

DESARROLLO DE APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA ESTUDIOS DEL ARCO ELÉCTRICO EN SISTEMAS INDUSTRIALES

Carlos E. Vallejo^{**}, Jose F. Rivera^{**}, Jorge W. González^{*†}, Hugo A. Cardona^{*}, Idi A. Isaac^{*},
Gabriel J. López^{*}

^{*}Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.

^{**}XM S.A. E.S.P., Calle 12 Sur No. 18 – 168, B2, Medellín, Colombia

Recibido 20 Octubre 2013; aceptado 10 Diciembre 2013

Disponible en línea: 19 Diciembre 2013

Resumen: Se realizan análisis y estudios del arco eléctrico en una red industrial. El objetivo es desarrollar propuestas base para posteriores estudios de detalle de riesgo del arco, tanto para operarios como para equipos de potencia. Se propone reducir el impacto del arco eléctrico mediante la adecuada coordinación de los sistemas de protección de sobrecorriente. Se describe un aplicativo de computador desarrollado para el cálculo de la energía incidente por arco y la estimación del equipo de protección e indumentaria para los operarios.

Palabras clave: Arco eléctrico, coordinación de protecciones, protecciones eléctricas de sobrecorriente, metodologías de cálculo arco eléctrico.

COMPUTER PROGRAM DEVELOPMENT FOR ARC FLASH HAZARD STUDIES IN INDUSTRIAL POWER SYSTEMS

Abstract: Analyses and studies on the arc flash in an industrial network are achieved. The objective is to develop base proposals for future detailed studies about arc flash and shock hazard, as much for operators as for power equipment. It is proposed to reduce the arc flash shock hazard by means of the proper coordination of overcurrent protective relaying. A computer program to calculate the incident energy of the electrical arc is described and also the estimation of the protective equipment and arc flash clothing for workers.

Keywords: Arc flash and shock hazard, protections coordination, overcurrent relaying, methodologies for arc flash calculation.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de garantizar la protección prioritaria, tanto de operadores como de equipos eléctricos, se hace necesaria la utilización de las protecciones eléctricas como medida preventiva ante los posibles riesgos por consecuencias del

arco eléctrico. En las primeras secciones de este artículo se realizará una contextualización de conceptos referentes al arco eléctrico, a las protecciones eléctricas y al riesgo eléctrico en general. Se incluirá el análisis de los elementos de protección personal, luego se realizará una descripción de las diferentes metodologías

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+57 4) 4488388 ext 14130, fax 4118779.
E-mail: jorgew.gonzalez@upb.edu.co (Jorge W. González).

disponibles para el cálculo de la energía incidente, para luego abordar el tema de nuevas tecnologías y métodos de seguridad para trabajos que involucren riesgo eléctrico. Finalmente se mostrará un aplicativo desarrollado para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de equipos de protección personal (EPP), analizando los resultados obtenidos y destacando su utilidad.

2. FALLAS ELÉCTRICAS Y PROTECCIONES

2.1 Fallas eléctricas

Las fallas eléctricas son eventos de tipo aleatorio que traen consigo condiciones inusuales de operación que pueden ser manifestadas como alteraciones súbitas en los niveles de tensión, corriente o frecuencia. Las principales causas de las fallas varían de sistema a sistema y entre niveles de tensión. También tienen una relación directa con el ambiente al que se encuentra expuesto el sistema eléctrico. Además, pueden ser propias o ajenas al sistema de potencia.

2.2 Zonas de Protección

Las zonas de protección deben definirse teniendo en cuenta que todos los elementos del sistema de potencia deben estar en al menos una zona de protección y que las zonas de protección deben traslaparse ([Blackburn, 2007](#); [Horowitz y Phadke, 2008](#)).

Las zonas de protección pueden ser abiertas o cerradas, también denominadas relativas o absolutamente selectivas y su delimitación consiste entre otros aspectos en la posibilidad de aislar las fallas de una manera selectiva sin involucrar el resto del sistema ([HMV, 2003](#)).

El alcance y demarcación de las zonas es determinada por los transformadores de instrumentación que son los dispositivos que reproducen las señales (tensión y corriente) del sistema de potencia para alimentar los relés de protección con los valores adecuados. En la [Fig. 1](#) se ilustra la zona de traslape que se debe garantizar, esta se logra instalando transformadores de instrumentación a ambos lados de los interruptores que forman parte del sistema de potencia.

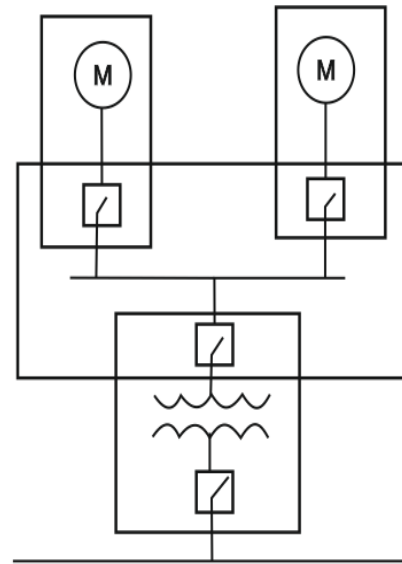


Fig. 1. Zonas de protección

2.3 Criterios de operación y diseño de sistemas de protecciones

En la actualidad muchos fabricantes y autores han establecido ciertos criterios para garantizar una operación correcta y eficiente de los sistemas de protección ([Blackburn, 2007](#); [Horowitz y Phadke, 2008](#); [Ramírez, 1987](#)), tales como la Confiabilidad, Fiabilidad, Seguridad, Selectividad, Velocidad de operación y Simplicidad.

