



# Evaluación de arc flash en una minicentral hidroeléctrica

## Arc flash assessment in a small hydropower plant

Jose I. Morales B.<sup>1\*</sup>, José J. Bute H.<sup>1</sup>, Dorindo Cárdenas<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

<sup>2</sup>Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP), Panamá

<sup>3</sup>Sistema Nacional de Investigación de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación SENACYT

\*Autor de correspondencia: [dorindo.cardenas@utp.ac.pa](mailto:dorindo.cardenas@utp.ac.pa)

**RESUMEN.** El arc flash ocurre por el paso repentino de la corriente, debido a la ruptura súbita de la barrera dieléctrica del aire ionizado a través de los polos energizados. Durante este fenómeno, se libera una gran cantidad de energía en forma de calor y el personal de mantenimiento expuesto directamente a este evento está sujeto a quemaduras de tercer grado, ceguera, golpes, pérdida auditiva e incluso la muerte. El objetivo de este trabajo es mostrar una metodología práctica para el cálculo de la energía incidente a la distancia de trabajo y la frontera externa de un arc flash en un cuarto de media tensión con celdas operando con un nivel de voltaje de 34.5 kV. Las normas IEEE 1584.1-2022, IEEE 1584-2018, IEC 60947 e IEC62271 no cubren los cálculos de arc flash para tensiones mayores a 15kV, por lo tanto, para lograr el objetivo planteado, vamos a utilizar el método de Ralph Lee y luego utilizaremos un software para verificar los resultados obtenidos. También presentaremos el cálculo por medio de la aplicación del método de campos electromagnéticos. Analizando los resultados obtenidos, concluimos que para nuestro caso de estudio se requiere que todo el personal que ingrese a realizar trabajos con los equipos en funcionamiento debe contar con equipo de protección categoría 4 de acuerdo con la norma NFPA 70- 2018 para rango de energía incidente entre 25 y 40 cal/cm<sup>2</sup>. En Panamá hay gran cantidad de instalaciones con voltajes de operación por encima de 15 kV, por lo tanto, se hace necesario realizar más investigaciones y cálculos en estos lugares para garantizar la seguridad de los trabajadores ante el riesgo potencial de arc flash.

**Palabras clave.** Arc flash, energía incidente, frontera externa.

**ABSTRACT.** The arc flash occurs by the sudden passage of current due to the unexpected breakdown of the dielectric barrier of ionized air across the energized poles. During this phenomenon, a large amount of energy is released in the form of heat and personnel directly exposed to this event are subject to third degree burns, blindness, shock, hearing loss and even death. The objective of this paper is to show a practical methodology for calculating incident energy at work distance and the external boundary of an arc flash in a medium voltage room with cells operating at a voltage level of 34.5 kV. IEEE 1584.1-2022, IEEE 1584 -2018, IEC 60947 and IEC62271 standards do not cover arc flash calculations for voltages higher than 15kV, therefore, to achieve the stated objective, we will use Ralph Lee's method and then use software to verify the obtained results. We will also present the calculation by applying the electromagnetic field method. Analyzing the results, we concluded that for our case study it is required that all personnel who enter to perform works with the switchgear in operation must have category 4 personal protective equipment according to NFPA 70-2018 for incident energy range between 25 and 40 cal/cm<sup>2</sup>. In Panama there are many facilities with operating voltages above 15 kV, therefore, it is necessary to conduct further research and calculations in these places to ensure the safety of workers against the arc flash potential risk.

**Keywords.** Arc flash, incident energy, arc flash boundary.

**Citación:** J. Morales B. et al., "Evaluación de arc flash en una minicentral hidroeléctrica", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 1, pp. (112-120), 2024.

**Tipo de artículo:** Original. **Recibido:** 06 de octubre de 2023. **Recibido con correcciones:** 12 de diciembre de 2023. **Aceptado:** 20 de enero de 2024.

**DOI:** <https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3872>

**Copyright:** 2024 J. Morales B. et al., This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

## 1. Introducción

Desde mediados de los años 80s e inicios de los 90s a nivel mundial, se empezaron a estudiar los peligros al exponerse a fallas debidas a arco eléctrico. En un principio, se tenía la concepción de que el origen de las quemaduras eléctricas se debía al paso de la corriente a través del cuerpo. [1]

En el año 1982 Ralph Lee [2], desarrolló un modelo teórico que considera a la fuente como una “fuente práctica de circuitos” con una impedancia serie puramente inductiva. Se relacionan las quemaduras del cuerpo humano causadas por un arco eléctrico, estableciendo que al determinar el valor de la energía incidente se puede calcular una distancia segura a la fuente del arco, reduciendo las consecuencias de las quemaduras.

