



# Propuesta de Metodología para Estudios de Arc Flash en Instalaciones Eléctricas con Herramientas de Software Libre

## Proposed Methodology for Arc Flash Studies in Electrical Installations Using Open-Source Software

Presentación: 15/10/2024

Aprobación: 10/03/2025

Publicación: 27/03/2025

### **Emmanuel Sangoi**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos, Argentina.  
esangoi@frsf.utn.edu.ar

### **Lautaro Daniel Rossi**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos, Argentina.  
lrossi@frsf.utn.edu.ar

### **Juan Pedro Fernández**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos, Argentina.  
jpfernan@frsf.utn.edu.ar

### **Ariel Sebastián Loyarte**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos, Argentina.  
aloyarte@frsf.utn.edu.ar

### **Ulises Manassero**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos, Argentina.  
umanassero@frsf.utn.edu.ar

### **Resumen**

Los estudios de *arc flash* permiten evaluar riesgos asociados con arcos eléctricos y definir los requerimientos de protección personal en instalaciones eléctricas. Este trabajo propone una metodología para realizar estos estudios utilizando software libre como alternativa a las

herramientas comerciales. El análisis requiere de un procedimiento de cálculo basado en ecuaciones empíricas, que se inicia a partir de un estudio de cortocircuito y de protecciones. Se desarrolla y analizan los resultados de un nuevo software programado en Python, bajo las directivas de la norma de la Asociación Electrotécnica Argentina 92606. Los resultados demuestran la flexibilidad de la herramienta, que además de ponderar el nivel de riesgo y generar la señalización requerida, realiza un análisis de sensibilidad de múltiples parámetros, lo que permite decidir y proyectar sobre modificaciones en la instalación con la finalidad de reducir el nivel de riesgo. Finalmente, se concluye sobre la potencialidad y limitaciones del software.

**Palabras Clave:** Riesgo por Arco Eléctrico, Cortocircuito, Instalaciones Eléctricas de Potencia, Seguridad, Software Libre.

### Abstract

*Arc flash* studies allow for the assessment of risks associated with electrical arcs and help define the personal protective equipment requirements in electrical installations. This paper proposes a methodology for conducting these studies using open-source software as an alternative to commercial tools. The analysis follows a calculation procedure based on empirical equations, which begins with a short-circuit and protection study. A new software, developed in Python and aligned with the standard 92606 of the Argentine Electrotechnical Association, is introduced and its results are analyzed. The results demonstrate the flexibility of the tool, as it not only assesses the risk level and generates the required signage, but also performs sensitivity analysis across multiple parameters. This enables decision-making and planning for modifications in the installation to reduce the risk level. Lastly, the paper discusses the software's potential and limitations.

**Keywords:** Arc Flash Hazard, Short-Circuit, Power Electrical Installations, Safety, Open-Source Software.

### Introducción

Cualquier operario que trabaje en instalaciones eléctricas energizadas está expuesto a riesgos de accidentes por el arco eléctrico (del inglés: *arc flash*) que puede generarse entre dos puntos con distinto potencial y ante determinadas maniobras o accidentes. Las consecuencias de estos eventos pueden ser graves, y en algunos casos mortales, incluyendo quemaduras, pérdidas de la visión, pérdidas auditivas, lesiones por materiales expulsados, inhalación de gases tóxicos, etc. (Jones et al., 1997). Para mitigar estos riesgos, se pueden adoptar medidas preventivas, como incrementar las distancias de trabajo y/o emplear un equipo de protección personal (EPP) adecuados. En la etapa de diseño del sistema eléctrico, también puede recurrirse a limitar la energía térmica asociada al arco eléctrico mediante técnicas que logren reducir el valor de la corriente de arco y/o su duración (Inshaw & Wilson, 2005). Para casos en los que la energía prevista para el arco eléctrico resulte elevada, manipular estas dos variables resulta en una de las técnicas más utilizadas para atenuar los riesgos asociados (Lippert et al., 2004; Wilson et al., 2007).

Un estudio de arc flash procura estimar el valor de la energía térmica asociada al arco eléctrico susceptible de ser generada ante un eventual cortocircuito motivado por una

maniobra o cortocircuito accidental en la instalación. Con ello, se busca definir el grado de protección más adecuado para el EPP de los operarios que maniobran la instalación (Doan & Sweigart, 2002), o bien, definir condiciones de diseño que permitan minimizar los riesgos. Los estudios de riesgo por arco eléctrico son cada vez más exigidos en el ámbito de la seguridad laboral y se llevan a cabo generalmente en base a dos normas internacionales (Tajali, 2012): NFPA 70E (Standard for Electrical Safety in the Workplace) e IEEE Std. 1584 (Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations), las cuales se fundamentan en ecuaciones mayormente empíricas de reconocimiento científico internacional. En Argentina, estos estudios son realizados en el ámbito de la norma AEA 92606 (Arco Eléctrico: Cálculo de Magnitudes de Los Efectos Térmicos y Su Protección). Por razones de disponibilidad, este trabajo se basa en la versión 2016 de dicha norma (AEA 92606: Arco Eléctrico. Cálculo de Magnitudes de Los Efectos Térmicos y Su Protección., 2016), la cual, a su vez, se basa en la versión 2002 del estándar IEEE 1584 (IEEE Standard 1584 Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations, 2002) y en la versión 2012 del estándar NFPA 70E (Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2012).

Como resultado del estudio, se asigna una categoría al riesgo existente sobre distintos puntos de la instalación, principalmente en tableros y puntos habituales de maniobra. Para ello, se considera al valor estimado de la energía térmica incidente ( $E_i$ ) susceptible de producirse ante un cortocircuito, dependiente de múltiples variables asociadas a la instalación. Estas categorías se numeran entre 0 y 4 (cat. 0:  $E_i < 5,02 \text{ J/cm}^2$ , cat. 1:  $E_i < 16,73 \text{ J/cm}^2$ , cat. 2:  $E_i < 33,47 \text{ J/cm}^2$ , cat. 3:  $E_i < 104,6 \text{ J/cm}^2$ , cat. 4:  $E_i < 167,36 \text{ J/cm}^2$ ). La “Categoría 0” es la más leve, mientras que la “Categoría 4” es la más restrictiva. Cada categoría se identifica a su vez por un color que se imprime en la etiqueta que posteriormente es incorporada como señal de advertencia en la instalación. Cuando las estimaciones para  $E_i$  resultan mayores a  $167,36 \text{ J/cm}^2$ , se recomienda no realizar trabajos con el sistema energizado, debido principalmente a un alto grado de riesgo de muerte ante un eventual cortocircuito (pueden considerarse “trabajos prohibidos”). Una vez definida la categoría, se definen distancias de seguridad para distintas tareas, se selecciona el EPP más adecuado para operar en las inmediaciones del punto bajo análisis, y se confeccionan las etiquetas informativas o de advertencia para el personal.