2.4 Protecciones de Sobrecorriente ANSI 50/51

Las protecciones de sobrecorriente son ampliamente utilizadas para la protección de circuitos radiales, redes industriales y líneas de subtransmisión debido a su simplicidad y relativa eficiencia. Como su nombre lo indica, su función es proveer protección contra incrementos súbitos en la magnitud de la corriente (cortocircuitos) y sobrecargas pesadas.

En la [Fig. 2](#) se puede observar la característica típica de un relé de protección de sobrecorriente. La función implementada en los relés mide la componente de las corrientes de fase y es sensible a valores altos de las corrientes, siempre y cuando se supere un ajuste de activación previamente configurado para una etapa en particular. La protección se activa y envía una señal de

arranque, la cual incurrirá en una señal de disparo de un interruptor si la falla continúa transcurrido un retardo de operación ajustado para la protección.

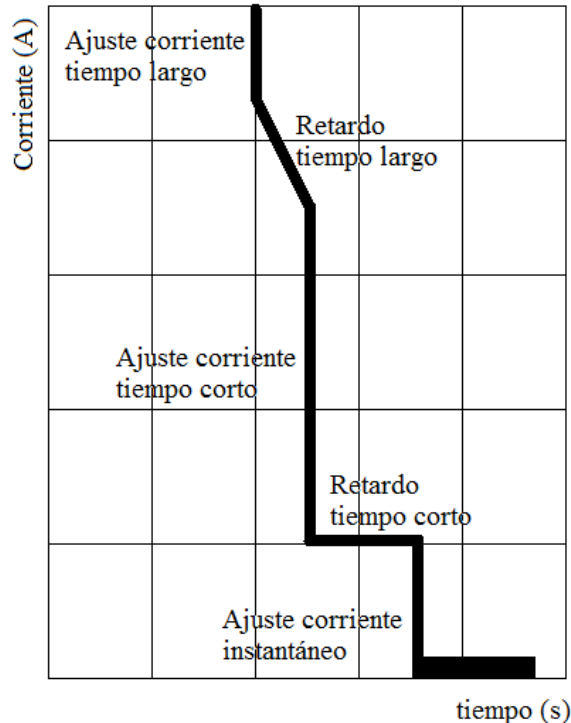


Fig. 2. Característica típica de relés de protección de sobrecorriente

Existen por lo general tres etapas de sobrecorriente que se ajustan de manera independiente, aunque todo depende de la clase de relé y del fabricante que lo provee. La primera etapa es configurada para la operación de tiempo inverso, la segunda y la tercera etapa están configuradas para la operación de tiempo definido. Al utilizar un retardo definido y al ajustar dicho retardo en su mínimo valor se obtiene una operación instantánea, tabulada como función 50 en la norma americana ([IEEE, 2008](#)).

La operación de tiempo inverso establece que a determinada magnitud de corriente (I) durante un tiempo transcurrido (t) la protección actuará, dependiendo del tipo de curva establecida por los estándares europeos o americanos ([IEC, 2009](#); [IEEE, 1997](#)) y configurada en el dispositivo.

2.5 Coordinación de protecciones de sobrecorriente

La coordinación de protecciones implica un conocimiento amplio sobre el sistema eléctrico que se busca proteger. Se deben conocer los elementos que lo componen, las magnitudes de tensión y corriente nominales establecidos para los diferentes escenarios de operación al igual que los niveles mínimos y máximos de cortocircuito a partir de los cuales se asumen criterios para ajustar los elementos de protección.

Por lo tanto para la coordinación de protecciones en un sistema eléctrico se seguirán los siguientes pasos.

Caracterizar el sistema de potencia a proteger.

Identificar los posibles escenarios de operación. Los que puede experimentar el sistema de potencia a partir de datos suministrados.

Calcular los ajustes necesarios en los dispositivos de protección. Teniendo en cuenta las características funcionales de los relés o interruptores asociados.

Coordinar los ajustes de las protecciones. Buscando garantizar los criterios de confiabilidad, selectividad y simplicidad requeridos por el sistema eléctrico asociado.

Probar los ajustes realizados y afinar el modelo.

3. ARCO ELÉCTRICO Y RIESGOS DEL PERSONAL OPERATIVO

Un arco eléctrico es una descarga que se mantiene por sí misma en una atmósfera gaseosa. Esta descarga se origina por la ionización del gas y produce un enlace eléctrico conductor entre electrodos de diferente potencial, con diferente relación de fases o entre una de estas fases y tierra.

Los arcos eléctricos no aparecen sólo en cortocircuitos, sino también en acciones de desconexión o interrupción de circuitos eléctricos bajo corriente (fusibles, interruptores, cables, conexión de cables, puntos de fijación) si no se toman precauciones especiales. También estos arcos eléctricos de conexión pueden provocar arcos eléctricos. Sin embargo, las mayores energías se liberan en caso de arcos eléctricos por cortocircuito.

