

ARC-FLASH – RESULTADOS PARA UN CASO DE ESTUDIO CONSIDERANDO CORRIENTES MINIMAS Y MAXIMAS

ARC-FLASH – RESULTS FOR A CASE STUDY CONSIDERING MINIMUM AND MAXIMUM CURRENTS

Santiago A. Dománico Arán

Facultad Regional Santa Fe,
Universidad Tecnológica
Nacional
sdomanicoaran@frsf.utn.edu.ar

Facundo A. Di Conza

Facultad Regional Santa Fe,
Universidad Tecnológica
Nacional
fdiconza@frsf.utn.edu.ar

Mauro Coscueta

Facultad Regional Santa Fe,
Universidad Tecnológica
Nacional
mcoscueta@frsf.utn.edu.ar

Francisco Wernicke

Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional
fwernicke@frsf.utn.edu.ar

Resumen: Se presenta un caso de estudio del tablero principal de una empresa argentina especializada en la elaboración, comercialización y distribución de productos de alta calidad para uso en medicina veterinaria, en materia de Arc Flash, viendo dentro de los parámetros del mismo, como los valores máximos y mínimos de corriente para el momento de falla en dicho tablero afectan la energía disruptiva generada y consecuentemente los perjuicios o daños que puedan ocurrir. Para dicho objetivo se realiza una introducción y un desarrollo sobre qué es un estudio de Arc Flash, cómo afecta el arco eléctrico al operario y a las instalaciones, las normas que se rigen para dicho estudio según el país, para finalmente ver las variables que influyen en Arc Flash, siendo para este estudio los valores de corriente de gran importancia.

Palabras claves: Arc Flash, IEEE-1584-2018, AEA-92606-2016, NFPA-70E-2018.

Abstract: A case study of the main board of the company specialized in the production, marketing and distribution of high quality products for use in veterinary medicine is presented in terms of Arc Flash is presented, seeing within its parameters, how the maximum and minimum current values for the moment of failure in said board affect the disruptive energy generated and consequently the losses or damages that may occur. For this purpose, an introduction and a development on what an Arc Flash study is, how the electric arc affects the operator and the facilities, the rules that are governed for said study according to the country, to finally see the variables that influence Arc Flash, being for this study the current values of great importance.

Keywords: Arc Flash, IEEE-1584-2018, AEA-92606-2016, NFPA-70E-2018.

Introducción: Las industrias que realizan servicios o procesos productivos se encuentran constantemente interpeladas por el uso de la energía eléctrica. Debido a la magnitud de energía y potencia que se suele requerir para los distintos procesos productivos, fenómenos electrofísicos pueden manifestarse en forma de fallas que pueden resultar nocivas para el medio en el que se producen. Es el caso entonces del Arc Flash como fenómeno eléctrico, que debido a la pérdida de la aislación de un material (generalmente aire) el cual pasa a conducir momentáneamente, debido a la ionización de los átomos transmitiendo altos niveles de energía en forma de arcos luminosos, que se traducen en energía térmica pudiendo generar quemaduras en

la piel de grado dos (2) o mayores en los operarios, así como también impactando mecánicamente a su vez con materiales aledaños a la zona de generación de la falla produciendo el fenómeno de Arc Blast. El estudio de Arc Flash consiste entonces en la determinación de la energía potencialmente generada en el momento de una falla ya sea por corto circuito, contacto accidental, deterioro o contorneo del aislante, corrosión de equipos o partes de los mismos, entre otros; con la consecuente formación del arco eléctrico.

Para la rigurosidad de dicho estudio, organismos internacionales de salud y seguridad en el ámbito eléctrico normalizaron la operatoria para el cálculo de la energía liberada por Arc Flash y sus métodos de seguridad como elementos de protección personal (EPP) o etiquetados a tableros, marcando los niveles de peligrosidad.

En Argentina, El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (originalmente Instituto de Racionalización Argentino de Materiales, IRAM) que es un organismo público encargado de la normalización y certificación en Argentina, toma de La Asociación Electrotécnica Argentina (AEA), la forma de estudio de Arc Flash de la IEEE 1584 y es la misma que se utilizará para este caso de estudio.