[3] En el año 1995 por primera vez se desarrolló una metodología y protocolos de prueba para cuantificar la intensidad de la energía incidente que produce un arco eléctrico en un equipo eléctrico y se definió su unidad de medida ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ). Esta información se publicó en la NFPA 70E, Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo entre las ediciones de 1995 y 2000

En el IEEE 1584 “Guide to performing Arc-Flash Hazard Calculations” [4] se establece una guía que proporciona un modelo y un proceso analítico para permitir el cálculo de la energía térmica incidente prevista y la frontera de arco eléctrico. Sin embargo, esta metodología y su modelo derivado no aplica para instalaciones con voltajes superiores a 15 kV, lo cual nos presenta el primer conflicto, ya que nuestro caso de estudio es una celda de media tensión con voltaje en barra de 34.5 kV.

Este trabajo presenta la evaluación y el cálculo de la energía incidente y la frontera externa en un cuarto de media tensión con celdas marca Schneider modelo SM6-36 DM1-A [5], ubicado en una minicentral hidroeléctrica en Chiriquí, República de Panamá.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas son sistemas de generación con capacidad hasta de 10 MW, que a partir de la energía del flujo de agua y sin necesidad de grandes represamientos, abastecen pequeños asentamientos humanos y tienen implementaciones en casi todo el mundo. [6] Éstas instalaciones cuentan con equipos eléctricos energizados en los cuales el personal que desempeña sus labores diarias se puede encontrar en presencia de exposición de arcos eléctricos y a sus terribles consecuencias que van desde quemaduras de

segundo grado hasta la muerte, dependiendo de la frontera de acercamiento al riesgo de arc flash en que se encuentre la persona al momento del accidente.

La probabilidad de fallas de arco se puede reducir mediante un mantenimiento preventivo apropiado de los equipos. Inspecciones visuales, análisis de termografía, pruebas de descargas parciales, y las pruebas basadas en el tiempo de los dispositivos de protección son ejemplos de acciones de mantenimiento preventivo. [7]

La evaluación de arc flash de una minicentral hidroeléctrica ayuda a determinar las distancias límites de seguridad requeridas y riesgos por arco eléctrico, evitando lesiones o muerte al personal de operación y mantenimiento eléctrico. En estos estudios de arco eléctrico, la energía incidente es evaluada en ubicaciones donde las inspecciones visuales y mantenimiento en equipo “vivo” o energizado son posibles, por ejemplo, [8] [9].

### 1.1 Sistema de Estudio

El sistema de estudio corresponde a la presencia de un arco eléctrico en la barra de 34.5 kV, donde están ubicadas las celdas de media tensión marca Schneider, modelo SM6-36 DM1-A que se presentan en la figura 1.

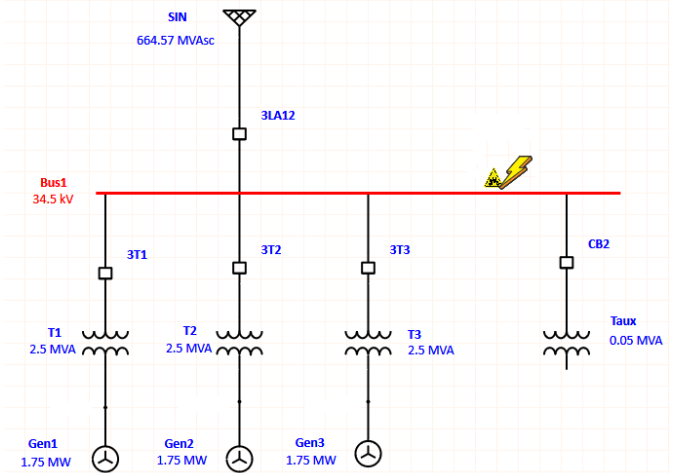


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema de estudio

Los MVA de corto circuito para esta red pública del Sistema Interconectado Nacional, ya han sido modelados estimándose en 664.57 a 34.5 kV [10]. En la minicentral hidroeléctrica hay 3 generadores síncronos con potencia de 1.75 MW y 3 transformadores con capacidad de 2.5 MVA.

## 2. Metodología

Se van a realizar los cálculos de la energía incidente a la distancia de trabajo del operario de mantenimiento para determinar la categoría de su equipo de protección personal (EPP) de acuerdo con [11] y la frontera de arc flash utilizando la metodología de Ralph Lee [2] y posteriormente se van a comparar los resultados con los obtenidos por medio de la utilización del software ETAP 19.0.1 [12]. Es importante señalar que ETAP 19.0.1 permite el uso de la metodología de Ralph Lee pero con una advertencia (ver figura 2).