Los arcos eléctricos representan un riesgo de consideración teniendo en cuenta la exposición al calor excesivo, explosión y enormes ráfagas de presión que genera, funde los materiales de los equipos, los cuales son expulsados como partículas y pueden producir quemaduras severas incluso fatales.

3.1 Riesgos por exposición al arco eléctrico

Pérdida de la visión y quemaduras. Un arco eléctrico produce un destello de luz brillante y emite rayos ultravioleta e infrarrojos, los cuales pueden producir quemaduras a los ojos y la piel.

Peligro de choque eléctrico. Debido al contacto de conductores energizados.

Vapores calientes y gases. Pueden alcanzar hasta 23000 °F.

Ondas sonoras que producen daños en el sistema auditivo. Producidas por un aumento súbito de la presión, emitiendo sonidos de hasta 140 dB.

Onda de presión. El arco eléctrico no sólo tiene una alta temperatura, sino también una onda de presión de hasta 0.3 MPa, que equivale a una presión de 30 T/m².

Lanzamiento de objetos. Debido a la alta presión que se presenta, un arco eléctrico puede contener metal fundido u objetos que se desprenden de celdas, las cuales viajan a altas velocidades.

3.2 Factores que inciden en la iniciación del arco eléctrico.

Herramientas sueltas. Deslizamiento de las herramientas del electricista, disminución de la distancia de tensión disruptiva.

Conexiones sueltas. Causan sobre calentamientos y formaciones menores de arcos.

Fallas aislamiento. Debido a la conducción por polvo conductivo en la superficie del aislador o por rupturas en el cuerpo del aislador.

Gases de interrupción. Los gases conductores que son emanados de interruptores automáticos o fusibles durante la interrupción del circuito.

Mala operación equipo interrupción. Falla en la interrupción de un cortocircuito, por un interruptor automático o un fusible.

Condensación. La condensación de vapor y goteo de agua pueden causar camino en la superficie de los materiales aislantes.

Mala utilización o diseño de los equipos.

La corrosión o acumulación de residuos.

Transitorios de tensión.

Sobrecarga de corriente.

4. MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA ENERGÍA INCIDENTE

4.1 Estándar IEEE 1584-2002 ([IEEE, 2002](#))

Contiene métodos de cálculo que permiten un análisis profundo y una completa solución para fallas de arco eléctrico en sistemas monofásicos y trifásicos, al aire libre o en sistemas trifásicos de recintos cerrados como celdas de media o baja tensión.

Los datos fueron generados por pruebas realizadas por un grupo de trabajo de IEEE destinadas a reproducir los modelos de la energía incidente. Las ecuaciones que describen esta metodología están basadas en resultados de pruebas aplicadas bajo las condiciones expuestas en la [Tabla 1](#). La metodología de cálculo se describe mediante la expresión

$$E = C_f \cdot E_n \cdot \left(\frac{t}{0,2}\right) \cdot \left(\frac{610^x}{D^x}\right), \quad (1)$$

donde E es la energía calorífica incidente expresada en calorías por centímetro cuadrado, C_f es el factor de cálculo: 1.0 para voltajes mayores a 1 kilovoltio y 1.5 para voltajes menores o iguales a 1 kilovoltio. E_n es la energía calorífica incidente normalizada expresada Julios por centímetro cuadrado, t es el tiempo de duración del arco expresado en segundos y D es la distancia de trabajo expresada en milímetros.

La energía calorífica incidente normalizada, E_n , se calcula mediante la expresión

$$E_n = 10^{\log(E_n)}, \quad (2)$$

para la cual,

$$\log(E_n) = K_1 + K_2 + 1,081 \log(I_a) + 0,0011G, \quad (3)$$

donde G es la distancia entre conductores expresada en milímetros, K_1 y K_2 son las constantes dependientes de si es un sistema con tierra, sin tierra o con tierra de alta impedancia.

En cuanto la variable I_a se puede calcular mediante la expresión

$$I_a = 10^{\log(I_a)}, \quad (4)$$

en la cual para una tensión nominal V menor a 1 kilovoltio

$$\log(I_a) = K + 0,662 \cdot \log(I_{bf}) + 0,966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V \cdot (\log(I_{bf})) - 0,00304 \cdot G \cdot \log(I_{bf}), \quad (6)$$

y para tensión nominal V entre 1 kilovoltio y 15 kilovoltios

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \cdot \log(I_{bf}),$$

donde I_{bf} es la corriente de falla expresada en kiloamperios, K es la constante dependiente de si es un sistema con tierra, sin tierra o con tierra de alta impedancia, G es la distancia entre conductores expresada en milímetros.

Tabla 1. Alcance Estándar IEEE 1584-2002 ([IEEE, 2002](#))

| Parámetro | Condición |
|-----------------------------|---|
| Voltaje | 208 – 15000 V, trifásico |
| Frecuencias | 50 a 60 Hz |
| Corriente de falla máxima | 700 – 106000 A |
| Tipo de tierra | No aterrizado, Aterrizado, Alta resistencia a tierra. |
| Tipo de equipo (envolvente) | Cerrado, Abierto, Cables |
| Espacios entre conductores | 13 mm – 152 mm |
| Fallas | Trifásicas |

A continuación se define el límite de protección según este estándar

$$D_B = \left[4.184 \cdot C_f \cdot E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E} \right) \right]^{\frac{1}{x}}, \quad (8)$$

donde D_B , es la distancia de frontera de protección contra arco expresada en milímetros, C_f , es el factor de cálculo: 1.0 para voltajes mayores a 1 kilovoltio y 1.5 para voltajes menores o iguales a 1 kilovoltio. E_n es la energía incidente normalizada, E es la energía incidente; ambas expresadas en julios por centímetro cuadrado t es el tiempo de duración del arco expresado en segundos y x es el factor de distancia.

