

ANALISIS DE PROBLEMÁTICA EN SISTEMAS ELECTRICOS INDUSTRIALES: ARCO ELECTRICO.

José Mario Rodríguez Suárez¹
Karim González Sifuentes²
Luis Alonso Trujillo Guajardo³
Paz Vicente Cantú Gutiérrez⁴

RESUMEN

El arco eléctrico se define como un tipo de explosión o destello de la corriente eléctrica debido a un corto circuito sostenido en el tiempo a través del aire ionizado, causado por una deficiencia en el aislamiento eléctrico entre una parte energizada y otra a otro potencial. El presente trabajo se realizó con el propósito de proporcionar una metodología para este caso del estudio del arco eléctrico que definimos, y en un orden de tratar de establecer mediante los resultados arrojados el nivel de categoría de riesgo con el propósito de sugerir el equipo de seguridad que se recomendará utilizar para cuidar la integridad física del personal que trabajan directamente en el área de ingeniería eléctrica y medición, específicamente en áreas energizadas.

Palabras Clave: Arco Eléctrico, Corto Circuito, Impedancia, Reactancia, IEEE, NFPA, ETAP.

Fecha de recepción: 04 de julio, 2017.

Fecha de aceptación: 06 de septiembre, 2017.

¹ Contador Público y recién egresado de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, rodriguezsuarez.uanl@gmail.com.

² Recién egresado de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, kgs_108@hotmail.com.

³ Doctor en Ingeniería Eléctrica, Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, luis.trujillojr@uanl.edu.mx.

⁴ Docente y Jefe del Departamento de Iluminación y Alta Tensión de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Perito en el Tribunal Superior de Justicia en el Estado de Nuevo León en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, vcantugt@yahoo.com.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día en el sector industrial podemos encontrar una gran cantidad de situaciones que generan una gran preocupación en la prevención de accidentes e integridad física de los empleados que laboran directamente con el uso de energía eléctrica o en lugares energizados, de los cuales conlleva establecer una serie de mecanismos y acciones humanas especializadas para que no se conviertan además en un factor de paro de producción o daño en los dispositivos electrónicos.

Una de las problemáticas principales es la probabilidad de existencia de un arco eléctrico en las conexiones o procedimientos mal empleados que pueden afectar la integridad física de las personas que están directamente trabajando en ese sitio además del daño en los dispositivos electrónicos o en las cadenas de producción y demás equipos.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) Standard 1584 [1], se ha desarrollado para proteger a las personas de los peligros del arco eléctrico. Las ecuaciones de nivel de energía incidente descritas en el estándar IEEE 1584 [1] permiten cumplir con el requisito de identificación de los equipos eléctricos, la selección apropiada de los dispositivos de sobre corriente y los equipos de protección personal (EPP) mínimos a ser empleados para la intervención de los sistemas eléctricos. El IEEE 1584 [1] permite calcular un estimado del nivel de corriente de arco el cual es utilizado para predecir el nivel de energía incidente ante una falla eléctrica.

En el presente trabajo se presenta la metodología del estudio del arco eléctrico para así poder establecer mediante los resultados arrojados el nivel de categoría de riesgo para especificar el equipo de seguridad que se tendrá que utilizar para cuidar la integridad física de las personas que trabajan directamente en áreas energizadas, relacionadas directamente con la ingeniería eléctrica y medición.

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo aborda las recomendaciones y la metodología de estudio para los análisis de cálculos de corto circuito y arco eléctrico. Se utilizará la herramienta computacional ETAP® para el análisis de arco eléctrico de un sistema eléctrico industrial, en base a los resultados arrojados del sistema de prueba utilizando ETAP® [2] se recomendarán los tipos de vestimenta para protección personal, además de analizar las problemáticas comunes en los sistemas eléctricos industriales para darnos un panorama de algunos de los casos que se pueden presentar y contar con la metodología adecuada de cómo medir en base a parámetros preestablecidos y así poder tomar las acciones necesarias para mejorar los índices arrojados en el estudio.

METODOLOGÍA

Consideraciones básicas para el estudio de Arco Eléctrico

Preparación del Diagrama Unifilar

En el diagrama unifilar del sistema [figura 1], deberán indicarse todos los elementos que lo integran, tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión o distribución, alimentadores, reactores, motores, etc. Con sus potencias y voltajes nominales, así como sus impedancias o reactancias referidas a sus características eléctricas nominales.