Adicional se va a utilizar el método de cálculo basado en la teoría de campos electromagnéticos con el sistema de coordenadas esféricas, en el que se puede observar que R es la distancia desde el origen y, por lo tanto, la magnitud del vector de posición R. [13]

## 3. Desarrollo y discusión

Por el nivel de voltaje superior a 15 kV vamos a utilizar el método de Ralph Lee [2] como aproximación para nuestra evaluación.

- Corriente de falla  $I_K$* : Del estudio de coordinación de protecciones de la central hidroeléctrica [10] obtenemos el valor de la corriente de falla ( $I_K$ ) en la barra de 34.5 kV en la subestación.  $I_K = 2643.2$  A.
- Tiempo de despeje  $T_D$* : El tiempo de despeje será el ajuste del relé de protección asociado al interruptor 3LA12 más el tiempo de operación del mecanismo del interruptor.  
*Relevador GE MIFII INT 3LA12* [10]  
Sobrecorriente de Fase  
Relación de CT = 150  
Tiempo Definido (50P1)  
Pickup = 1.8 In (270 A)  
Delay = 1.4 seg  
Tiempo Definido (50P2)  
Pickup = 2.8 In (420 A)  
Delay = 0.8 seg

Del documento de pruebas de inyección secundaria al relé MIFII INT 3LA12 [14] obtenemos el tiempo de operación total del elemento de 0.83 s.

$$T_D = 0.8 \text{ s} + 0.03 \text{ s} = 0.83 \text{ s}$$

- Cálculo de la energía incidente E con [11] a la distancia de trabajo del operador de

mantenimiento que es aproximadamente 1 m: utilizamos la ecuación (1)

$$E = \frac{(793 * I_K * V * T_D)}{D^2} \quad (1)$$

$$E = 38.72 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$$

Donde:

E = Energía incidente, [cal/cm<sup>2</sup>]

$I_K$  = Corriente de falla de corto circuito sólido, [KA]

V = Voltaje línea-línea de la barra, [KV]

$T_D$  = tiempo de despeje

D = distancia de trabajo a la fuente del arco (39.37), [in]

- Cálculo de la distancia crítica o lo que sería aproximado a una frontera externa en baja tensión:

$$D_c = \sqrt{53 * MVA * T_d} \quad (2)$$

$$D_c = \sqrt{53 * 7.5 * 0.83}$$

$$D_c = 18.16 \text{ ft}$$

$$D_c = 18.16 \text{ ft} * 304.8 \frac{\text{mm}}{\text{ft}}$$

$$D_c = 5536.34 \text{ mm}$$

Donde:

$D_c$  = Distancia para una quemadura curable

Una forma alternativa del cálculo según Lee es utilizar los MVA para una falla sólida con la siguiente ecuación:

$$D_c = \sqrt{53 * MVA_{bf} * T_d} \quad (3)$$

$$D_c = \sqrt{2.65 * 157.95 * 0.83}$$

$$D_c = 18.64 \text{ ft}$$

$$D_c = 18.64 \text{ ft} * 304.8 \frac{\text{mm}}{\text{ft}}$$

$$D_c = 5681.16 \text{ mm}$$

Donde:

$D_c$  = Distancia para una quemadura curable

Como dato informativo en el estándar IEEE 1584-2002 [15] se incluyó la siguiente fórmula derivada del método de Lee para calcular la energía incidente para voltajes superiores a 15 kV:

$$E = 2.142 \times 10^6 VI_{bf} \left( \frac{t}{D^2} \right) \quad (4)$$

Donde:

E = Energía incidente, [J/cm<sup>2</sup>]

I<sub>bf</sub> = Corriente de falla de corto circuito sólido, [KA]

V = Voltaje línea-línea de la barra, [KV]

t = tiempo de despeje

D = distancia de trabajo a la fuente del arco, [mm]

Utilizando la ecuación (4), obtenemos un valor de E = 162.124 J/cm<sup>2</sup>

Realizando la conversión de J/cm<sup>2</sup> a cal/cm<sup>2</sup>:

$$162.124 \left( \frac{J}{cm^2} \right) * 0.238846 \left( \frac{cal}{cm^2} \right) = 38.72 \frac{cal}{cm^2}$$

Obviamente al utilizar la ecuación (4) tendremos un valor de E similar al resultado obtenido con la ecuación (1) ya que se basan en el modelo de Ralph Lee.

