en barras de una instalación industrial

### Arc Flash sensitivity study on busbars in an industrial facility

**Franco Filippa Kindenegt**

Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional  
[ffilippakindenegt@frsf.utn.edu.ar](mailto:ffilippakindenegt@frsf.utn.edu.ar)

**Santiago Dománico Arán**

Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional  
[sdomanicoaran@frsf.utn.edu.ar](mailto:sdomanicoaran@frsf.utn.edu.ar)

**Maximiliano Cordo**

Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional  
[mcordo@frsf.utn.edu.ar](mailto:mcordo@frsf.utn.edu.ar)

**Resumen** Se presenta un análisis focalizado y descripción del fenómeno de arco eléctrico, nombrado Arc Flash. Se describe el procedimiento provisto por la normativa AEA 92606-2016 vigente en Argentina. A su vez, se presentan los resultados de un estudio técnico de las variables que influyen en la categorización pertinente aplicado a una empresa local. Este estudio se realiza a los fines de determinar los elementos de protección personal y finalmente exponer medidas de mitigación del riesgo de arco para lograr mayor seguridad en el ámbito laboral.

**Palabras claves** Arc Flash, Estudio de Sensibilidad, AEA-92606-2016, Instalación Industrial.

**Abstract** A focused analysis and description of the electric arc phenomenon, named Arc Flash, is presented. The procedure provided by the AEA 92606-2016 regulation implemented in Argentina is described. In turn, the results of a technical study of the variables influencing the relevant categorization applied to a local company are presented. This study is conducted to determine the personal protection elements and finally expose arc risk mitigation measures to achieve greater safety in the workplace.

**Key words** Arc Flash, Sensitivity study, AEA-92606-2016, Industrial facility.

### Introducción

Los accidentes eléctricos tienen diversos orígenes, pudiendo ser de naturaleza directa, donde las consecuencias provienen del contacto directo con elementos a potencial; o indirecta, donde las problemáticas subyacen de caídas, operaciones de mantenimiento u otros. Estos últimos resultan ser los más probables debido a su aleatoriedad y no se prevén con la criticidad que se requiere o incluso son imposibles de proyectar. El riesgo de Arc Flash pertenece al segundo grupo y constituye un riesgo que generalmente no se tiene en cuenta. De aquí la importancia de su análisis.

Existen ciertos puntos de las instalaciones susceptibles de operación o maniobra por parte de los operadores que pueden presentar un riesgo por la energía incidente, principalmente asociada a la energía térmica irradiada. Esta energía puesta en juego en una falla, siendo la más común el cortocircuito, da lugar a un accidente laboral de importante magnitud si no se toman las medidas preventivas necesarias. Es necesario que el personal esté capacitado y tenga el equipo de protección personal (EPP) adecuado cuando se trabaja en estos puntos como tableros de distribución en media y baja tensión, centros de control de motores, etc. Por lo tanto, en el

desarrollo de este documento se recopilan los elementos requeridos para cubrir dicha necesidad, analizando luego un caso de estudio y cómo se comportan las variables.

## Desarrollo

El Arc Flash es un fenómeno originado por una falla eléctrica entre contactos a potencial y es caracterizado por el flujo de corriente eléctrica a través del aire ionizado. Produce intenso calor, altas temperaturas, explosiones sonoras, ondas de presión y propagación a través del medio producto de las diferencias de presión y temperatura del medio circundante. El arco es una de las mayores fuentes de energía, alcanzando temperaturas alrededor de 20.000 [°C]. Este fenómeno origina un calentamiento instantáneo del aire, que al expandirse genera una ráfaga de arco incidiendo sobre los materiales circundantes logrando aumentar su volumen en una relación 6700:1, e incluso llegando a vaporizar las barras de cobre. Causa ruidos de 140 [dBA] y presiones de 2160 [psi] expulsando cualquier partícula que haya sido desprendida durante el evento. Ya sea que el arco eléctrico fuese el resultado de una falla, operación o contacto involuntario del equipo, la energía incidente resultante puede ocasionar quemaduras graves y mortales de segundo o tercer grado y a la exposición a metal fundido y otros proyectiles que pueden dañar severamente a sus víctimas incluso produciendo la muerte. [8]