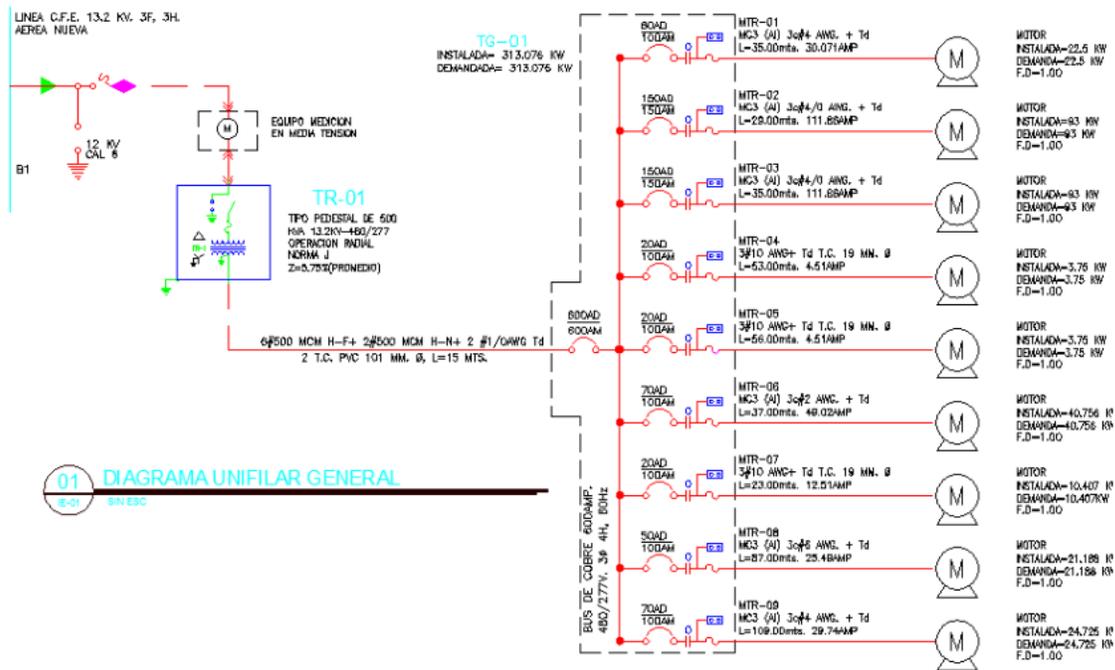


Figura 1. Diagrama Unifilar de la instalación eléctrica a estudiar

Estas impedancias o reactancias generalmente expresadas en por ciento o en valores por unidad la proporcionan los fabricantes del equipo o se obtienen de normas o estándares de referencia. En esta ocasión, los valores de impedancias para los conductores se obtuvieron de la Tabla 9.- Resistencia y Reactancia en Corriente Alterna para los Cables para 600 VCA., 3 fases a 60 Hz. Y 75°C de la NOM-001-SEDE-2012, norma vigente para instalaciones eléctricas.

Consideraciones de estudio de Arco eléctrico

El objetivo de un estudio de corto circuito es proporcionar información sobre las corrientes y voltajes en un sistema eléctrico durante condiciones de falla.

Esta información es requerida para determinar las características de capacidad interruptiva momentánea de los interruptores y de otros dispositivos de protección localizados en el sistema, ya que, si esta propiedad no es seleccionada adecuadamente y se presenta un corto circuito de la mayor magnitud posible, puede provocar hasta la explosión de los interruptores, poniendo en peligro la integridad física de personas.

El cálculo del corto circuito se llevó a cabo utilizando ETAP (Electrical Transient Analysis Program) [2], en el cual se introdujo la información del sistema eléctrico y se simuló una falla trifásica en el bus de distribución de fuerza para los motores eléctricos, posteriormente, se realizó el cálculo por el procedimiento "por unidad".

De acuerdo al estándar IEEE-141 [3], del cual están basados estos cálculos en su totalidad, existen cuatro cantidades base: potencia base en Volt-Amper, Voltaje Base en KV, corriente Base en amperes e impedancia base en ohms; a las cuales se les designa una letra B como subíndice para indicar que es el valor base.