### 3.1 Simulaciones en ETAP 19.0.1

Para esta parte de nuestro estudio vamos a utilizar el software ETAP 19.0.1 [12] y comparar nuestros cálculos con la simulación del software. Una vez que el sistema de potencia es modelado y toda la data requerida es definida, el software ETAP 19.0.1 puede llevar a cabo los cálculos requeridos. [16]

Como primer punto al iniciar el cálculo de arco eléctrico se nos indica que para tensiones superiores a 15 kV se utilizará el método teórico derivado de Lee y aparece la advertencia de la figura 2. De la tabla D.1 de la norma NFPA 70-2018 [11] se nos indica que el cálculo de Lee se hace más conservador a medida que aumenta la tensión.

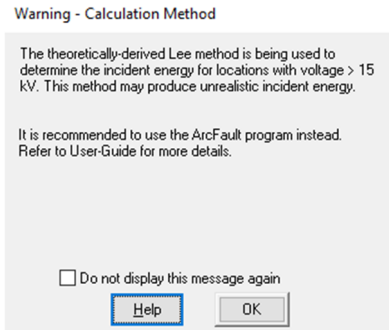


Figura 2. Advertencia ETAP 19.0.1 [12]

Luego procedemos a simular el diagrama unifilar de la figura 1 con los valores de entrada presentados en la figura 3:

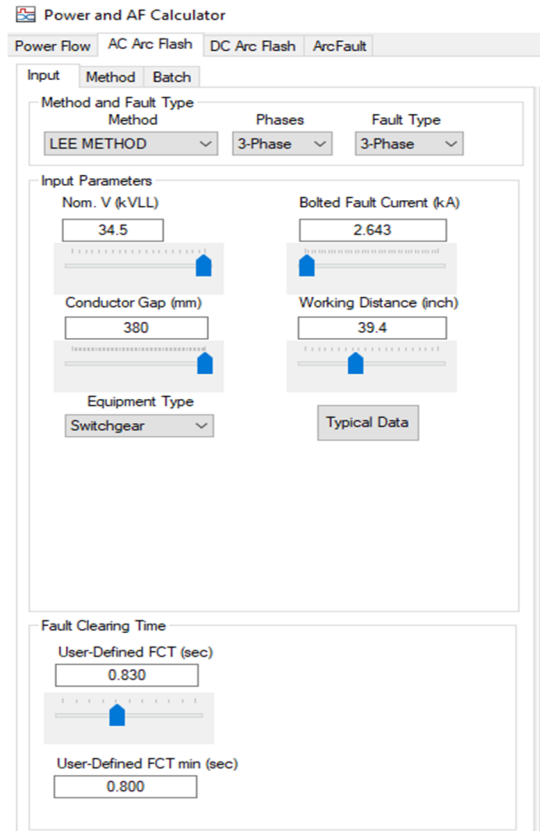


Figura 3. Arc flash calculator ETAP 19.0.1 [12]

En la figura 4 presentamos los resultados del cálculo:

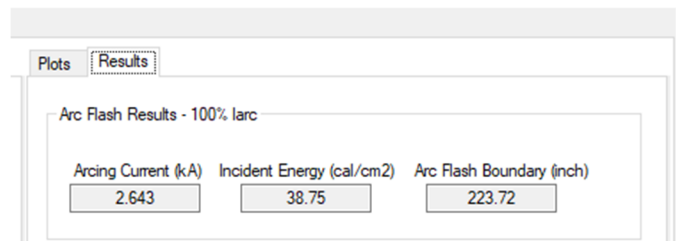


Figura 4. Resultados Arc flash ETAP 19.0.1 [12]

El resultado de frontera de arc flash obtenido en pulgadas con ETAP se procederá a convertir a mm:

$$223.72 \text{ inch} * 25.4 \left( \frac{\text{mm}}{\text{inch}} \right) = 5682.49 \text{ mm}$$

ETAP 19.0.1 en la sección de resultados también nos presenta unas gráficas interesantes que observamos en la figura 5 y figura 6 a continuación:

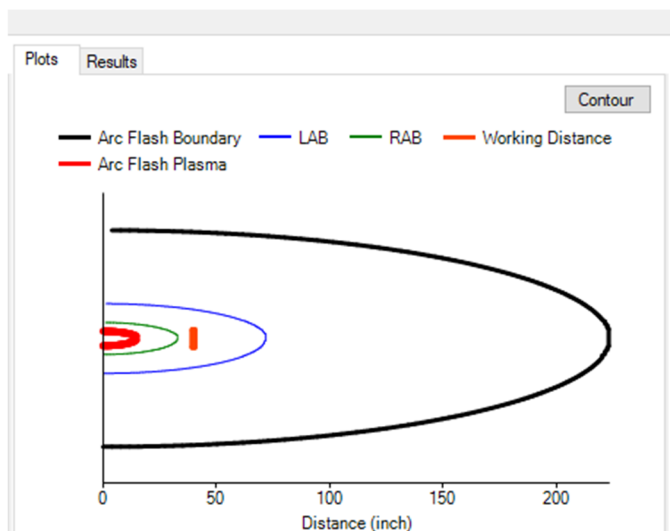


Figura 5. Frontera de arco eléctrico (color negro) ETAP 19.0.1 [12]

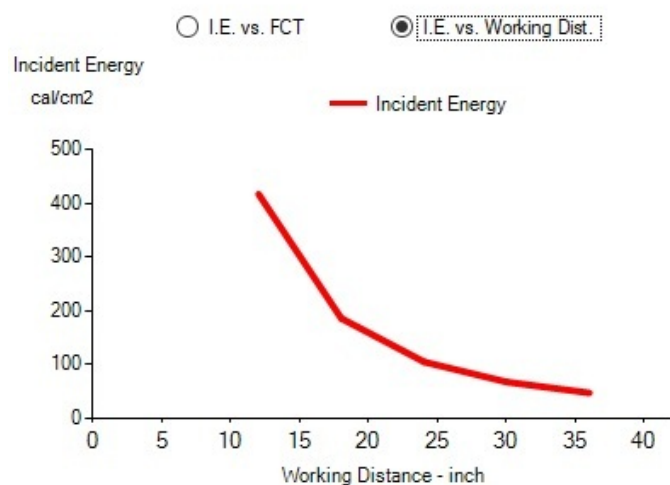


Figura 6. Energía incidente vs distancia de trabajo ETAP 19.0.1 [12]

### 3.2 Método de campos electromagnéticos (EM)

Para encontrar la frontera externa por este método primero se necesita relacionar la intensidad de radiación de potencia por área de falla de la siguiente manera:

$$I_{nt} = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Donde:

$I_{nt}$  = Intensidad como una función de la posición

P = Potencia neta radiada

S = Área

Ahora vamos a utilizar el flujo de potencia a través de una superficie gaussiana [17] y a calcular la potencia de falla trifásica con los datos del caso de estudio:

$$P_{3F} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi = 126.357 MW$$

Donde:

$P_{3F}$  = Potencia de falla trifásica, [MW]

I = Corriente de falla de corto circuito sólido, [kA]

V = Voltaje línea-línea de la barra, [kV]

$\cos \phi$  = factor de potencia (0.8)

$$P_{1F} = \frac{P_{3F}}{3}$$

$$P_{1F} = \vec{I}_{nt} \times \vec{S} \quad (6)$$

Donde:

$\vec{I}_{nt}$  = Vector intensidad de radiación de potencia

$\vec{S}$  = Vector de superficie total

Asumiendo que  $\vec{I}_{nt}$  es constante y radial en coordenadas esféricas (ver figura 7):

$$\vec{I}_{nt} = \frac{dP}{dS} \vec{\mu}_R \quad (7)$$

$$\vec{I}_{nt} = \frac{P_{1F}}{\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} R^2 \sin \theta d\theta d\phi} \vec{\mu}_R \quad (8)$$

$$\vec{I}_{nt} = \frac{P_{1F}}{4\pi R^2} \vec{\mu}_R \quad (9)$$

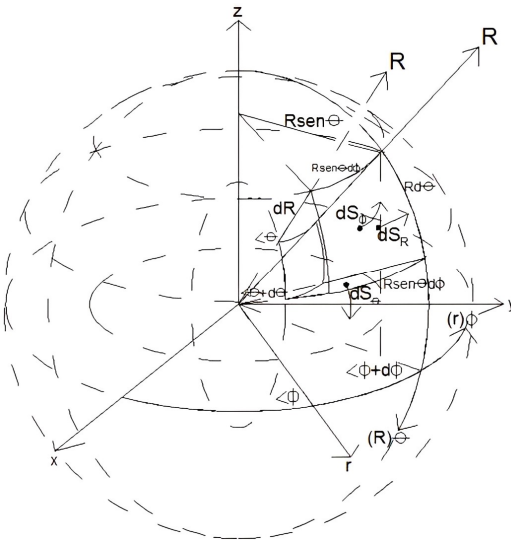


Figura 7. Coordenadas esféricas polares

Fuente: Apuntes de Teoría Electromagnética: Con explicaciones y notas de clase - Electroestática [18]

De la ecuación (9) podemos despejar la distancia R a la que queremos una intensidad de potencia por unidad de área en la unidad que deseamos.