En los estudios de *arc flash* resulta imperioso conocer primeramente la corriente de cortocircuito en el punto analizado de la instalación y el tiempo de duración estimado para el mismo, vinculado a la actuación de la correspondiente protección. La obtención de estas variables representa uno de los mayores desafíos, dado que el tiempo de arco a su vez depende de la configuración de las protecciones, y las corrientes de cortocircuito pueden modificarse de acuerdo con el escenario contemplado. Por caso, algunas instalaciones presentan una estructura flexible con posibilidades de reconfiguración en virtud del accionamiento de interruptores y seccionadores. En consecuencia, el requerimiento previo de un estudio de cortocircuito y de tiempos de actuación de las protecciones contribuye complejizando el análisis, en una etapa previa al procedimiento de estimación del riesgo estandarizado por norma. Actualmente, estos estudios son realizados mayormente con software de licencia comercial a partir de módulos específicos, pero no siempre son accesibles para empresas distribuidoras, pequeñas industrias o incluso universidades y centros de formación debido a su alto costo. Alternativamente, existen herramientas de software libre y gratuito que permiten modelar sistemas eléctricos y realizar cálculos de cortocircuito y flujos de potencia, pero a la fecha no incorporan funciones específicas para estudios de *arc flash*. Entre los software

gratuitos más destacados por su potencial aplicación sobre redes de distribución en baja y media tensión, y en el ámbito de instalaciones eléctricas industriales, puede mencionarse a *OpenDSS* (Dugan & McDermott, 2011), la librería *PandaPower* en entornos de Python (Leon Thurner et al., 2018), y el software *ATP* (*Alternative Transients Program*).

En este trabajo se propone el desarrollo de una herramienta para realizar estudios de *arc flash* de manera integral mediante el empleo de software libre y gratuito. El software, desarrollado en Python, recurre en una primera etapa a la librería *PandaPower* para llevar a cabo un estudio de cortocircuito y, con base en estos resultados, en una segunda etapa el programa determina la protección actuante y tiempo de demanda para despejar la falla; finalmente, ejecuta el estudio de *arc flash* sobre barras específicas de la instalación. El funcionamiento y los resultados de esta herramienta se analizan sobre la instalación eléctrica de una central termoeléctrica, que oficia como sistema de estudio. Para los cálculos asociados al riesgo por arco eléctrico se consideran las ecuaciones y modelos definidos en la norma AEA 92606, vigente actualmente para Argentina.

## Metodología

Al analizar el riesgo por arco eléctrico en una instalación, interesa fundamentalmente determinar tres variables importantes: i) la corriente de arco ( $I_a$ , en kA); ii) la energía térmica incidente ( $Ei$ , en  $J/cm^2$ ) a la que estaría expuesto el operario ante un eventual cortocircuito; y iii) la distancia de seguridad ( $DS$ , en  $mm$ ) para la cual el operario se expone a quemaduras no mortales, en caso de producirse el arco frente a él.

El valor de  $I_a$  resulta generalmente menor a la corriente de un cortocircuito franco ( $I_k$ , en kA), debido mayormente a la impedancia del arco. De acuerdo con las normativas,  $I_a$  se calcula en función de la corriente de cortocircuito franco para sistemas con tensiones comprendidas entre 1 kV y 15 kV, pero para sistemas de baja tensión es un poco más complejo, e influyen también otras variables como la tensión, la distancia entre contactos y la configuración física del sistema. Mayores detalles sobre su cálculo se brindan en norma (AEA 92606: Arco Eléctrico. Cálculo de Magnitudes de Los Efectos Térmicos y Su Protección., 2016). A su vez, la corriente de arco condiciona el tiempo de apertura de las protecciones y define el tiempo de arco ( $t_a$ , en segundos).

La cantidad  $Ei$  se calcula según (AEA 92606: Arco Eléctrico. Cálculo de Magnitudes de Los Efectos Térmicos y Su Protección., 2016):

$$Ei = 4,184 \cdot C_f \cdot 10^{(k_1+k_2+1,081 \cdot \log(I_a)+0,0011 \cdot G)} \cdot \frac{t_a}{0,2} \cdot \frac{610^x}{D^x} \quad (1)$$

donde  $D$  (en  $mm$ ) es la distancia de trabajo, y  $G$  (en  $mm$ ) es la separación entre los contactos de diferente potencial, entre los cuales se produce el arco. Además, el factor  $C_f$  se escoge de acuerdo con la tensión de línea del sistema ( $V$ , en kV), mientras que  $k_1$  y  $k_2$  se asignan según la configuración del sistema de puesta a tierra (“aterrado” o “aislado”) y del punto en análisis (la norma clasifica al recinto de trabajo como “abierto” o “cerrado”). Asimismo, la valoración del exponente  $x$  se realiza de acuerdo con la tensión de servicio y el tipo de equipamiento eléctrico involucrado, identificado con alguna de las alternativas: “al aire”, “tablero”, “CCM” (Centro de Control de Motores) o “cable”.

Por su parte, la distancia  $DS$  permite establecer barreras de seguridad en la instalación y se computa de acuerdo con:

$$DS = \left( 4,184 \cdot C_f \cdot 10^{(k_1+k_2+1,081 \cdot \log(I_a)+0,0011 \cdot G)} \cdot \frac{t_a}{0,2} \cdot \frac{610^x}{E_B} \right)^{1/x} \quad (2)$$

donde  $E_B$  es la energía incidente a la distancia de seguridad, y asume un valor constante de  $5,02 \text{ J/cm}^2$ .

La distancia  $D$  suele estar condicionada por la tensión del sistema, aunque se obtiene principalmente de relevamientos en campo o procedimientos de trabajo. Por ejemplo, resulta común adoptar distancias de trabajo de 910 mm para tensiones de línea comprendidas entre 1 kV y 34,5 kV, mientras que para tensiones entre 208 V y 600 V suelen emplearse distancias de 455 mm (Doan & Sweigart, 2002). Cabe destacar que las ecuaciones definidas en las normas son mayormente empíricas y válidas para tensiones menores a 15 kV; los sistemas con tensiones superiores requieren un análisis más específico (Marroquin et al., 2019).