A la hora de determinar el riesgo de arco eléctrico, este se clasifica en cinco niveles en función de la energía incidente potencial a la que se está expuesto. Esta misma escala de riesgo, es la utilizada para definir los equipos de protección individual a utilizar. Se mide en cal/cm² y está dado por la NFPA 70E, como se ilustra a continuación:

Energía Incidente (cal/cm ²)	Categoría de Peligro
<1,2	Categoría 0
4	Categoría 1
8	Categoría 2
25	Categoría 3
40	Categoría 4

Tabla 1. Categorización de peligrosidad según nivel de energía del arco luminoso.

Según la categoría dada, la norma especifica el tipo de ropa de protección con la finalidad de cubrir los daños de carácter térmico, siendo entonces la tabla ilustrada a continuación:

Categoría de Peligro	Indumentaria	Cal/cm ²
0	Materiales inflamables no fundibles (es decir, algodón, lana, rayón o seda sin tratar, o mezclas de estos materiales) con un peso de tela de al menos 106.6 g/m ² .	N/A
1	Camisa FR y pantalones FR de FR overol.	4
2	Ropa interior de algodón: manga corta convencional y pantalones cortos / cortos, además de camisa y pantalones FR.	8
3	Ropa interior de algodón más camisa FR y pantalones FR más FR overol, o ropa interior de algodón más dos overoles FR.	25
4	Ropa interior de algodón más camisa FR y pantalones FR más traje flash multicapa.	40
Peligro extremo	No hay EPI disponible.	>40

Tabla 2. Tipo y material de indumentaria utilizada para cada categoría de nivel de energía.

Desarrollo:

Método de Cálculo: El estudio requiere de asidero matemático el cual se basa en la normativa de la AEA 92606-2016, modificada de la 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 energía incidente E_i [J/cm²], la distancia de seguridad a adoptar D_s [mm] y la corriente de arco I_a [A].

La NFPA 70E se enriqueció de documentos con cálculos puramente empíricos de autores como, Doughty, Neal y Floyd los cuales presentaban un mayor enfoque en el efecto térmico real del arco al ser generados en los equipos encapsulados, para los cuales en la práctica del método Lee se veían menospreciado.

Consta de tres ecuaciones por ajuste polinómico o de carácter racional, al aire libre o en caja, determinando la energía puesta en juego y una fórmula de cálculo para el límite de protección contra arco.

- a) Arco abierto al aire libre (V menor o igual a 0,6 kV; 16 kA menor o igual I_{cc} menor o igual a 50 kA)

$$E_{MA} = 5.217 \cdot D_A^{-1,9593} \cdot t_A \cdot [0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938] \tag{1}$$

- b) Arco en caja (V menor o igual a 0,6 kV; 16 kA menor o igual I_{cc} menor o igual a 50 kA)

$$E_{MB} = 1038,7 \cdot D_B^{-1,4738} \cdot t_A \cdot [0,0093 \cdot I_{bf}^2 - 0,3453 \cdot I_{bf} + 5,9675] \tag{2}$$

- c) Arco al aire libre (V mayor a 0,6 kV)

$$E_{MA} = \frac{793 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot t_A}{D^2} \tag{3}$$

Donde:

$E_{MA/MB}$: energía incidente del arco al aire libre o cerrado [cal/cm²]

I_{bf} : corriente de cortocircuito de falla de contacto [kA]

t_A : tiempo de arco [s]

D: distancia a la fuente de arco [pulgadas]

V: tensión nominal del sistema (fase a fase) [kV]

Mientras tanto la IEEE - 1584 posee un perfil más conservador que modificó los cálculos de Lee por modelos empíricos de análisis estadísticos particularmente novedosos. Las ecuaciones que fueron derivadas de un modelo de pruebas empíricas son válidas o aplicables entre ciertos límites o parámetros, que pueden describirse en la tabla subsiguiente:

Parámetro	Rango Aplicable
Voltaje del Sistema	0,208 a 15 kV
Frecuencia	50 a 60 Hz
Corriente de Cortocircuito	0,7 a 106 kA
Separación entre Electrodo	13 a 152 mm
Tipo de Equipo	Aire libre, caja, CCM, panel, tableros, cables
Tipo de Conexión a Tierra	No aterrizado, aterrizado, aterrizado con gran resistencia
Fases	Fallas Trifásicas

Tabla 3. Parámetros establecidos según la IEEE – 1584

La IEEE 1584 intenta ser más realista que conservadora, y pretende evitar accidentes debido a las limitaciones de la sobreprotección a los trabajadores, ya que la misma puede restringir la visibilidad y movilidad, generando incomodidad y reducción de la productividad del trabajador.