- Con la distancia de trabajo de 1 m, vamos a calcular la energía incidente a la que estaría expuesto un operario de mantenimiento en caso de presentarse un arc flash.
- Luego vamos a despejar la distancia R a la que queremos una intensidad de potencia por unidad de área de 1.2 cal/cm<sup>2</sup> o 50 246.6 J/m<sup>2</sup> para definir la distancia crítica Dc.

Reorganizando la fórmula (9) tenemos que:

$$\frac{P_{1F} \times Td}{S_{esf}} = \left[ \frac{Q_{arc}}{S_{esf}} \right] \quad (10)$$

Considerando el tiempo de despeje Td = 0.83 s, procedemos a calcular la energía incidente a la distancia de trabajo de 1m:

$$\frac{P_{1F} \times Td}{4\pi R^2} = \left[ \frac{Q_{arc}}{S_{esf}} \right]$$

$$\frac{42.119MW \times 0.83s}{4\pi(100cm)^2} = \left[ \frac{Q_{arc}}{S_{esf}} \right]$$

$$E = 278.193 \text{ J/cm}^2$$

Realizando la conversión de J/cm<sup>2</sup> a cal/cm<sup>2</sup>:

$$278.193 \left( \frac{J}{cm^2} \right) * 0.238846 \left( \frac{cal}{cm^2} \right) = 66.44 \frac{cal}{cm^2}$$

Se observa que la energía incidente calculada a la distancia de trabajo con el método de campo EM es 1.72 veces mayor a la calculada con el método de Ralph Lee.

Ahora se procede a calcular la R a una E = 1.2 cal/cm<sup>2</sup> o 50 246.6 J/cm<sup>2</sup>

$$\frac{P_{1F} \times Td}{4\pi R^2} = \left[ \frac{Q_{arc}}{S_{esf}} \right]$$

$$\frac{42.119MW \times 0.83s}{4\pi(R)^2} = 50246.6 \frac{J}{cm^2}$$

$$R = 7.44 \text{ m}$$

En la tabla 1 se muestran los resultados de la E a la distancia de trabajo:

Tabla 1. Resultados de la E a la Distancia de trabajo

Método	Fuente	Distancia de trabajo (mm)	E (cal/cm <sup>2</sup> )
Lee	ETAP 19.0.1	1000	38.75
Lee	Calculado	1000	38.72
Campos EM	Calculado	1000	66.44

En la tabla 2 se muestran los resultados de la distancia crítica en mm para una energía incidente igual a 1.2 cal/cm<sup>2</sup>:

Tabla 2. Resultados de la Dc para E = 1.2 cal/cm<sup>2</sup>

Método	Fuente	E (cal/cm <sup>2</sup> )	Distancia Crítica (mm)
Lee	ETAP 19.0.1	1.2	5682.49
Lee	Calculado	1.2	5681.16
Campos EM	Calculado	1.2	7440.80

En la tabla 1, observamos que se ha calculado la energía incidente a la distancia de trabajo de 1000 mm con el método de Lee y el método de campos EM. Los valores calculados con el método de Lee y los valores obtenidos por medio del software ETAP 19.0.1 son muy similares ya que ambos están basados en el método de Ralph Lee [2]. Dicha metodología ha sido una referencia para los códigos y estándares que se han ocupado de la seguridad en temas de arco eléctrico. Si bien es también conocido que esta aproximación es más bien conservadora, sigue siendo válida ya que no hay un estándar aprobado para el cálculo de arco eléctrico en equipos encapsulados y a tensiones mayores a 15 kV.

También se presenta el resultado obtenido por el método de cálculo basado en la filosofía de análisis de campos electromagnéticos donde el resultado fue de 66.44 cal/cm<sup>2</sup>. La diferencia vs el método de Lee se debe a que el modelo de campos EM considera una disipación de potencia total y el modelo de Lee ha probado experimentalmente que la disipación de potencia no es total.

En la tabla 2 se calcula la distancia crítica considerando una energía incidente de 1.2 cal/cm<sup>2</sup>, donde nuevamente observamos que con el modelo de campos EM obtenemos un resultado mayor al encontrado utilizando el método de Lee.