Las fases del arco eléctrico que sucede en los primeros instantes en los que se forma, se puede esquematizar en 4 fases: I) Fase de compresión: Una vez iniciado el arco eléctrico generado por una corriente de falla, el volumen de aire ocupado por el arco eléctrico se sobrecalienta a causa de la inyección ininterrumpida de energía, y debido a la convección y la radiación, el volumen restante de aire contenido en el cubículo se sobrecalienta. Al principio, los valores de temperatura y presión difieren de sector a sector; II) Fase de expansión: En esta fase de expansión la presión interna del cubículo del equipo eléctrico comienza a incrementarse progresivamente debido al aporte de energía en forma de calor proveniente del arco eléctrico, luego esta energía acumulada comienza a liberarse por la puerta del cubículo. En esta fase la presión alcanza su valor máximo y empieza a disminuir debido a la liberación del aire caliente; III) Fase de emisión: En esta fase de emisión, a causa del aporte ininterrumpido de energía por parte del arco eléctrico, el aire es expulsado bajo una ligera y casi constante sobrepresión; IV) Fase térmica: Después de la expulsión del aire caliente, la temperatura en el interior del cubículo del equipo eléctrico alcanza casi la del arco eléctrico. Es entonces cuando empieza esta última fase, que dura hasta la desaparición del arco, en la que todos los metales de cobre o aluminio y los aislantes que entran en contacto sufren abrasión, formándose gases, humos tóxicos y partículas de material fundido. [3]

La normativa a considerar en este trabajo es la AEA 92606-2016, que tiene como referencia a las normas internacionales NFPA-70E-2012 e IEEE-1584-2002 Revisión 2004. Establece determinar la corriente de cortocircuito  $I_k$  [kA], tiempo de arco  $t_a$  [s],  $D$ , el nivel de tensión  $V$  [kV] y la distancia entre contactos a potencial  $G$  [mm] para así determinar la corriente de arco  $I_a$  [A], la energía incidente  $E_i$  [J/cm<sup>2</sup>] y la distancia de seguridad a adoptar  $D_s$  [mm]. [7]

Las normativas proponen los siguientes métodos de cálculo.

I) Método de Ralph Lee. Define ecuaciones de carácter puramente empírico para la determinación de los parámetros de interés. Este método supone que el punto de falla se encuentra al aire libre, considera el peor escenario de impedancia de arco y arroja buenos resultados a tensiones mayores de 600 [V]. Recomienda un tiempo de extinción de arco de 0,1 [s] (seis ciclos, pesimista) para interruptores y 0,005 [s] (0,25 ciclos) para fusibles. Considera a la distancia de seguridad como la distancia [ft] de la persona a la fuente de arco susceptible de

percibir una quemadura curable (es decir, la temperatura de la piel se mantiene a menos de 80[°C].)

II) Método de Doughty y Neal. Presenta ecuaciones de carácter empírico que se dedujeron de experimentos que los mismos autores realizaron. Especifica su empleo para tensiones menores a 600 [V] y corrientes de cortocircuito entre 16 y 50 [kA]. Asimismo, pueden no reflejar las peores situaciones en todos los casos (optimista). Hace distinción sobre la naturaleza del recinto ya sea de carácter abierto o cerrado en una caja cúbica de 20 [pulgadas] de lado y abierta en uno de sus lados.

III) Método IEEE-1584. Las fronteras están basadas en análisis estadísticos y ajuste de curvas de datos de pruebas disponibles. Un grupo de trabajo de IEEE obtuvo los datos de pruebas que realizó para producir modelos de energía incidente. Se pueden encontrar los datos completos, incluyendo una hoja de cálculo para resolver las ecuaciones en IEEE 1584-2002, guía para efectuar el cálculo del riesgo de arco. Propone ecuaciones tanto empíricas como teóricas. Establece como parámetros un sistema trifásico de tensiones simétricas entre 208 [V] a 15 [kV], frecuencias de 50 a 60 [Hz], corrientes de fallas franca de 700 [A] a 106 [kA] y distancia de separación entre contactos de 13 a 152 [mm]. Para tensiones mayores a 15 kV, la corriente de falla de arco y la corriente de falla sólida se consideran iguales. Resulta el método más específico y con mayor número de variantes.