Cálculo de la corriente de arco para tensiones menores a 1000 V:

$$I_a = 10^{[K + 0,662 \log(I_{bf}) + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,588 V \log(I_{bf}) - 0,00304 G \log(I_{bf})]} \quad (4)$$

Cálculo de la corriente de arco para tensiones iguales o mayores a 1000 V:

$$I_a = 10^{[0,00402 + 0,983 \log(I_{bf})]} \quad (5)$$

Cálculo de la energía incidente normalizada en tiempo y distancia:

$$E_n = 10^{[K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011 G]} \quad (6)$$

E_n : Energía incidente normalizada en tiempo y distancia [J/cm²].

I_a : Corriente de arco [kA].

K_1 : Vale “-0,792” en configuración abierta o “-0,555” en configuración cerrada.

K_2 : Vale “0” para sistemas sin conexión de puesta a tierra o aterrizados a través de alta resistencia o “-0,113” para sistemas con conexión a puesta a tierra.

G: Separación entre conductores [mm].

$$E = 4,184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610}{D}\right)^X \quad (7)$$

E_n : Energía incidente normalizada en tiempo y distancia [J/cm²].

C_f : Factor de cálculo (1 para > a 1 kV y 1,5 ≤ 1 kV).

t: Duración del arco [s].

D: Distancia de trabajo [mm].

X: Factor de distancia (tabulado en la guía).

Para los casos en los que el voltaje es superior a 15 kV o la distancia entre los conductores está fuera del rango del modelo, se debe calcular la energía incidente con la siguiente ecuación derivada del método teórico de Lee:

$$E = 2,142 \cdot 10^6 \cdot V \cdot I_{bf} \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (8)$$

E: Energía incidente [J/cm²].

V: Tensión del sistema [kV].

I_{bf}: Corriente de falla de contacto [kA].

t: Duración del arco [s].

D: Distancia de trabajo [mm].

Como caso de estudio utilizando la normativa de AEA 92606-2016 se aplica un estudio de Arc Flash sobre el tablero general de una empresa, más precisamente en el tablero general de BT de un sector de la misma. Se procede a calcular los niveles de energía y consecuentemente el nivel de protección para el caso, mostrando un ejemplo del etiquetado con exposición de valores dados y conclusiones finales.

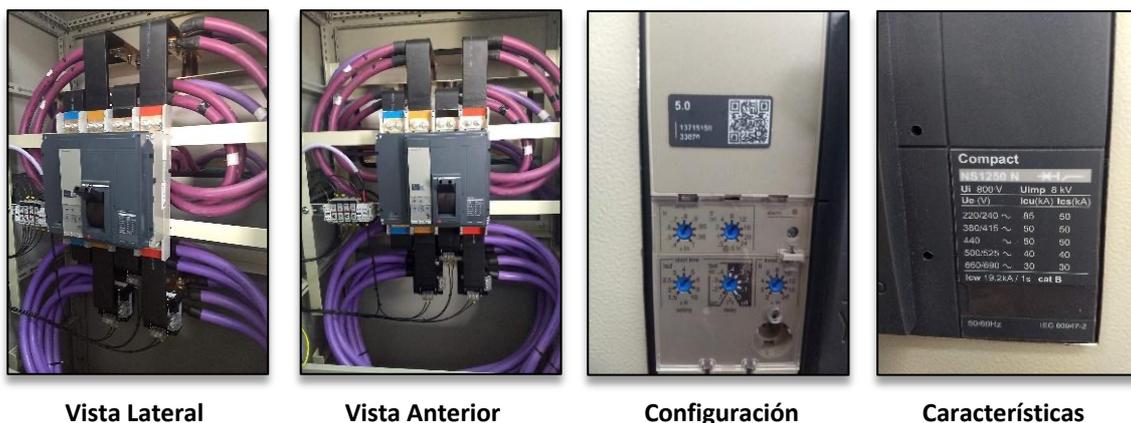


Figura 1. Interruptor del Tablero Principal.

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 un tablero abierto, con puesta a tierra sólida, corriente de cortocircuito I_c=10[kA], tensión del sistema V=0.38[kV], distancia entre contactos G=25[mm] y distancia de trabajo D=609[mm].