4.2 Estándar NFPA 70E ([NFPA, 2012](#))

La NFPA 70E es una metodología muy adecuada cuando se dispone de información limitada de los parámetros del sistema. La evaluación asume el peor de los casos, que se presenta cuando la impedancia de falla es cero; supone que la corriente del arco eléctrico es igual a la corriente máxima de falla. Esta suposición es buena para sistemas superiores a 600 V. La expresión que comprende el estándar y sus variables más significativas es

$$E = 5271 \cdot D^{-1,9593} \cdot t \cdot (0,0016 \cdot I_{bf}^2 - 0,0076 \cdot I_{bf} + 0,8938), \quad (9)$$

donde E es la energía calorífica incidente expresada en calorías por centímetro cuadrado, D es la distancia de trabajo expresada en pulgadas, I_{bf} es la corriente de falla expresada en kiloamperios y t es el tiempo de duración del arco expresado en segundos.

La frontera de protección contra arco es definida como la distancia mínima desde la fuente de arco hasta el punto donde la energía incidente en caso de presentarse una falla de arco eléctrico sería de 5 J/cm^2 ó 1.2 cal/cm^2 , energía suficiente para producir una quemadura curable de segundo grado para una persona que se encuentra expuesta, sin ninguna clase de protección contra arco. Esta distancia varía dependiendo de la corriente de falla disponible en el momento de la falla y del tiempo de despeje del dispositivo de protección aguas arriba. Se define la distancia de frontera, D_B , mediante la expresión

$$D_B = \sqrt{2.65 \cdot 1.732 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot t}, \quad (10)$$

D_B es una distancia de frontera de protección contra arco expresada en pulgadas; V es la tensión

nominal del sistema línea-línea expresada en kilovoltios, I_{bf} es la corriente de falla expresada en kiloamperios y t es el tiempo de duración del arco expresado en segundos.

4.3 Método Genérico

Este método es válido para predecir la energía incidente en arcos trifásicos que se presenten al aire abierto o en celdas; es válido para tensiones superiores a 600 V y sólo se considera el arco eléctrico trifásico al aire libre. Esta metodología desarrollada por el estándar se describe en la expresión

$$E = 5,12 \cdot 10^5 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot \left(\frac{t}{D^2}\right), \quad (11)$$

donde E , energía calorífica incidente expresada en calorías por centímetro cuadrado, V es la tensión nominal expresada en kilovoltios, I_{bf} es la corriente de falla expresada en kiloamperios, D es la distancia de trabajo expresada en milímetros y t es el tiempo de duración del arco expresado en segundos.

5. EPP, EQUIPOS Y MÉTODOS DE SEGURIDAD

5.1 Equipo de protección personal (EPP)

Para la especificación de los EPP se debe tener en cuenta las siguientes normas que aplican para el material de estos equipos.

IEC 61482 ([IEC, 2007](#)). Establece procedimientos para evaluar y clasificar el material utilizado para los vestidos anti-flamas, que pueden estar expuestos a arco eléctrico.

NFPA 70E ([NFPA, 2012](#)). Para especificar individualmente los EPP en esta norma se discrimina elemento por elemento.

ANSI Z89.1 ([ANSI, 2009](#)). Protección de la cabeza.

ANSI Z87.1 ([ANSI, 2010](#)). Protección de los ojos y cara.

ASTM D 120-09 ([ASTM, 2009](#)). Guantes.

ASTM D 1051-02 ([ASTM, 2008a](#)). Mangas.

ASTM F 1117-03 ([ASTM, 2013](#)). Calzado.

ASTM F 496-08 ([ASTM, 2008b](#)). Guantes y mangas.

ASTM F 1236-96 ([ASTM, 2012a](#)). Inspección visual.

ASTM F 2178-12 ([ASTM, 2012b](#)). Productos de protección facial.

ASTM F 1506-10a ([ASTM, 2010](#)). Ropa.

ANSI, de la serie Z535 ([ANSI, 2011](#)). Para la demarcación de las zonas de trabajo y etiquetado de equipos.

Todo equipo peligroso instalado o modificado después de 2002 tiene que llevar una etiqueta de advertencia. El equipo no es etiquetado por el fabricante sino por la empresa donde funciona el equipo debido a las configuraciones en las que pueda estar instalado o el circuito en el que se encuentre dispuesto.

Los equipos de protección personal se encuentran clasificados en categorías que se encuentran caracterizados por la magnitud de energía incidente para la cual garantizan protección ([Cano y Rivas, 2011](#)).

5.2 Nuevas estrategias para mitigar riesgos por arco eléctrico

Aparte de los sistemas de protección eléctrica convencionales y del uso obligatorio de equipos de protección personal, de acuerdo con la magnitud de energía incidente, en la actualidad se cuenta con estrategias que mitigan los efectos del arco eléctrico en cuanto al despeje o control rápido de las fallas eléctricas.