En este trabajo se define una metodología que incluye varias etapas para realizar el estudio de *arc flash*. Estas etapas se integran luego en un algoritmo programado en Python que sistematiza el estudio de manera integral. Los datos de entrada se obtienen de un relevamiento y análisis previo de la instalación eléctrica, los que incluyen actividades tanto analíticas como de inspección en campo. Por un lado, se procede al modelado matemático de la instalación a través de un circuito electrotécnico equivalente y la determinación de las variables  $I_k$  y  $t_a$ , las cuales requieren de un estudio de cortocircuito previo y un relevamiento del sistema de protecciones de la red. Luego, se emplea un subalgoritmo que considera las ecuaciones y tablas definidas en la norma AEA 92606. Aquí se ingresan los datos correspondientes al caso en estudio ( $V$ ,  $D$ ,  $G$ ,  $I_k$ ,  $t_a$ , tipo de recinto, clasificación del sistema de puesta a tierra y tipo de equipamiento) y se calculan las cantidades  $E_i$  y  $DS$ , que caracterizan al punto bajo análisis (por ejemplo, un tablero seccional). El correcto desempeño y la precisión de este subalgoritmo se validó comparando sus resultados con los obtenidos en calculadores disponibles en la web y desarrollados por otros autores (Littelfuse, 2024; Van Staden, 2024).

Los valores de  $I_k$  y  $t_a$  tienen gran relevancia en los resultados del estudio de *arc flash* (Sangoi et al., 2022), por lo que su correcta valoración resulta crítica. Para definir  $I_k$  (que influye directamente en  $I_a$ ), se debe realizar un cálculo de corrientes de cortocircuito. Para ello, se recurre en primer lugar a modelar la red eléctrica y luego a ejecutar el cómputo bajo los lineamientos de la norma IEC 60909 (IEC 60909 - Corrientes de Cortocircuito En Sistemas Trifásicos de Corriente Alterna, 2001). Con esta finalidad, se recurrió a la librería de código abierto PandaPower, para el lenguaje Python. Entre sus funcionalidades, este paquete permite modelar la red y realizar cálculos de flujos de potencia y cortocircuito.

Por otro lado, para definir  $t_a$  resulta necesario conocer la corriente de arco en los interruptores actuantes ante un cortocircuito y sus respectivas curvas de actuación tiempo-corriente ( $t-I$ ). La curva  $t-I$  debe definirse durante la etapa de relevamiento de la instalación, así como también las protecciones actuantes ante cada falla. Aquí resulta importante destacar que el análisis no se realiza sobre un único escenario, sino que deben evaluarse todas las alternativas de configuración que presenta la red y que, eventualmente, condicionen la magnitud de  $I_k$  (esto es, escenarios de corriente de cortocircuito mínimo y máximo). En ocasiones, los escenarios más desfavorables en cuanto a la energía térmica incidente por arco corresponden a corrientes de cortocircuito mínimas (y no máximas, como se podría suponer a priori),

ya que la duración de la falla es mayor. En consecuencia, tanto  $I_k$  como  $t_a$  se verán afectados ante los distintos escenarios evaluados, que conllevarán en consecuencia resultados diferentes a considerar. Con esta información, se determinan  $E_i$  y  $DS$ , caracterizando al punto bajo análisis para cada escenario. Los resultados finales se resumen automáticamente en una planilla de cálculo (formato *xlsx*). Luego, se comparan los resultados de los distintos escenarios y se selecciona al más severo en términos de la categoría obtenida. Como valor agregado, el algoritmo genera las etiquetas que deben ser colocadas en la instalación (señalización informativa, en formato de imagen), y genera reportes (en formato *pdf*) que facilitan un estudio de sensibilidad adicional de los resultados. La Fig. 1 resume el procedimiento implementado en el algoritmo propuesto, dividiendo al proceso en 8 etapas para su explicación.

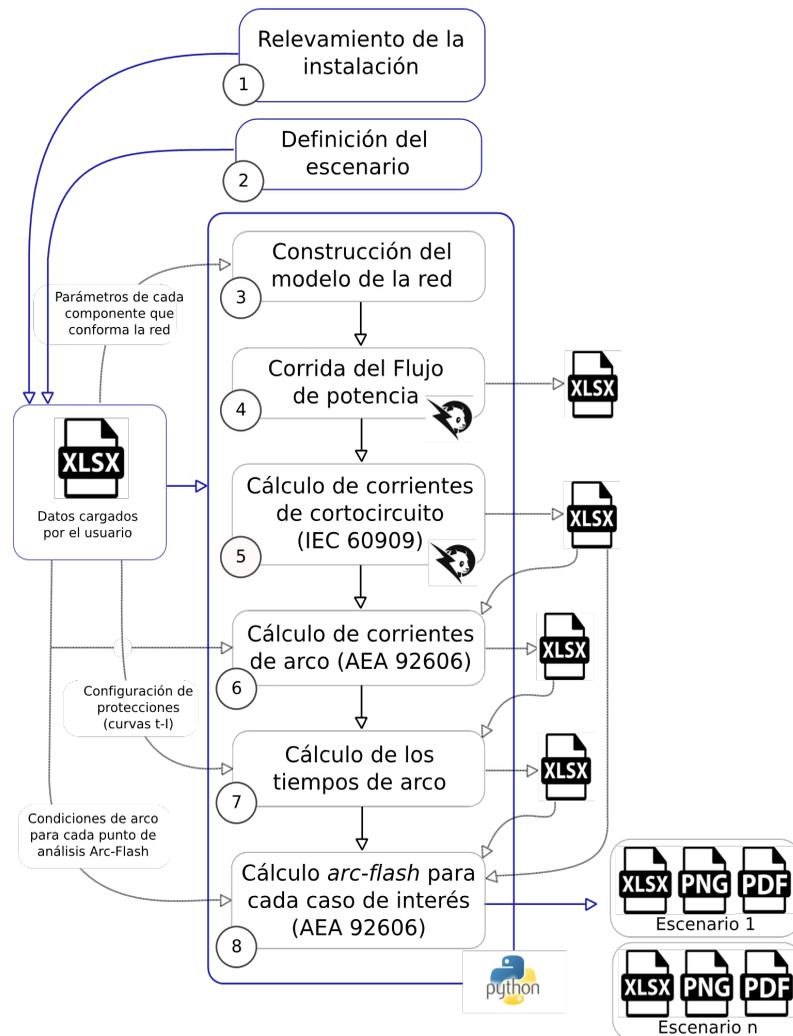


Fig. 1. Esquema simplificado del proceso propuesto para el estudio de *arc flash* en una instalación eléctrica usando Python y la librería PandaPower.