Se procede a configurar el seteo de la protección para el momento que puede darse la falla.

En la gráfica de la Figura 2, puede apreciarse la curva de actuación de la protección que se muestra en la Figura 1. Se observa que, son dos curvas ya que representan como la incertidumbre que presenta el interruptor a la hora de actuar. Cada una de estas, posee tres puntos característicos y eventos son función de la corriente y del tiempo.

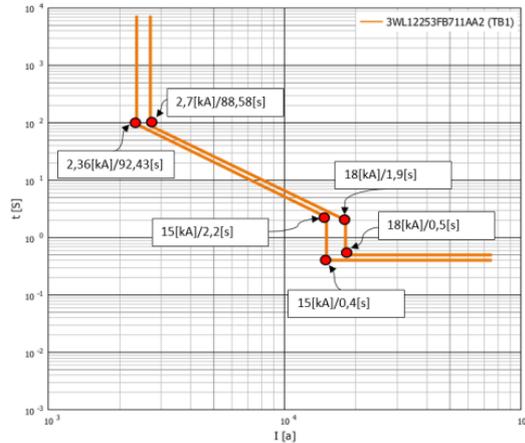


Figura 2. Grafica de curva actuación de protección del interruptor.

Con los valores de parámetros de estudio presentados en conjunto con valores de corriente y tiempo de actuación se procede a calcular los niveles de corriente, energía incidente y categoría normada para caso.

Caso	I_a [kA]	E_i [J/cm ²]	DS [mm]	Categoría
1. Lado BT con I_k^{\max}	4,96	2,4	364,2	0
2. Lado BT con I_k^{\min}	2,85	7,2	775,6	1

Tabla 4. Valores obtenidos mediante calculo para cada corriente de falla Arc Flash en caso de estudio.

En este caso vemos que para la corriente mínima tenemos una peor condición de falla con una categoría de nivel uno (1), lo cual amerita un nivel de protección mayor, debiendo colocar a su vez una etiqueta en el tablero general para este caso de estudio de forma tal que se tenga pleno conocimiento del daño potencial que puede ocurrir en caso de producirse el arco luminoso.

	CATEGORIA	
	0	
Energía límite: 5,02 [J/cm ²]		
Distancia de Trabajo: 609,0 [mm]		
Distancia de Seguridad: 364,2 [mm]		
Nivel de Tensión: 0,4 [kV]		
ID Tablero: caso_ikmax		
CATEGORIA 0		Fecha: 01/09/2022 Autor: JIT 2022
	CATEGORIA	
	1	
Energía límite: 16,73 [J/cm ²]		
Distancia de Trabajo: 609,0 [mm]		
Distancia de Seguridad: 775,6 [mm]		
Nivel de Tensión: 0,4 [kV]		
ID Tablero: caso_ikmin		
CATEGORIA 1		Fecha: 01/09/2022 Autor: JIT 2022

Tabla 5. Categorización de Riesgo Eléctrico.

Medidas de mitigación: Para mitigar los potenciales daños que pueden producirse por Arc Flash debemos trabajar en las variables que influyen en la energía puesta en juego. Los parámetros de tensión, corriente de falla, tiempo y distancia del arco son básicamente las bases del cálculo para la energía producida. Los niveles de tensión y corriente no pueden ser modificados ya que dependen intrínsecamente con la red, se pueden

modificar los valores de distancia de trabajo y tiempo del arco, sin embargo, modificar la distancia de trabajo resulta difícil debido a que cuando se trabaja con un tablero en una industria, cortar el suministro de energía en dicho momento no es posible y debe trabajarse sobre el tablero tensionado, generalmente sin barreras físicas entre el operario y la instalación (por cuestiones de operatividad y mayor comodidad de trabajo), por lo que se concluye que de forma óptima controlar o modificar el tiempo de apertura de las protecciones en el parámetro.

De hecho, una de las razones por las cual la corriente mínima representa una categoría mayor en este estudio es debido al **tiempo de propagación del arco** y su mitigación.