Cuchilla de puesta a tierra rápida. El sistema funciona según el principio que la liberación incontrolada de energía producida por un arco interno se impide mediante una rápida puesta a tierra trifásica. Este tipo de conexión, que se caracteriza por una impedancia muy baja, hace que la corriente de cortocircuito de una avería por formación de arco se conmute inmediatamente al interruptor de puesta a tierra de acción rápida y apague el arco.

UFES: Ultra Fast Earthing Switch ([ABB, 2013](#)). El principio de actuación es similar al de la cuchilla rápida. Contiene tres elementos de conmutación primarios completos y una unidad de disparo rápido. Consta además de una cámara

de vacío de dos partes encapsulada en resina epoxi para protegerla del entorno. La detección se hace por monitoreo de luz y corriente. El tiempo de conmutación es menor a 1.5 ms y el tiempo de extinción aproximadamente menor a 4 ms.

Relé con detector de arco con fibra óptica. Es un método novedoso que emplea la fibra óptica como detector de flameo. La fibra óptica puede tener longitudes superiores a los 60 m. Se emplean fibras plásticas con un recubrimiento de vidrio y se distribuyen a través de todos los compartimientos de alta tensión, donde pueda haber peligro potencial de ocurrencia de arco.

Cuando la fibra es expuesta a un arco, el rápido incremento de la intensidad de la luz será detectado por un relé. No se necesita de cables galvanizados o fotoceldas en los compartimientos de alta tensión. La sensibilidad del relé a la luz puede ser ajustada manualmente o controlada automáticamente.

6. DESARROLLO DEL APLICATIVO

El *Aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP* permite realizar el cálculo de la energía incidente a partir de los resultados de corrientes de corto circuito obtenidos mediante DIGSILENT PF (Digsilent, 2011) y a su vez obtener información del equipo de protección personal adecuado según el nivel de riesgo eléctrico obtenido a raíz de estos cálculos.

El aplicativo ha sido implementado mediante el lenguaje de programación C Sharp (C#) para una plataforma de Microsoft Windows con el objetivo de caracterizar de una manera adecuada y rápida los diferentes niveles de riesgo y los diversos elementos de protección necesarios para intervenir cualquier punto de una red industrial.

A continuación se describirá de manera general las características que ofrece el aplicativo.

En una primera instancia el aplicativo permite importar los resultados obtenidos mediante DIGSILENT PF debidamente almacenados en un archivo de Microsoft Excel. Se desarrolló un código en DIGSILENT PROGRAMMING LANGUAGE (DPL) que permite la ejecución y exportación a Excel de las magnitudes de cortocircuito de la red. A partir de estos datos es posible realizar el cálculo de la energía incidente por alguno de los métodos anteriormente

descritos en la Sección 4 del presente artículo. En la Fig. 3 se presenta la interfaz inicial del *Aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP*.

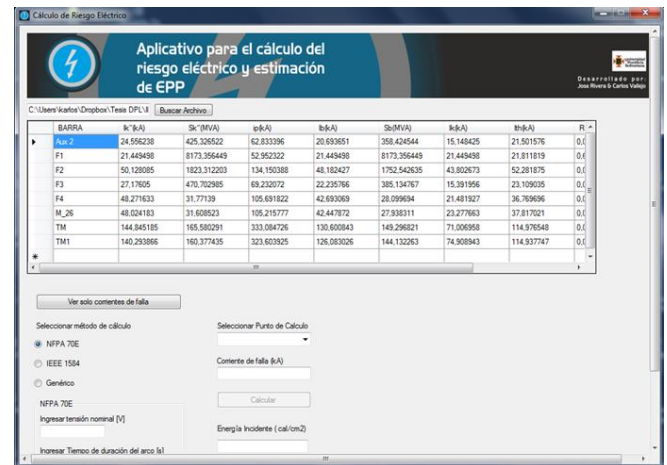


Fig. 3 Interfaz inicial del Aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP

También es posible consultar información sobre los equipos de protección personal, tanto particular para la categoría obtenida a partir de la energía incidente de los cálculos anteriores, como general de los propios elementos. A su vez se ofrece la opción de imprimir la etiqueta de riesgo eléctrico con la información específica del punto en que se realizaron los cálculos. En la Fig. 4 se presenta la interfaz de recomendaciones.



Fig. 4. Formulario de recomendaciones del Aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP

Información más detallada de este aplicativo se puede encontrar en Rivera y Vallejo (2013).

7. CASO DE ESTUDIO

7.1 Definición de la red de estudio

Se seleccionó una red industrial en la que se pueden analizar gran cantidad de escenarios propios de una red de este tipo (red tipo *benchmark*). La red elegida es la IEC 60909 EXAMPLE 3 (IEC, 2000) y se ilustra en la Fig. 5 programada en el DIGSILENT PF.