### 3.3 Evaluación del equipo de protección personal (EPP)

Para cada factor de peligro en un ambiente de trabajo es necesario seleccionar el equipo de protección personal (EPP) adecuado con su adecuado nivel de protección. En el caso de protección contra arcos eléctricos, esto es obligatorio también [19]. Por cuestiones de seguridad, la evaluación del arco eléctrico y la determinación del EPP se convierte en el tema más importante en instalaciones industriales [20]. Un número significativo de lesiones por quemaduras de segundo y tercer grado son el resultado de la intensa energía radiante y convectiva de un arco eléctrico [21].

Los impactos destructivos de un evento de arc flash pueden provocar lesiones severas al personal de mantenimiento, daños costosos a las celdas de media tensión y largas interrupciones del sistema [22].

Para la especificación y adquisición de los EPP, se deberá tener en cuenta las siguientes normas, que aplican para el material de estos:

- IEC 61482-1-1-2020 [23]: la cual establece procedimientos para evaluar y clasificar el material

utilizado para los vestidos anti-flamas, que pueden estar expuestos a arco eléctrico. • Para especificar individualmente los EPP, se podrá hacer uso de las normas especificadas en la NFPA 70-E, la cual discrimina elemento por elemento. [24]

La tabla 3 corresponde a un resumen de la tabla 130.7 (C) (15) del [11] para el EPP de acuerdo con la energía incidente del arc flash:

Tabla 3. Categoría de EPP de acuerdo con la E

Categoría de EPP de arc flash	Rango de energía incidente (cal/cm <sup>2</sup> )
1	$1.2 < E \leq 4$
2	$4 < E \leq 8$
3	$8 < E \leq 25$
4	$25 < E \leq 40$

## 4. Conclusiones

Al realizar el análisis de este caso de estudio, primero se revisaron y estudiaron varias metodologías y normas, entre las que se pueden mencionar: Método de Ralph Lee, IEE-1584.1-2022 [25], IEEE-1584-2018, NFPA 70E-2018, IEC 60947, IEC62271-200 [26], Doughty y Floyd [27] y el Método Integrado [28]. Sin embargo, todos tienen sus características y limitaciones, por lo tanto, antes de decidir cual aplicar, es conveniente comprender cual brinda una mejor aproximación para el sistema de estudio a discutir.

De la tabla 3 y considerando los resultados obtenidos en la tabla 1, podemos indicar que todo el personal que vaya a realizar maniobras de mantenimiento en las celdas de media tensión analizadas en este caso de estudio utilice EPP categoría 4. Este tipo de vestimenta tiene protección contra riesgos térmicos por arco eléctrico, calor y llama, soldadura y antiestático. [29]

En el sistema interconectado nacional de Panamá existen varias mini hidroeléctricas y plantas de generación de energía con voltajes en barra del lado primario de 34.5 kV, por lo que nuestro análisis y aplicación de la metodología puede servir como punto de partida para que los responsables de seguridad ocupacional puedan aplicar este procedimiento y realizar los estudios de arc flash en sus instalaciones. Es conveniente recopilar toda la información que se pueda de la instalación que se va a analizar, por ejemplo: los estudios de coordinación de protecciones de la central,

estudios de corto circuito, manuales de los fabricantes de los equipos, ya que gran parte de la información que se utilizará proviene de esas fuentes. [30] De lo contrario será necesario generar esa data por medio de cálculos de ingeniería eléctrica.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen a la Universidad Tecnológica de Panamá en el programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica, al Sistema Nacional de Investigación de la SENACYT y al CEMCIT-AIP por el soporte en la elaboración del presente artículo.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