IV) Método directo. Método propuesto por Doan que permite calcular la energía incidente en sistemas de corriente continua hasta 1000 [V]. Requiere la determinación de la corriente de cortocircuito. La corriente de arco se calcula al 50 por ciento del valor de cortocircuito de corriente continua. La corriente que una batería suministrará depende del total de la impedancia de la trayectoria de cortocircuito.

Además de distintos métodos de cálculo, hay distinciones en los criterios de categorías que adoptan. Para tensiones entre 5 [kV] y 15 [kV] es donde se presentan las mayores disonancias, habiendo posibles escenarios en los que la norma NFPA-70E exige una Categoría 4 mientras que la IEEE-1584 exige una Categoría 1. Para el caso de tensiones superiores a 15 [kV] hay una unanimidad en métodos y criterios donde ambos recurren al método de Ralph Lee.

Las categorías mencionadas anteriormente refieren a los EPP mínimos a usar en ocasión de trabajo. Las mismas van de Categoría 0 a Categoría 4 dependiendo de los valores de energía incidente  $E_i$ . Prescriben elementos comunes como casco, pasamontañas, protector facial, calzado dieléctrico y protección auditiva convencionales en Categoría 1, hasta overol, chaqueta, escafandra, guantes resistentes al arco y pértigas en Categoría 4.

Se presenta a continuación un escenario de aplicación de la metodología de estudio propuesta en la norma AEA 92606-2016. Para el mismo se analizarán los resultados obtenidos con el método de cálculo propuesto y se hará un análisis de la sensibilidad de los resultados al valor de los parámetros intervinientes. En la Figura 1 se muestra el tablero objeto de estudio para este trabajo.



Figura 1. Tablero industrial para caso de análisis. Interruptor automático en servicio (izq.) e ilustración detallada del interruptor (der.).

Se tiene una barra de baja tensión con un interruptor automático Schneider Electric modelo Compact NS1250H de 4 polos con una unidad de control Micrologic 5.0. La condición del recinto es considerada tablero abierto, con puesta a tierra sólida, corriente de cortocircuito  $I_k = 10[kA]$ , tensión del sistema  $V = 0,38[kV]$ , distancia entre contactos  $G = 25[mm]$  y distancia de trabajo  $D = 609[mm]$ . En la Figura 2 se muestra la curva tiempo-corriente de la protección para su configuración actual.

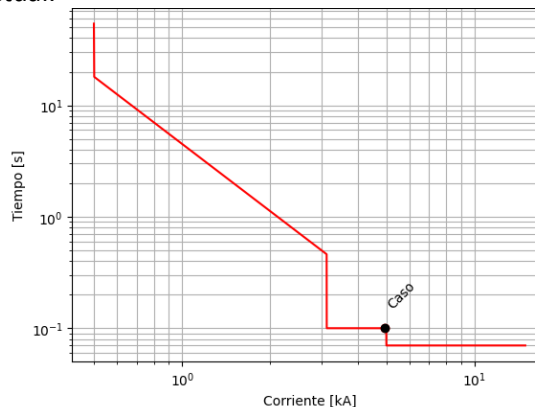


Figura 2. Curva tiempo-corriente de la protección.

Con estos datos, se calcula la corriente de arco, resultando  $I_a = 4,957[kA]$ . Para esta corriente, el tiempo de extinción de arco resulta  $t_a = 0,1[s]$  (de acuerdo con la curva provista por el fabricante de la protección mostrada en la Figura 2, una energía incidente  $E_i = 2,354[J/cm^2]$  y una distancia de seguridad  $D_s = 364,153[mm]$ . En consecuencia, el caso puede clasificarse como Categoría 0.

Respecto a la corriente de arco, se observa en la Figura 3 que su evolución en función de la separación entre contactos es mínimamente apreciable para corrientes de cortocircuito menores a 5 [kA], y su sensibilidad aumenta para valores cada vez mayores.