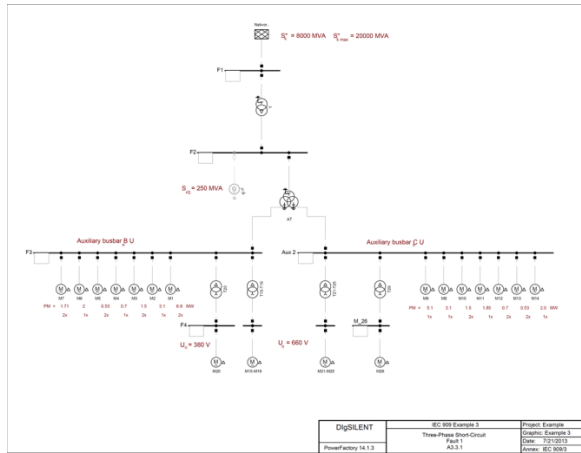


Fig. 5. Diagrama Unifilar red industrial IEC 60909 - Example 3

La siguiente metodología se deberá implementar con el fin de cumplir una adecuada coordinación de protecciones de la Red Industrial IEC 60909 - Example 3.

Primero. Realizar la indagación de los componentes eléctricos que componen el sistema al igual que sus principales características.

Segundo. Elaborar el modelo del sistema en un software para estudios eléctricos, en este caso se utilizó un modelo ya existente. Una red tipo *benchmark* incluida en el DIGSILENT PF versión 14.1.

Tercero. Parametrizar los interruptores y relés empleados para la protección de la red, ingresando al modelo ya planteado las curvas de daño de los equipos eléctricos asociados a dicho sistema de protección.

Cuarto. Simular los diferentes escenarios posibles de operación que se pueden presentar en el sistema para corroborar la validez y utilidad del modelo.

Quinto. Ajustar los elementos de protección eléctrica de sobrecorriente de fases, con funciones de tiempo definido, inversas e instantáneas parametrizadas anteriormente.

Sexto. Analizar la coordinación de los dispositivos de protección eléctrica verificando el correcto desempeño de los relés de protección o elementos de interrupción del suministro por sobrecorriente, mediante el estudio y evaluación de las gráficas elaboradas en DIGSILENT PF, buscando cumplir con los principales criterios de coordinación.

7.2 Modos de operación

Para el presente estudio se crearon tres (3) escenarios que representan los modos de operación típicos que se pueden presentar en una red industrial. Estos modos se describen a continuación.

Operación Nominal. Alimentación por red externa, barraje con mayor número de motores en funcionamiento.

Operación Demanda Máxima. Alimentación por red externa, todos los motores en funcionamiento.

Operación en Despacho Mínimo. Alimentación por red externa, barraje con menor número de motores en funcionamiento.

La operación en demanda máxima es seleccionada para presentar los análisis, debido a que en este escenario se presentan las mayores magnitudes de corrientes de falla, variable de gran importancia en el cálculo de la energía incidente.

7.3 Disposición de los elementos de protección de sobre corriente

Respecto a la configuración inicial de los relés, es común en la industria visualizar dos casos. El primero es el de elementos de protección con una ventana tecnológica obsoleta y que no han tenido incidentes o han sido mínimos; por otro lado se encuentran equipos de última tecnología mal parametrizados.

Se debe entonces realizar la coordinación de las protecciones de sobrecorriente de manera que sean fiables y a la vez confiables (Blackburn, 2007). Se deben garantizar los márgenes

adecuados entre curvas de protección, evitando excesos en los tiempos de retardo. Igualmente se debe ser cuidadoso con la característica de daño de los equipos de la red.

7.4 Cálculo de la energía incidente

En caso de una falla al momento de una intervención a una red eléctrica, se espera que en un principio las protecciones, que deben contar con una correcta coordinación, actúen despejando la falla evitando la aparición o minimizando la magnitud del arco eléctrico, en caso de que esto no suceda se debe de garantizar la integridad de los operarios que se encuentren realizando la intervención mediante el correcto uso de equipos de protección personal.

Con respecto al cálculo de la energía incidente del caso ejemplo presentado, se supone que el esquema posee una protección con actuación instantánea y una de tiempo inverso. Se realizará la prueba considerando que la protección principal no opera.

Se selecciona como punto de falla la barra denominada M_26, tal como se observa en la Fig. 6, para lo cual se tiene la información presentada en la Tabla 2.

Tabla 2. Información barra M_26

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|-------|
| Voltaje Nominal [V] | 380 |
| Tiempo de duración del arco [s] | 0.294 |
| Distancia de Trabajo [cm] | 55.88 |
| Corriente de Falla [kA] | 48.02 |

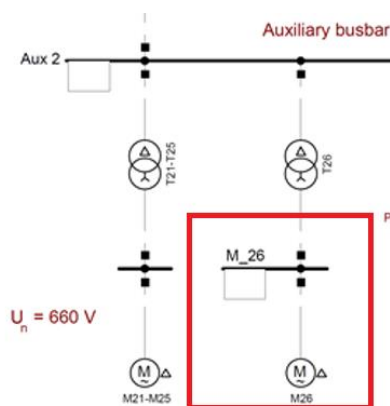


Fig. 6. Punto de cálculo de la red industrial

Ingresando los anteriores datos en el aplicativo y utilizando el Método Genérico, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 3 y en la Fig. 7.