En la etapa 1 se hace un análisis y relevamiento del caso para recolectar información (esquemas unifilares, protecciones involucradas y configuración, parámetros de equipos,

relevamientos de campo, etc.). En la etapa 2 se define el escenario para el estudio (configuraciones posibles de la red, potencias de cortocircuito mínimas o máximas en la red externa, estado de demanda y despacho de generación, si corresponde). En la etapa 3 se modela la red con un script que usa la librería Python *PandaPower*. En la etapa 4 se resuelve el problema del flujo de potencia y se analizan sus resultados, a los efectos de comprobar que no se registran errores apreciables en la carga de datos o configuración de la red. En la etapa 5 se calcula la corriente de cortocircuito trifásica en cada barra, y para cada cortocircuito, se determina la corriente que pasa por cada interruptor. Para cada caso, se determina el factor de distribución de corrientes por cada interruptor. En la etapa 6 se calcula la corriente de arco en cada barra y, en función del factor de distribución de corrientes, se define la corriente de arco que "ve" cada interruptor ante cada cortocircuito. En la etapa 7 se calcula el tiempo de arco para cada punto de análisis, considerando el tiempo de apertura de todos los flujos de corriente que abastecen al cortocircuito en cada punto de interés. Finalmente, una vez determinadas todas las variables necesarias, en la etapa 8 se realizan los cálculos asociados específicamente al estudio de *arc flash* haciendo uso del subalgoritmo mencionado. De aquí se imprimen y guardan los resultados finales, reportes y etiquetas para cada caso bajo análisis

## Resultados

### A. Descripción del caso de estudio

Para evaluar el desempeño del algoritmo y la metodología propuesta, se tomó como caso de análisis a las instalaciones de una central termoeléctrica (caso de estudio real). En la Fig. 2 se muestra el esquema unifilar de la red y en la Tabla 1 se detallan algunas de sus características más relevantes. La red cuenta con tres fuentes que aportan potencia: la red externa de 132 kV y los generadores G1 y G2, asociados a turbinas de gas con distintas potencias. Cuenta con un total de 35 nodos (B0, B1, ..., B34) que operan en distintos niveles de tensión (132 - 20 - 6,6 - 0,4 kV), a los cuales se conectan un total de 8 cables con distintas secciones y longitudes, 6 transformadores de potencia, 9 demandas localizadas, dos generadores sincrónicos y 1 motor de gran potencia que acciona una bomba. A consecuencia de posibles reconfiguraciones en la red externa de 132 kV, se consideraron para ésta potencias de cortocircuito máxima y mínima de 5500 MVA y 600 MVA, respectivamente. La red modelada se compone de un total de 21 interruptores de potencia (SW1, SW2, ..., SW21), empleados para interrumpir las corrientes de cortocircuito en distintos sectores del sistema. Con el objetivo de registrar la corriente que circula por ellos ante cada cortocircuito, éstos fueron modelados en *PandaPower* como líneas de baja impedancia. Por otro lado, con el fin de calcular correctamente los tiempos de arco, se relevó la configuración de cada interruptor (curva  $t-I$ ) y el orden de selectividad ante el cortocircuito en cada una de las barras del sistema.

En la Fig. 3 se muestra la curva  $t-I$  considerada para los interruptores intervinientes en los cortocircuitos en el nivel de tensión de 6,6 kV y 0,4 kV. Estas curvas se modelaron con funciones programadas en Python. Si ante un cortocircuito deben actuar dos protecciones distintas, se adoptó como criterio usar el mayor de los tiempos de actuación resultantes (caso más severo) siempre que las corrientes intervinientes sean significativas. Este es el caso, por ejemplo, del nodo B14: el aporte de potencia de cortocircuito proviene principalmente desde la red externa y los generadores G1 y G2 (nodo B1). Aunque el motor M1 (nodo B33) también realiza un aporte, resulta en este caso despreciable frente a los demás.

Para el presente caso, interesa analizar el riesgo por arco eléctrico en las 16 barras que operan con tensiones inferiores a 15 kV (resaltadas en la Fig. 2 con un símbolo rojo y listadas en la Tabla 3). En la Tabla 3 se detallan también las características más importantes consideradas para cada punto; estos valores surgen del relevamiento en campo y de recomendaciones de la norma AEA 92606. Luego, en las barras indicadas se aplica el procedimiento detallado en la Fig. 1, contemplando 2 escenarios posibles que pueden alterar las corrientes de cortocircuito:

- Escenario 1 (E1): Potencia de cortocircuito máxima en la red externa, con G1 y G2 en servicio.
- Escenario 2 (E2): Potencia de cortocircuito mínima en la red externa, con G1 y G2 fuera de servicio.

Si bien son posibles otros escenarios alternativos (por ejemplo, con distintas configuraciones internas de la red), a los efectos de evaluar la herramienta propuesta, el estudio se limitó a estos dos escenarios por considerarlos casos extremos.