Es apreciable su crecimiento exponencial para valores de tensión por debajo de 1 [kV] y su decremento para valores crecientes de separación entre contactos lo que resulta lógico. Para la tensión en cuestión de 0,38 [kV], un aumento de 15 [mm] en esta separación no conlleva una disminución importante de la corriente de arco, y para valores cercanos a la frontera de 1 [kV] este valor apenas se duplica, lo cual hace muy baja su importancia en el cambio de categoría. A su vez, ese aumento resulta exagerado y de carácter conservador por lo que adoptar un valor menor no conlleva a grandes cambios de resultado.

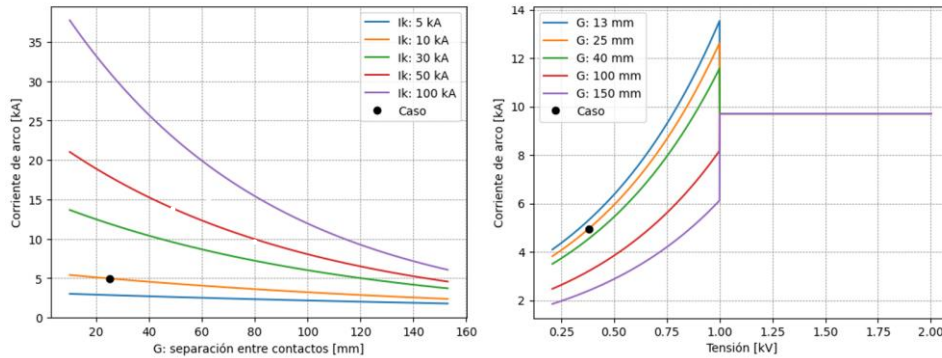


Figura 3. Variación de  $I_a$  en función de: A)  $G$  [mm] para varios  $I_k$  [kA] (izq.); B)  $V$  [kV] para varios  $G$  [mm] (der.).

Respecto a la energía incidente se observa que parámetros como la distancia de seguridad y la separación entre contactos no constituyen una implicancia severa en la misma debiendo aumentar varias veces para concluir en un cambio de categoría. Si lo son el tiempo de arco asociado a las protecciones y la corriente de cortocircuito donde un aumento del 200% ya supone un cambio relevante.

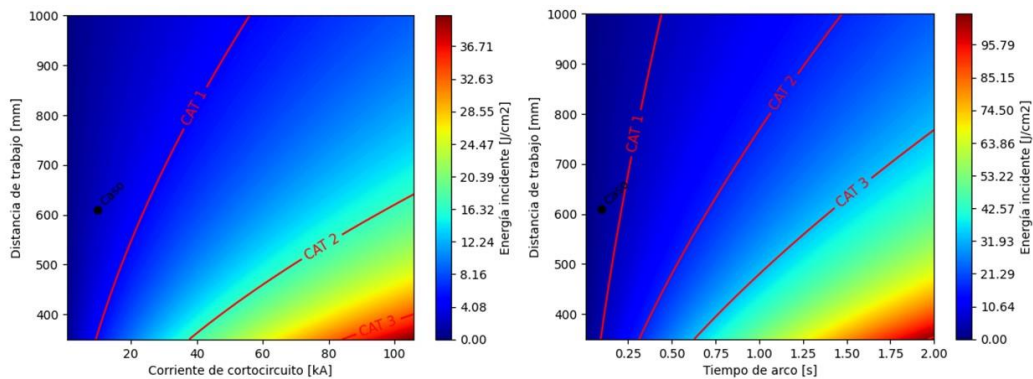


Figura 4. Variación de  $E_i$  [J/cm<sup>2</sup>] en función de: A)  $D$  [mm] y  $I_k$  [kA] (izq.); B)  $D$  [mm] y  $t_a$  [s] (der.).