Tabla 3. Resultados barra M_26

| Parámetro | Valor |
|--|---------|
| Energía Incidente [cal/cm ²] | 8.79 |
| Distancia Frontera [mm] | 1516.07 |

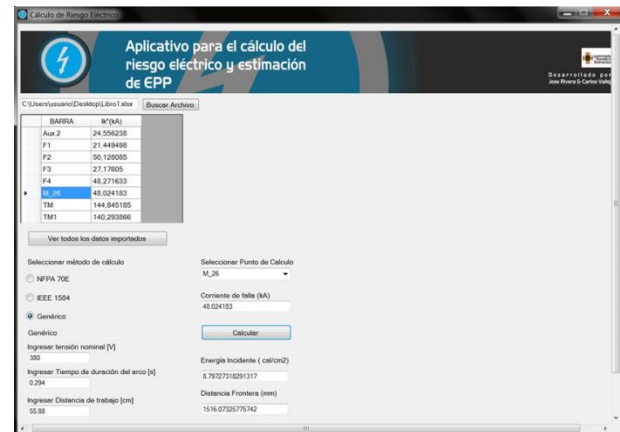


Fig. 7. Resultados en el Aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP

En la Fig. 8 se aprecia la etiqueta generada al desplegar las recomendaciones.

⚠ ADVERTENCIA

Peligro de flama por arco y electrocución
Se requiere uso de EPPs adecuados.

| | |
|--|---------------------------|
| Frontera de Protección de Arco | 1516,073 mm |
| Energía Incidente | 8,797 cal/cm ² |
| Distancia de Trabajo | 55,88 cm |
| Nivel de Equipos de Protección Personal (EPPs) Requerido | 3 |
| Tensión de Choque Eléctrico | 380 V |
| Aproximación Permitida | 3,05 m |
| Aproximación Restringida | 0,3048 m |
| Aproximación Prohibida | 0,0254 m |

Figura 8. Etiqueta de advertencia generada

El equipo de protección principal adecuado para realizar algún tipo de operación puede ser observado en la Fig. 9.



Fig. 9. Equipo de protección personal sugerido por el Aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP

A continuación se lista el equipo de protección personal sugerido.

Ropa Ignífuga (Resistente a la llama, Inflamable) que resista hasta 25 cal/cm².

Camisa de manga larga con certificación para arco.

Pantalones largos con certificación para arco.

Overoles con certificación para arco.

Máscaras protectoras con capucha y funda ignífuga para el casco de seguridad con certificación para arco.

Chaqueta con certificación para arco.

Tapones auditivos.

Guantes dieléctricos clase 3.

Guantes de Cuero para protección mecánica.

Zapatos de trabajo de Cuero.

Los resultados obtenidos mediante el *Aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP* le sirven al usuario para concientizarse de la situación de riesgo eléctrico que significará intervenir la red en el punto especificado. A raíz de estos resultados se podrán tomar las medidas de seguridad necesarias para realizar la intervención.

En caso de riesgo alto, o de que la magnitud de la energía incidente en algún lugar de la red hiciera

imposible la intervención por parte de un operario, se debe optar por tareas de mantenimiento con equipo desenergizado, evitando la ocurrencia de algún evento indeseado.

Se recomienda preparar un plan de formación, entrenamiento y sensibilización a los operarios mediante panoramas de riesgo, charlas y capacitaciones sobre los trabajos a realizar, los riesgos que estos implican y los dispositivos y elementos de protección personal necesarios para salvaguardar la integridad del personal que pueda estar expuesto, además de proteger los equipos eléctricos y su vida útil.

8. CONCLUSIONES

Se elaboró un modelo básico para la estimación de energía incidente y la distancia frontera desarrollada durante el arco eléctrico a partir de los estándares desarrollados entorno a este fenómeno.

El aplicativo para el cálculo del riesgo eléctrico y estimación de EPP desarrollado permite el análisis y comparación entre estándares, además de una detallada relación entre el EPP y la categoría de riesgo asignada según su magnitud, posibilitando caracterizar de una manera rápida y adecuada cualquier red eléctrica a ser intervenida. El alcance del aplicativo desarrollado se debe considerar aún académico, pero se podrá ir comprobando con datos reales.

Es primordial caracterizar de una manera adecuada los riesgos que implica intervenir la red en cualquier punto; se debe calcular la máxima corriente a la que estará expuesto un trabajador en caso de que se presente una falla y se debe determinar el equipo de protección personal que debe utilizarse.

Los estudios de arco eléctrico evidencian el riesgo al que están expuestos los operarios y permiten una adecuada selección de los elementos de protección personal y distancia frontera necesarios para resguardar al personal de accidentes.

REFERENCIAS

ABB (2013). Ultra-Fast Earthing Switch (UFES) - active internal arc protection for switchgear. En línea, en Product Guide, [http://www.abb.com/product/db0003db00427