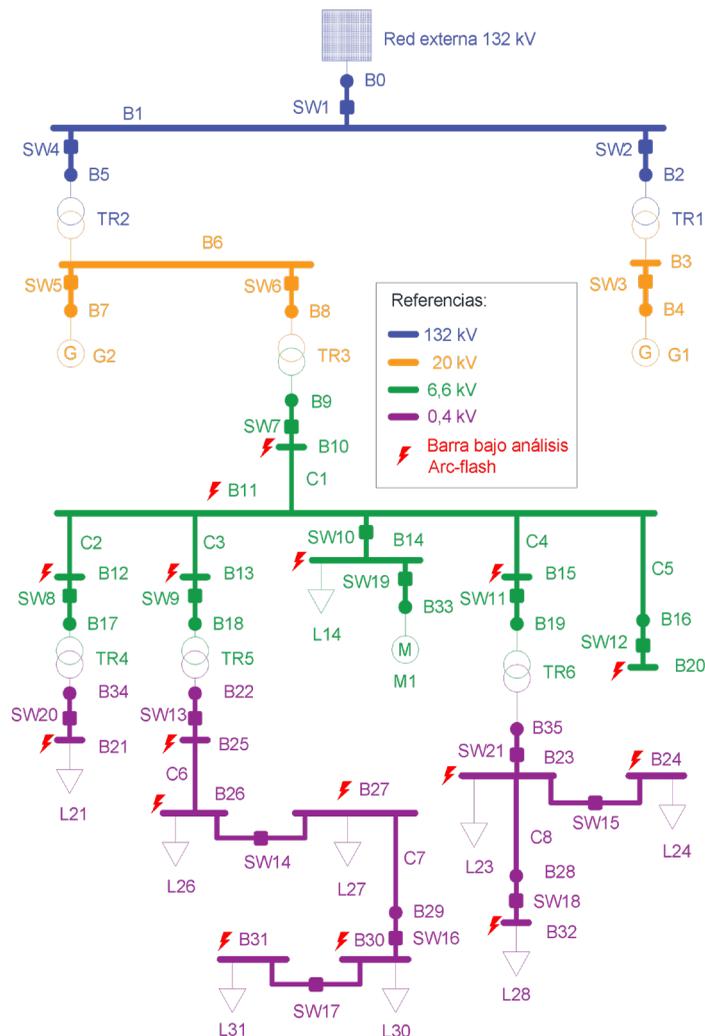


Fig. 2. Esquema unifilar de la red modelada para el estudio.

Conductores			
Nombre	Tipo	Sección [mm <sup>2</sup> ]	Longitud [m]
C1	Cable	240	31
C2	Cable	95	24
C3	Cable	95	25
C4	Cable	120	300
C5	Cable	240	25
C6	Cable	240	20
C7	Cable	240	25
C8	Cable	95	15
Transformadores			
Nombre	Tensión [kV]	Potencia [MVA]	Grupo
TR1	132/20	170	YNd
TR2	132/20	335	YNd
TR3	20/6,9	16	Dyn
TR4	6,6/0,42	1,87	Dyn
TR5	6,6/0,42	1,6	Dyn
TR6	6,6/0,42	1,6	Dyn
Generadores			
Nombre	Tensión [kV]	Potencia [MVA]	Despacho [MW]
G1	20	164,7	140,0
G2	20	336,0	285,6
Motores			
Nombre	Tensión [kV]	Potencia [MW]	Eficiencia [%]
M1	6,6	2,5	87,49
Red externa			
Nombre	Tensión [kV]	Scc max [MVA]	Scc min [MVA]
Red	132	5500	600

Tabla 1. Detalles más relevantes asociados a la red bajo estudio

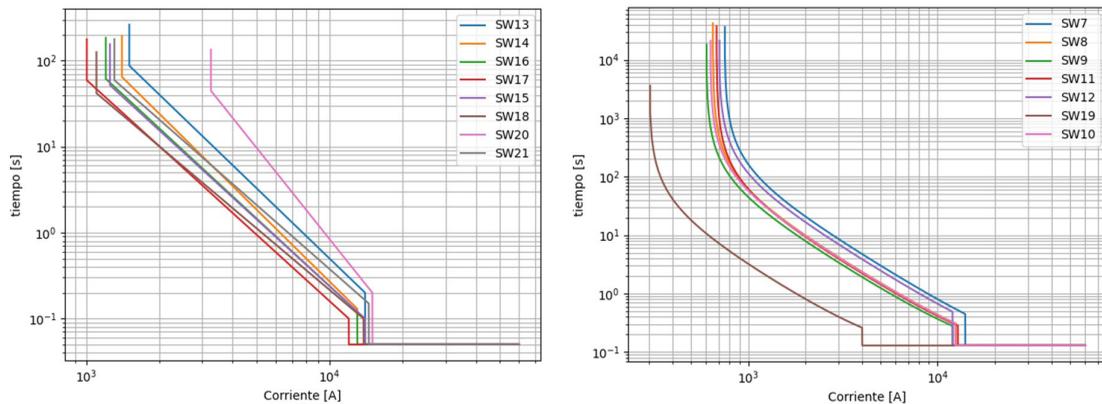


Fig. 3. Curvas t-I empleadas para las protecciones en baja tensión (izq.) y en media tensión (der.)

## B. Discusión de resultados

En la Fig. 4 se muestran las corrientes  $I_k$  e  $I_a$  resultantes para cada barra en análisis y en ambos escenarios. Se observa que, independientemente de la barra considerada, las corrientes de cortocircuito son menores en E2 que en E1 (entre un 21% y 47% inferiores) como consecuencia de la menor disponibilidad de potencia en E2. En las barras con mayor tensión nominal, se destaca que  $I_a$  resulta cercano a  $I_k$ , mientras que en las barras de baja tensión las diferencias entre  $I_k$  e  $I_a$  son más apreciables (como característica de los sistemas con tensiones menores a 1 kV, el valor de la separación entre los contactos de diferente potencial,  $G$ , tiene un peso significativamente mayor).

En la Tabla 2 se muestra la porción de  $I_a$  que es conducida por cada uno de los interruptores ante un cortocircuito en las barras analizadas para el escenario E1. En el tablero correspondiente a B11, por ejemplo, el valor de  $I_a$  al que puede quedar expuesto un operario es de 11,95 kA para E1 (valor calculado; en la Fig. 4 puede inferirse su proximidad con el valor de  $I_k$  para B11); dada la presencia del motor M1, en la Tabla 2 se observa que esta corriente es aportada mayoritariamente desde el interruptor SW7 (11,09 kA), pero también hay un aporte desde SW10 (0,859 kA). Para este ejemplo, si se consideran las cantidades de la Tabla 2 y la relación de transformación de TR3 y TR2, puede deducirse que la red externa aporta un ~40% de la corriente de falla, G1 y G2 aportan un ~4% y ~50%, respectivamente, y el motor M1 un ~6%. Estas corrientes son conducidas por los interruptores SW7 y SW10, respectivamente, a partir de las cuales se define el tiempo  $t_a$ , de acuerdo con las respectivas curvas de actuación t-I. Los resultados de la Tabla 2 también pueden emplearse para un eventual análisis de selectividad de protecciones.

Por su parte, la Fig. 4 muestra los tiempos de arco resultantes en cada barra y para ambos escenarios. Notar que  $t_a$  es mayor en E2, ya que las corrientes que “ven” los interruptores son menores en este escenario. A consecuencia de la selectividad entre protecciones y sus respectivos ajustes, las barras con tensiones nominales mayores tienen tiempos de arco mayores que las barras de baja tensión.