J.M., J.B. y D.C. contribuyeron en la investigación, conceptualización, preparación y corrección del artículo con un aporte del 100% del artículo.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] P. A. L. Morales, «Marco Comparativo entre la Norma IEEE 1584 y la Norma NFPA 70E,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2018.
- [2] R. H. Lee, «The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns,» IEEE Transactions on Industry Applications, Vols. %1 de %2IA-18, n° 3, pp. 246-251, 1982.
- [3] V. H. Osorio, E. O. Hernández Martínez y E. Morales González, «Análisis de arco eléctrico y reducción de energía incidente en una planta de refinación,» 2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference - Brasil (PCIC Brasil), pp. 141-146, 2014.
- [4] «IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations - Redline,» IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002) - Redline , pp. 1-341, 2018.
- [5] S. Electric, «Schneider Electric,» 2023. [En línea]. Available: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=User+guide&p\\_File\\_Name=EAV4899701-00.pdf&p\\_Doc\\_Ref=User\\_guide\\_SM6-36](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=EAV4899701-00.pdf&p_Doc_Ref=User_guide_SM6-36).
- [6] F. Sierra, A. Sierra y C. Guerrero, «Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica,» Informador Técnico SENA, vol. 1, n° 75, pp. 73-85, 2011.
- [7] L. Kumpulainen, G. A. Hussain, M. Rival, M. Lehtonen y K. Kauhaniemi, «Aspects of arc-flash protection and prediction,» Electric Power Systems Research, pp. 77-86, 2014.
- [8] J. Rachford, «"Major arc flash + good practices = no injuries,"» 2010 IEEE IAS Electrical Safety Workshop, pp. 53-55, 2010.
- [9] S. Paul y W. Jewell, «"Optimization Methodology for Minimizing the Arc Flash Incident Energy,"» 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), pp. 1-6, 2018.
- [10] IPELSA, «Revisión de Estudio de Coordinación de Protecciones Central Hidroeléctrica Macano,» 2017.
- [11] N. 70E, «Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo,» NFPA, Quincy, Massachusetts, 2018.
- [12] I. Operation Technology, «ETAP 19.0.1,» Irvine, California.
- [13] R. K. Wangsness, Campos Electromagnéticos, México DF: Limusa, 2001, p. 681.
- [14] E. y. P. E. S.A., «Pruebas de inyección secundaria a MIFII – INTERRUPTOR 3LA12,» EPRESA, Panamá, 2023.
- [15] IEEE, «IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations,» IEEE Std 1584-2002.
- [16] A. Khan y M. M. Aman], «Investigation of the effects of critical incident energy parameters using ETAP® to reduce arc flash hazards,» de 2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG), Mirpur Azad Kashmir, Pakistan, 2018.
- [17] H. D. YOUNG y R. A. FREEDMAN, Física universitaria, con física moderna, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2009.
- [18] D. E. Cárdenas, Apuntes de Teoría Electromagnética: Con explicaciones y notas de clase-Electrostática, vol. 1, Columbia, SC, 2021, p. p140.
- [19] T. Jordan y M. Kauschke, «Practical experience of different arc assessment methods and their comparison,» 2017 12th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM), pp. 1-3, 2017.
- [20] C. Yoddee, W. Kanokbannakorn y S. Srisonpan, «Arc Flash Hazard Assessment in Medium Voltage Switchgear: A Case Study in Cement Plant,» 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON), pp. 1-4, 2018.
- [21] R. L. Doughty, T. E. Neal, G. M. Lavery y H. Hoagland, «Electric arc hazard assessment and personnel protection,» Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129), vol. 4, pp. 2782-2789, 2000.
- [22] P. E. S. Faried y W. Hakelberg, «Arc Flash – IEEE 1584-2018, NFPA 70E 2018, & OSHA Final Rule Highlights and Arc



- Flash Mitigation Technologies,» 2019 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA), pp. 1-10, 2019.
- [23] UNE EN IEC 61482-1-1:2020, Live working - Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc - Part 1-1: Test methods - Method 1: Determination of the arc rating (ELIM, ATPV and/or EBT) of clothing materials and of protective clothing using an open arc, 2020-05-20.
- [24] F. J. R. Cano y F. . A. Rivas Paternina, «Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía,» Revista CIER, n° 60, pp. 57-69, Septiembre 2011.
- [25] IEEE, «IEEE Guide for the Specification of Scope and Deliverable Requirements for an Arc-Flash Hazard Calculation Study in Accordance with IEEE Std 1584,» IEEE Std 1584.1-2022 (Revision of IEEE Std 1584.1-2013), pp. 1-30, 2022.
- [26] IEC 62271-200, «High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV,» Edición 2.0, 2011.
- [27] R. L. Doughty, . T. E. Neal y H. L. Floyd, «Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600-V power distribution systems,» IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 257-269, 2000.
- [28] M. A. y R. Luo, «"An Improved Arc Flash Energy Calculation Method and Its Application",» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, pp. 5062-5067, 2017.
- [29] Sicame Group, «Arc Flash & Multirisk Protective Clothing,» 2021. [En línea]. Available: [https://comulsa.pe/wp-content/uploads/2021/10/CATU\\_CAT-ARC\\_2021\\_ESP\\_LD.pdf](https://comulsa.pe/wp-content/uploads/2021/10/CATU_CAT-ARC_2021_ESP_LD.pdf).
- [30] Eaton, «7 things to look for in an arc flash study,» Cleveland, 2018.