- 9/05d1e893194566e9c1257799003303d7.aspx] consultado en 2013-08-10.
- American National Standards Institute /International Safety Equipment Association (2009). *ANSI/ISEA Z89.1 American National Standard for Industrial Head Protection*. ISEA, Virginia, USA.
- American National Standards Institute /International Safety Equipment Association (2010). *ANSI/ISEA Z87.1 American National Standard for Occupational and Educational Eye and Face Protection Devices*. ISEA, Virginia, USA.
- American National Standards Institute /National Electrical Manufacturers Association (2011). *ANSI/NEMA Z535 Safety color chart*. ANSI/NEMA, USA.
- American Society for Testing and Materials (2009). *ASTM D120 - 09 Standard Specification for Rubber Insulating Gloves*. ASTM, Pennsylvania, USA.
- American Society for Testing and Materials (2008). *ASTM D1051-08 Standard Specification for Rubber Insulating Sleeves*. ASTM, Pennsylvania, USA.
- American Society for Testing and Materials (2008). *ASTM F496-08 Standard Specification for In-Service Care of Insulating Gloves and Sleeves*. ASTM, Pennsylvania, USA.
- American Society for Testing and Materials (2012). *ASTM F1236-96 Standard Guide for Visual Inspection of Electrical Protective Rubber Products*. ASTM, Pennsylvania, USA.
- American Society for Testing and Materials (2012). *ASTM F2178-12 Standard Test Method for Determining the Arc Rating and Standard Specification for Eye or Face Protective Products*. ASTM, Pennsylvania, USA.
- American Society for Testing and Materials (2013). *ASTM F1117-03 Standard Specification for Dielectric Footwear*. ASTM, Pennsylvania, USA.
- American Society for Testing and Materials (2010). *ASTM F1506-10a Standard Performance Specification for Flame Resistant and Arc Rated Textile Materials for Wearing Apparel for Use by Electrical Workers Exposed to Momentary Electric Arc and Related Thermal Hazards*. ASTM, Pennsylvania, USA.
- Blackburn, J. y T.J. Domin (2007). *Protective Relaying: Principles and Applications, Third Edition*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Cano, F. J., y F. A. Rivas. (2011). Metodología para el diagnóstico del nivel de riesgo por arco eléctrico en subestaciones de transmisión de energía. *Reunión CIER*, Medellín.
- Davis, C., C. Pierre, D. Castor, R. Luo y S. Shrestha (2003). *Practical Solution Guide to Arc Flash Hazard*. ESA, USA.
- DIgSILENT GmbH (2011). *DIgSILENT Power Factory Version 14.1 Manual*. DIgSILENT GmbH. Vol 2. Gomaringen, Germany.
- HMV Ingenieros Ltda. (2003). *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión, Segunda ed.* HMV, Medellín.
- Horowitz, S. y A. Phadke (2008). *Power System Relaying, 3rd Edition*. Wiley, England.
- International Electrotechnical Commission (2000). *IEC 60909-4 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents*. IEC, France.
- International Electrotechnical Commission (2009). *IEC 60255-1 Measuring relays and protection equipment - Part 1: Common requirements*. IEC, France.
- International Electrotechnical Commission (2007). *IEC 61482-1-2 Live working. Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc. Test methods. Determination of arc protection class of material and clothing by using a constrained and directed arc (box test)*. IEC, France.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2002). *IEEE Std 1584 IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations*. IEEE, New York.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2008). *IEEE Std C37.2™ IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*. IEEE, New York.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (1997). *IEEE Std C37.112™ IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays*. IEEE, New York.
- National Fire Protection Association (2012). *NFPA 70E Standard for Electrical Safety in the Workplace*. NFPA, Quincy, MA, USA.
- Ramírez, C. F. (1987). *Introducción a los reles de protección*. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Vallejo, C., F. Rivera y J.W. González (2013). *Estudios de Cálculo del Arco Eléctrico en Sistemas Industriales y Propuestas Para Reducir el Riesgo. Desarrollo de Aplicativo Computacional*. Tesis de Ingeniería Eléctrica. Colombia, Facultad de Ingeniería Eléctrica y

Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana
Medellín.

Eléctrica S.A. Investigador invitado en la Univ.
Kempten, Alemania y Univ. Comillas, España.

SOBRE LOS AUTORES

Carlos E. Vallejo

Ingeniero electricista y próximo a graduarse de Ing. Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana (2013). Ex practicante de ISA, en la Dirección Gestión Mantenimiento en el año 2012, actualmente trabaja en XM filial de ISA en el área de transacciones del mercado con el Liquidador y Administrador de Cuentas (LAC).

José Francisco Rivera

Ingeniero egresado y próximo a graduarse de los programas de Ing. Eléctrica e Ing. Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana (2013). Ex practicante de ISAGEN, en la Dirección de Mantenimiento en el año 2012, actualmente trabaja en XM filial de ISA en el área de transacciones del mercado con el Equipo de Registro, Demandas e Ideal (RDI).

Jorge Wilson González

Ingeniero Electricista de la Univ. Nacional y MSc - PhD. de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador. Laboró en HVM Ingenieros y en Siemens, Erlangen en PTD (FACTS y HVDC). Investigador invitado en la Univ. Kempten, Alemania y en el Power Systems Institute en Erlangen Univ. Alemania en el 2005.

Hugo Alberto Cardona

Ingeniero Electricista y Magíster en Ingeniería Área Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Actualmente es el director de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana. Realizó estancia investigativa en XM S.A. E.S.P. Es miembro activo del Grupo de Investigación Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD).

Idi A. Isaac

Ingeniero Electricista, MSc.y PhD. de la UPB, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE. Realizó estancia investigativa en Interconexión

Gabriel López

Ingeniero Electricista, MSc.y estudiante PhD. de la UPB, Colombia, donde es Profesor Asociado de tiempo completo e Investigador en la Facultad de IEE. Laboró en la empresa Unión Eléctrica. Realizó estancia investigativa en XM S.A. E.S.P. Investigador invitado en la Univ. Kempten, Alemania.