Las empresas o industrias del mercado que se centran en la protección eléctrica actualmente están fabricando nuevas protecciones que funcionan especialmente para detectar un Arc Flash e interrumpir el circuito velozmente. Estas protecciones cuentan con sensores ópticos que, en conjunto con electrónica de alta precisión, logran tiempos de respuesta muy bajos. “Un relé de Arc Flash es un dispositivo con microprocesadores que usa sensores ópticos para detectar el comienzo de la falla. Los sensores están posicionados estratégicamente en varios cubículos dentro del tablero de distribución. Instalar un relé de Arc Flash para detectar rápidamente el problema reduce en gran medida el tiempo de despeje y la cantidad de energía liberada. Esto significa que habrá menos daños en el equipo y menores heridas en el personal que haya podido estar en el área.” - Tecs Energy Global Vision.



Figura 3. Relé de protección óptico de Arc Flash.

Conclusiones: Principalmente se destaca la importancia de este estudio para proteger la integridad del operario, así como también de la instalación en la cual se produce el evento/fenómeno, desde el área de seguridad e higiene de una empresa debe ser de vital importancia realizar el estudio dadas las condiciones pertinentes en el ámbito laboral. A partir de esta primicia, el fenómeno de Arc Flash resulta muy interesante por la exposición y metodología de cálculo para determinar el nivel de energía producido, destacando que, en este caso de estudio, el mayor nivel de energía se da para una corriente de menor valor cuantitativo (corriente mínima) pero que perpetuada en un tiempo sustancialmente mayor que la máxima corriente de falla, representa un problema de mayor importancia, lo cual suena contraintuitivo en un primer momento. La gestión preventiva que debe hacerse se aborda por el lado del correcto ajuste de las protecciones que actúan sobre el tiempo de apertura del circuito eléctrico, ya que el tiempo de exposición y propagación del arco es una variable fundamental que figura en todas las ecuaciones de energía previamente ilustradas en el documento actual. Actualmente, la normativa de la AEA-92606-2016 exige dicho estudio, consecuentemente a medida que el nivel productivo de las industrias crece, la demanda de energía consumida para lograr dicho cometido aumentará linealmente y por ende, los niveles de energía posibles por Arc Flash aumentarán exponencialmente, por lo que la criticidad de este estudio será mayor aún, así como también la implementación de mayor tecnología para protecciones, lo que facilitará la mitigación de estos arcos luminosos. Las categorías obtenidas para este estudio determinaron valores de 1 para corriente mínima $I_{k_{min}}$ con el uso de vestimenta resistente a un arco eléctrico como mínimo 4 cal/cm^2 y equipo de protección de casco de seguridad, gafas de seguridad, protección auditiva (tipo tapón), guantes de cuero para trabajo pesado y zapatos de seguridad, todo esto acompañado de un etiquetado frontal en el tablero principal. Para el caso de la corriente máxima $I_{k_{max}}$ se obtiene una categoría 0, lo que representa un riesgo menor y no requiere de una vestimenta particular más allá de no ser un material inflamable, con su consecuente etiquetado frontal en el tablero.

Referencias:

- Sangoi, E. (2022). 'Estudio de Riesgo por Arco Eléctrico Según AEA 92606. Análisis de Sensibilidad de Resultados'.
- Cerisola, G; Venaglia Y. (2021). "Análisis y Evaluación de Riesgo de Arco Eléctrico", Tesis proyecto final, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Delta, Argentina.
- Muñoz Chacón, C. A. (2015). 'Estudio de Accidentes Eléctricos y Peligro del Arco Eléctrico. Introducción a un Programa de Seguridad Eléctrica', *Revista Ciencia & Trabajo*, 53, 122-127.
- Augusto Tusan Siu Yupanqui (2018). 'Determinación y evaluación del arco eléctrico (arc flash) para la implementación de procedimientos y seguridad del personal que labora en el área eléctrica de una planta concentradora de cobre', Tesis (Ingeniero Eléctrico), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Ingeniería de Producción y Servicios, Arequipa, Perú, 148 páginas.
- Asociación Electrotécnica Argentina (2016). 'AEA 92606-1. Reglamentación para la protección contra el arco eléctrico'.
- IEEE, Standards (2018). 'IEEE-1584 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations'.
- National Fire Protection Association (2018). 'NFPA-70E Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo'.
- R. L. Doughty, Thomas E. Neal y H. L. Floyd, II (1998). 'Predicción de la energía incidente para un mejor manejo del riesgo de arco eléctrico en sistemas de distribución de energía de 600 V'.
- Ralph Lee (1984). 'El otro riesgo eléctrico: quemaduras por relámpago de arco eléctrico', *Trans. del IEEE sobre aplicaciones industriales*'.