En la Fig. 5 se muestra la energía incidente resultante para cada barra y en ambos escenarios, junto con la categoría que le corresponde (asignada según  $Ei$ ). En la mayoría de los casos, la categoría se mantiene para los dos escenarios (aunque presenten distintos niveles de  $Ei$ ). En otros, como en las barras B21 y B25, se obtiene un resultado diferente: “Categoría 1” para E1 y “Categoría 3” para E2 (notar, en este caso, que el peor escenario resulta para

corrientes de cortocircuito mínimas). Si bien en ambos nodos  $I_a$  es menor para E2, el valor de  $t_a$  resulta considerablemente mayor en este escenario debido a los tiempos de actuación de las respectivas protecciones. En la Fig. 5 también se muestra la distancia de seguridad que resulta para cada barra y escenario; esta distancia depende principalmente de  $E_i$ , pero también de la tensión y el tipo de equipamiento que se trate.

Los resultados de la Fig. 5 fueron validados en su contraste con los obtenidos por algunas aplicaciones web disponibles online, tales como *JCalc* (Van Staden, 2024). Se advierte, no obstante, que estos programas no incluyen el modelado matemático de la red, ni los cálculos de cortocircuito, integrados en la herramienta propuesta. El modelo de la red y los procedimientos de cálculo propios de área de los sistemas eléctricos de potencia son aquí realizados por intermedio de *PandaPower*, asimismo validado por sus desarrolladores frente a aplicaciones comerciales de uso habitual en la industria eléctrica, tales como *DIGSILENT PowerFactory* y *PSS Sincal* (L. Thurner et al., n.d.), y otros paquetes libres como *PYPOWER* y *MATPOWER* (Zimmerman et al., 2010).

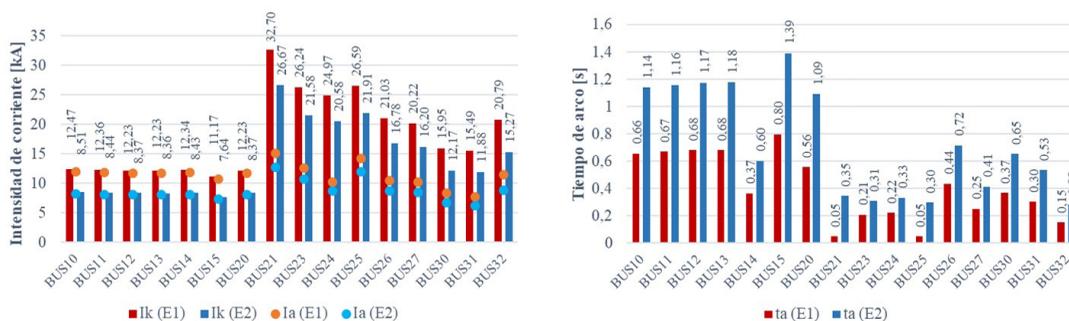


Fig. 4. Corrientes de cortocircuito y arco resultantes para cada barra y escenario (izq.) y tiempo de arco para cada barra y escenario (der.).

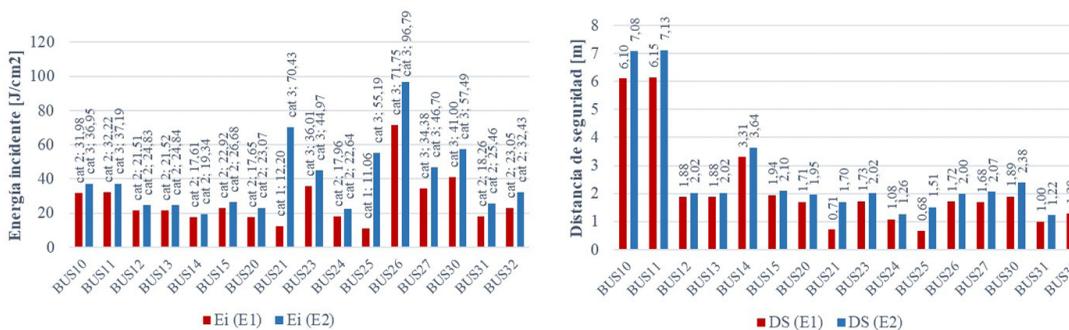


Fig. 5. Energía incidente resultante para cada barra en ambos escenarios y asignación de categoría (izq.) y distancia de seguridad para cada barra y escenario (der.).

Barra	132 kV			20 kV			6,6 kV						0,400 kV								
	SW1	SW2	SW4	SW3	SW5	SW6	SW7	SW8	SW9	SW10	SW11	SW12	SW13	SW14	SW15	SW16	SW17	SW18	SW19	SW20	SW21
B10	0,259	0,029	0,287	0,191	2,093	3,863	11,198	-	-	0,858	-	-	-	-	-	-	-	-	0,858	-	-
B11	0,256	0,029	0,284	0,190	2,073	3,826	11,091	-	-	0,859	-	-	-	-	-	-	-	-	0,859	-	-
B12	0,254	0,028	0,281	0,188	2,053	3,789	10,982	-	-	0,850	-	-	-	-	-	-	-	-	0,850	-	-
B13	0,253	0,028	0,281	0,188	2,052	3,787	10,978	-	-	0,850	-	-	-	-	-	-	-	-	0,850	-	-
B14	0,256	0,029	0,284	0,189	2,070	3,821	11,076	-	-	11,076	-	-	-	-	-	-	-	-	0,859	-	-
B15	0,232	0,026	0,257	0,172	1,878	3,466	10,047	-	-	0,778	-	-	-	-	-	-	-	-	0,778	-	-
B20	0,254	0,028	0,281	0,188	2,053	3,789	10,983	-	-	0,850	-	11,833	-	-	-	-	-	-	0,850	-	-
B21	0,021	0,002	0,023	0,015	0,167	0,309	0,896	0,965	-	0,069	-	-	-	-	-	-	-	-	0,069	15,165	-
B23	0,017	0,002	0,019	0,013	0,140	0,259	0,750	-	-	0,058	0,808	-	-	-	-	-	-	-	0,058	-	12,691
B24	0,014	0,002	0,016	0,010	0,113	0,209	0,606	-	-	0,047	0,653	-	-	-	10,265	-	-	-	0,047	-	10,265
B25	0,019	0,002	0,022	0,014	0,157	0,290	0,842	-	0,907	0,065	-	-	14,248	-	-	-	-	-	0,065	-	-
B26	0,014	0,002	0,016	0,011	0,116	0,214	0,621	-	0,670	0,048	-	-	10,522	-	-	-	-	-	0,048	-	-
B27	0,014	0,002	0,016	0,010	0,113	0,209	0,607	-	0,654	0,047	-	-	10,275	10,275	-	-	-	-	0,047	-	-
B30	0,012	0,001	0,013	0,009	0,094	0,173	0,501	-	0,540	0,039	-	-	8,482	8,482	-	8,482	-	-	0,039	-	-
B31	0,011	0,001	0,012	0,008	0,086	0,159	0,462	-	0,498	0,036	-	-	7,819	7,819	-	7,819	7,819	-	0,036	-	-
B32	0,016	0,002	0,018	0,012	0,128	0,236	0,683	-	-	0,053	0,736	-	-	-	-	-	-	-	11,570	0,053	-

Tabla 2. Corriente de arco (en kA) en cada interruptor a consecuencia del cortocircuito trifásico en las barras bajo análisis (ejemplo para el escenario E1).