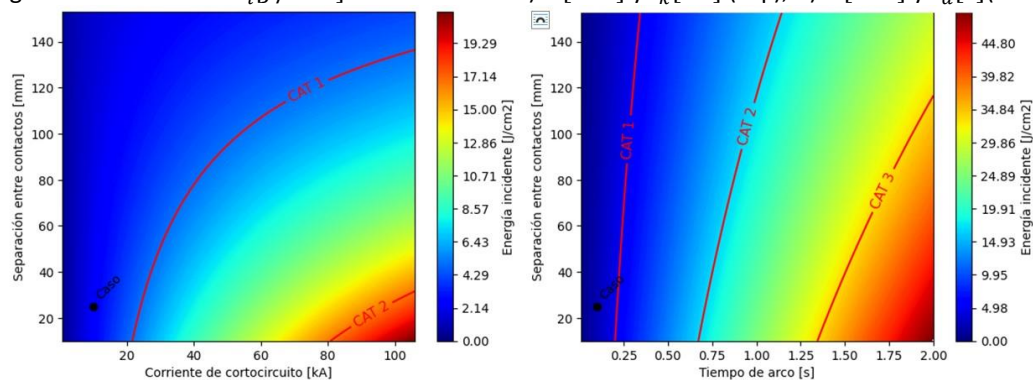


Figura 5. Variación de  $E_i$  [J/cm<sup>2</sup>] en función de: A)  $G$  [mm] y  $I_k$  [kA] (izq.); B)  $G$  [mm] y  $t_a$  [s] (der.).

Respecto a la distancia de seguridad se observa que es el doble de la que respecta al caso de análisis. Este valor resulta especialmente sensible al tiempo de arco.

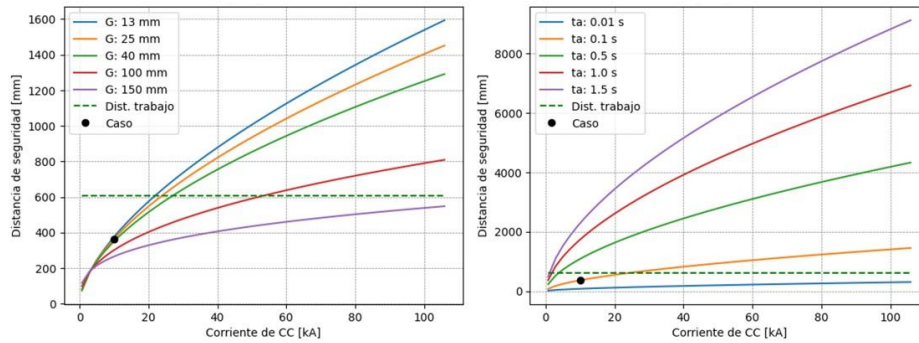


Figura 6. Variación de  $D_s$  [mm] en función de: A)  $I_k$  [kA] para varios  $G$  [mm] (izq.); B)  $I_k$  [kA] para varios  $t_a$  [s] (der.).

Respecto a las condiciones físicas del recinto, pasar de ‘abierto’ a ‘cerrado’ implica un aumento en la corriente de arco, energía incidente y distancia de seguridad del 13,8%, 98,4% y 59,2% respectivamente, motivo por el cual se debe tener cuidado al elegir un criterio en esta clasificación.

Respecto al tipo de Puesta a Tierra, cambiar la configuración del sistema de ‘aterrado’ a ‘aislado’ conlleva a un aumento de la energía incidente y de la distancia de seguridad del 29,7% y 19,3% respectivamente. En este caso la corriente de arco permanece invariante. Por lo tanto, este factor queda por detrás de la condición de cerramiento del recinto siendo menos relevante para el fenómeno de Arc Flash.

Por último, entre los tipos de equipamiento se nota una invariancia en cuanto a corriente de arco y variaciones imperceptibles (del orden del 0,1%) en la energía incidente, aunque en distancias de seguridad se revelan disminuciones del 12,7% para tableros y del 8% para Centro de Control de Motores.