Finalmente, para cada barra se asigna la categoría y la distancia de seguridad más severa que resulta entre ambos escenarios. Los valores finales asignados se detallan en la Tabla 3. Se observa que las categorías resultantes varían entre 2 y 3 según el caso, con lo cual las maniobras en estos tableros deberían realizarse con el EPP acorde a estas categorías (Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2012).

Nodo	Tensión (V) [kV]	Distancia de Trabajo (D) [mm]	Gap (G) [mm]	arco	sistema	equipamiento	Categoría resultante	Dist. de seg. (DS)[m]
B10	6,6	910	32	cerrado	aterrado	tablero	3	7,08
B11	6,6	910	32	cerrado	aterrado	tablero	3	7,13
B12	6,6	910	32	cerrado	aterrado	cable	2	2,02
B13	6,6	910	32	cerrado	aterrado	cable	2	2,02
B14	6,6	910	32	cerrado	aterrado	tablero	2	3,64
B15	6,6	910	32	cerrado	aterrado	cable	2	2,10
B20	6,6	910	32	cerrado	aterrado	cable	2	1,95
B21	0,4	455	25	cerrado	aterrado	al aire	3	1,70
B23	0,4	455	25	cerrado	aterrado	tablero	3	2,02
B24	0,4	455	30	abierto	aterrado	tablero	2	1,26
B25	0,4	455	13	cerrado	aterrado	cable	3	1,51
B26	0,4	455	26	cerrado	aterrado	cable	3	2,00
B27	0,4	455	25	cerrado	aterrado	tablero	3	2,07
B30	0,4	455	25	cerrado	aterrado	tablero	3	2,38
B31	0,4	455	15	abierto	aterrado	CCM	2	1,22
B32	0,4	455	13	cerrado	aterrado	tablero	2	1,61

Tabla 3. Variables relevadas en campo para cada barra y categoría final resultante luego del análisis.

Con base en estos resultados, se definen las etiquetas de advertencia a colocar en cada tablero según los lineamientos y colores definidos (AEA 92606: Arco Eléctrico. Cálculo de Magnitudes de Los Efectos Térmicos y Su Protección., 2016). A modo de ejemplo, en la Fig. 6 se muestra la etiqueta generada para dos de las barras de la instalación.

Por otro lado, el algoritmo se complementó incluyendo un análisis de sensibilidad sobre los resultados obtenidos. Tomando como ejemplo los resultados para la barra B30, en la Fig. 7 se muestra el análisis de sensibilidad de  $E_i$  con respecto a  $D$ ,  $t_a$  e  $I_k$ . Entre otras cosas, este tipo de análisis permite definir medidas de acción para reducir la energía incidente ante un accidente. En la Fig. 7 se advierte, por ejemplo, que si se incrementan las distancias de trabajo de 455 mm a más de 520 mm, o si se reducen los tiempos de arco a menos de 300 ms (por ejemplo, actuando sobre el ajuste de las protecciones), o si se logra limitar la corriente de cortocircuito en dicha barra a no más de 12,6 kA, sería posible bajar el riesgo desde “Categoría 3” a “Categoría 2”.

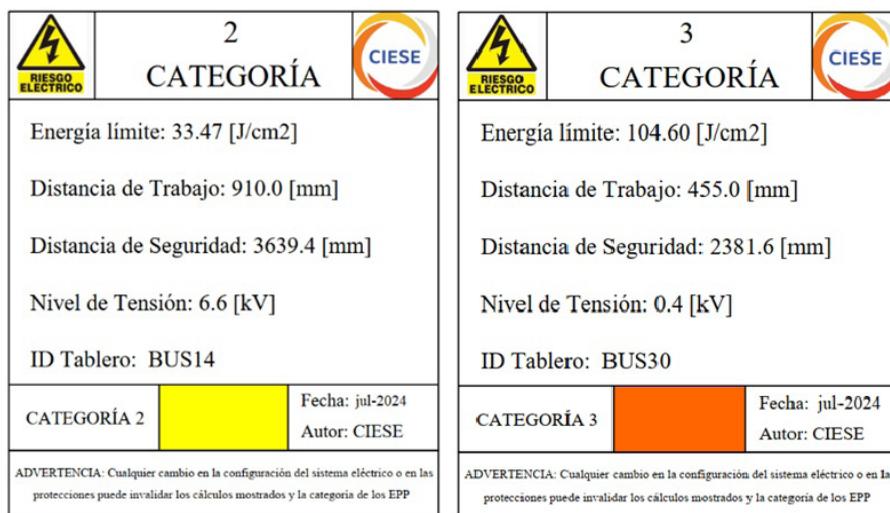


Fig. 6. Etiqueta generada de forma automática por el software para las barras 14 y 30.

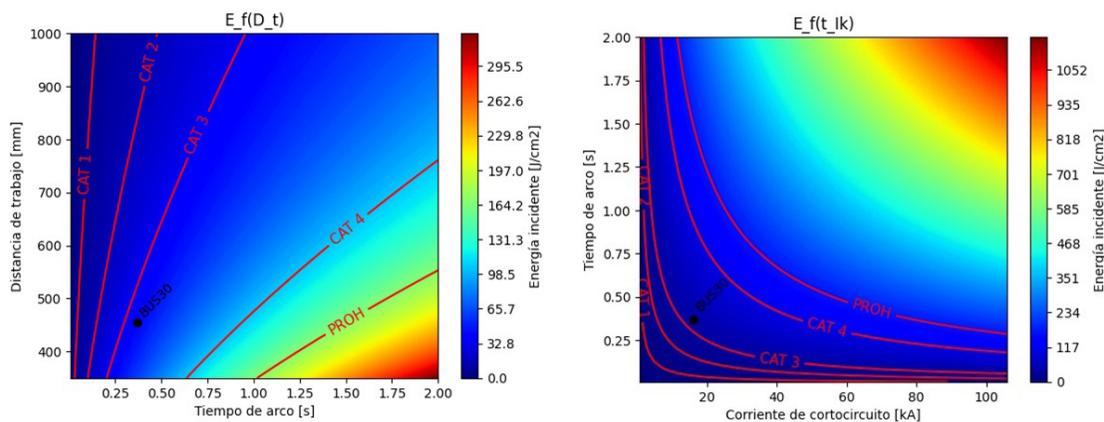


Fig. 7. Análisis de sensibilidad para  $E_i$  en la barra B30 a los valores de  $D$ ,  $t_a$  e  $I_k$ .

## Conclusión

Se implementó una metodología para abordar estudios de *arc flash* en instalaciones eléctricas mediante herramientas de software libre. Se desarrolló un software en Python para aplicar la normativa vigente en Argentina referente al análisis de riesgo por arco eléctrico, y se recurrió a la librería *PandaPower* para modelar la red y automatizar el estudio de cortocircuito requerido. La evaluación del desempeño de la alternativa propuesta se hizo mediante el estudio de una instalación eléctrica de potencia representativa de un caso de interés real.

La alternativa propuesta cumplió satisfactoriamente con los objetivos planteados, permitiendo llevar a cabo el estudio de manera integral con herramientas de software libre. Algunas de las mayores dificultades se manifestaron en la determinación de los tiempos de arco correspondientes a cada punto de análisis, variables que resultan importantes en los resultados finales. Las dificultades radican en que debe considerarse no solo la distribución de las corrientes de cortocircuito en cada interruptor (afectadas por la relación de transformación de los transformadores cuando corresponda), sino también la precisa configuración tiempo-corriente de las protecciones intervinientes. Lo antes mencionado, junto con la inclusión de un adecuado análisis de selectividad entre protecciones sucesivas, conforman dos de los principales aspectos a seguir mejorando en el desarrollo de la herramienta.

Por otro lado, se prevé como trabajo futuro: i) mejorar la herramienta para facilitar la carga de datos al usuario final, ii) agregar la posibilidad de realizar el análisis usando versiones actualizadas de las normas de referencia (AEA 92606/2023 y NFPA 70e/2024), así como también incluir la metodología de cálculo detallada en la última versión de IEEE Std. 1584 (en su última versión, 2018, define un procedimiento más complejo, pero incluye mejoras significativas en los métodos de cálculo para  $I_a$  y  $E_i$ ), iii) explorar otras alternativas de software libre para modelar la red y ejecutar el estudio de cortocircuito previo, y iv) aplicar una licencia de software libre y publicar el código fuente en un repositorio abierto de acceso público.

## Referencias

- AEA 92606: Arco eléctrico. Cálculo de magnitudes de los efectos térmicos y su protección., (2016).
- Doan, D. R., & Sweigart, R. A. (2002). A summary of Arc Flash energy calculations. *IEEE*, 285–290.
- Dugan, R. C., & McDermott, T. E. (2011). An open source platform for collaborating on smart grid research. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039829>
- IEC 60909 - Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna, (2001).
- Inshaw, C., & Wilson, R. A. (2005). Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation. *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*, 145–157. <https://doi.org/10.1002/9781118402498>
- IEEE Standard 1584 Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations, (2002).
- Jones, R. A., Liggett, D. P., Capelli-Schellpfeffer, M., Macalady, T., Saunders, L. F., Downey, R. E., Bruce McClung, L. B., Smith, A., Jamil, S., & Saporita, V. J. (1997). Staged tests increase awareness of arc-flash hazards in electrical equipment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 313–322. <https://doi.org/10.1109/28.833785>
- Lippert, K. J., Colaberardino, D. M., & Kimblin, C. W. (2004). Understanding arc flash hazards. *IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 2, 120–129. <https://doi.org/10.1109/papcon.2004.1338372>
- Littelfuse. (2024). *Arc-Flash Calculator*. [www.littelfuse.com/marketing-pages/industrial/arc-flash-calculator.aspx](http://www.littelfuse.com/marketing-pages/industrial/arc-flash-calculator.aspx)
- Marroquin, A., Rehman, A., & Madani, A. (2019). High-Voltage arc flash assessment and applications. *The International Electrical Testing Association Journal*, 48–57.
- Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, (2012).
- Sangoi, E., Manassero, U., Loyarte, A. S., Fernandez, J. P., Rossi, L. D., & Cea, M. M. (2022). Estudio de Riesgo por Arco Eléctrico Según AEA 92606. Análisis de Sensibilidad de Resultados. *VI IEEE AEGENCON*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/argencon55245.2022.9939790>
- Tajali, R. (2012). Arc Flash Analysis : IEEE Method versus the NFPA 70E Tables. *Schneider Electric Engineering Services*, January.
- Turner, L., Scheidler, A., Schäfer, F., Menke, J. H., Dollichon, J., Meier, F., & Braun, M. (n.d.). *Tests and Validation*. PandaPower. [www.pandapower.org/about/](http://www.pandapower.org/about/)
- Turner, Leon, Scheidler, A., Schafer, F., Menke, J. H., Dollichon, J., Meier, F., Meinecke, S., & Braun, M. (2018). Pandapower - An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6510–6521. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2829021>
- Van Staden, A. (2024). *jCalc - Online Arc Flash Calculator IEEE 1584 (2002 And 2018)*. [www.jcalc.net/arc-flash-calculator-ieee](http://www.jcalc.net/arc-flash-calculator-ieee)
- Wilson, R. A., Harju, R., Keisala, J., & Ganesan, S. (2007). Tripping with the speed of light: Arc flash protection. *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 226–238. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2007.359903>

Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C. E., & Thomas, R. J. (2010). MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 12–19.

## Contribución de los Autores

Nombres y Apellidos del autor	Colaboración Académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>Emmanuel Sangoi</b>	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
<b>Lautaro Daniel Rossi</b>			x				x	x	x				x	
<b>Juan Pedro Fernández</b>		x						x	x					
<b>Ariel Sebastián Loyarte</b>					x	x	x				x			
<b>Ulises Manassero</b>		x			x	x			x			x		

**1**-Administración del proyecto, **2**-Adquisición de fondos, **3**-Análisis formal, **4**-Conceptualización, **5**-Curaduría de datos, **6**-Escritura - revisión y edición, **7**-Investigación, **8**-Metodología, **9**-Recursos, **10**-Redacción - borrador original, **11**-Software, **12**-Supervisión, **13**-Validación, **14**-Visualización.