En los análisis de la energía calorífica puesta en juego en un estudio de Arc Flash suele haber parámetros que son difíciles de medir o estimar para un determinado punto, de tal manera que en su consideración se debe tener presente la incertidumbre de medición o el error en su estimación. A tal caso, se presenta la variabilidad de la energía incidente ante errores porcentuales por exceso y por defecto del valor adoptado para la distancia de trabajo, separación entre contactos, corriente de cortocircuito y tiempo de arco. En la Figura 7 se observa la importancia de la distancia de trabajo con variaciones exponenciales donde un error del 30% puede llegar a duplicar la energía incidente calculada. En orden de importancia le siguen el tiempo de arco y la corriente de cortocircuito provocando variaciones directamente proporcionales. El valor de la separación entre contactos es poco relevante. Se debe tener en cuenta que estos errores pueden solaparse, y un error en la medición de  $G$  puede llevar a un error más grande en  $D_s$  y concatenar en una variación aún más grande de  $E_i$  con lo que este punto resulta de especial atención para el investigador.

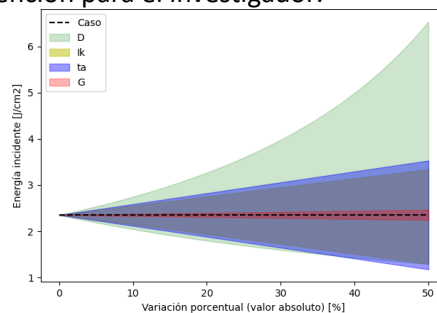


Figura 7. Variación de  $E_i$  [J/cm<sup>2</sup>] para errores porcentuales de  $D$ ,  $I_k$ ,  $t_a$ ,  $G$ .

## Conclusiones

Luego del análisis cuantitativo y cualitativo del fenómeno, se observa que los parámetros más críticos son el tiempo de arco y la corriente de cortocircuito, pudiendo implicar un amplio cambio en la energía incidente y un probable salto de categoría. El parámetro de distancia de trabajo comienza a tomar importancia para grandes valores de energía incidente. Además, se debe prestar atención en no aumentar la separación entre contactos o bajar la tensión del sistema a valores que produzcan corrientes de arco por debajo de los 3 [kA] lo que produciría un aumento radical del tiempo de actuación de la protección. Asegurar un correcto dimensionamiento y parametrización de las protecciones es fundamental para controlar el arco eléctrico.

Una última apreciación radica en analizar las medidas de mitigación. Una opción sencilla para detectar un arco eléctrico consiste en un sensor óptico que capte la luz irradiada. Una vez que se ha detectado la falla, hay al menos dos opciones de diseño. Una opción implica directamente disparar los interruptores automáticos aguas arriba. Dado que el tiempo de detección del arco es muy corto, el tiempo de apertura general es esencialmente reducido al tiempo de operación del interruptor automático. Una segunda opción implica la creación de una falla intencional trifásica al energizar un interruptor de puesta a tierra de alta velocidad. Este método desvía la energía del arco hacia otro circuito y ambas fallas luego son despejados por la protección propia de la barra. Debido a que el interruptor de puesta a tierra se cierra más rápido respecto de lo que abre el interruptor automático, esta técnica dará como resultado niveles de energía incidente más bajos que la primera. [8]

## Referencias

- [1] Doughty, R., Neal, T., & Floyd, L. (2000). *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems* (Vol. 36). IEEE Transactions on Industry Applications.
- [2] IEEE, S. (2018). IEEE 1584. *Guide for performing Arc-Flash hazard calculation*.
- [3] Inshaw, C., & Wilson, R. (2005). *Arc flash hazard analysis and mitigation*. IEEE Transactions on Industrial Applications.
- [4] Lee, R. (1982). *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*. (Vol. 18). IEEE Transactions on Industry Applications.
- [5] Muñoz Chacón, C. A. (Mayo de 2015). Estudio de accidentes eléctricos y peligro del arco eléctrico. *Ciencia & Trabajo*, págs. 122-127.
- [6] National Fire Protection Association. (2018). NFPA-70E. *Seguridad eléctrica en lugares de trabajo*.
- [7] Sangoi, E. (2022). *Estudio de riesgo por arco eléctrico según AEA 92606. Análisis de sensibilidad de resultados*. Santa Fe.
- [8] Siu Yupanquí, A. T. (2018). *Determinación y evaluación del arco eléctrico para la implementación de procedimientos y seguridad del personal que labora en el área eléctrica de una planta concentradora de Cobre*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.