Potencia Base= S_B

Voltaje Base= V_B

Y la corriente base y la impedancia base se calcularán como:

$$\text{Corriente Base} = I_B = S_B / V_B$$

Usualmente se selecciona un valor conveniente para la potencia aparente de la base en volts-ampères, y se selecciona una tensión de base a un nivel determinado para que coincida con la tensión nominal del transformador en ese nivel. Las tensiones de base en otros niveles se establecen mediante la relación de transformación de los transformadores del sistema. La impedancia y corriente base en cada nivel se obtiene entonces mediante relaciones estándar.

Las ecuaciones **[ecuación 1 y ecuación 2]** se aplican a sistemas trifásicos, donde la tensión de base es el voltaje de línea a línea en volts o kilo volts, y la potencia aparente base es la potencia aparente trifásica en kilovolts-ampères o megavolt-ampère:

$$\text{BaseCurrent(ampères)} = \frac{\text{BasekVA}(1000)}{\sqrt{3}(\text{BaseVolts})} = \frac{\text{BasekVA}}{\sqrt{3}(\text{basekV})}$$

$$\text{BaseCurrent(ampères)} = \frac{\text{BaseMVA}(10^6)}{\sqrt{3}(\text{BaseVolts})} = \frac{\text{BaseMVA}(1000)}{\sqrt{3}(\text{basekV})}$$

Ecuación 1

$$\text{Base Impedance(ohms)} = \frac{\text{BaseVolts}}{\sqrt{3}(\text{BaseAmperes})} = \frac{(\text{BaseVolts})^2}{\text{basekVA}(1000)}$$

$$\text{Base Impedance(ohms)} = \frac{(\text{BasekV})^2 (1000)}{\text{BasekVA}} = \frac{(\text{BasekV})^2}{\text{baseMVA}}$$

Ecuación 2

Las impedancias de los elementos individuales del sistema de potencia se obtienen usualmente en formas que requieren la conversión a las bases relacionadas para un cálculo por unidad. Las impedancias de los cables se expresan generalmente en ohms. La conversión a valores por unidad utilizando las relaciones conduce a las siguientes ecuaciones simplificadas **[ecuación 3 y ecuación 4]**, donde la impedancia por unidad es Z_{pu} :

$$Z_{pu} = \frac{\text{Actual Impedance In Ohms}(\text{baseMVA})}{(\text{basekV})^2}$$

$$Z_{pu} = \frac{\text{Actual Impedance In Ohms}(\text{basekVA})}{(\text{basekV})^2 (1000)}$$

Ecuación 3

Las impedancias del transformador normalmente están dadas en porcentaje de acuerdo a la clasificación del equipo y se convierten utilizando:

$$Z_{pu} = \frac{\text{Percent Impedance}(base\ kVA)}{kVA_{rating}(100)}$$

$$Z_{pu} = \frac{\text{Percent Impedance}(10)(base\ MVA)}{kVA_{rating}}$$

Ecuación 4

La reactancia de los motores puede obtenerse a partir de tablas que proporcionan reactancias en valores por unidad (para este caso los valores en KVA de las máquinas de inducción se obtuvieron del software ETAP). En elementos en kilovolts-amperes, se convierten a valores en por unidad utilizando la siguiente ecuación [ecuación 5]:

$$X_{pu} = \frac{\text{per-unit Reactance}(base\ kVA)}{kVA_{rating}}$$

Ecuación 5

El primer paso para calcular la potencia y corriente de corto circuito utilizando el método de "por unidad" es establecer una base de potencia en KVA o MVA y una base de voltaje en KV y convertir todas las impedancias del sistema a valores en por unidad en dichas bases.

Después de convertir todas las impedancias a una base común, el sistema puede reducirse a una sola impedancia en el punto de falla por combinaciones sucesivas serie o paralelo o por transformaciones delta- estrella.

Datos de la compañía suministradora:

Datos proporcionados por la C.F.E. en la acometida de la subestación:

Potencia de corto circuito trifásica: 160 MVA

Corriente de corto circuito trifásica: 6,998.84 A

Transformadores de potencia.

Transformador TR-01

S= 500 KVA

Impedancia %Z= 5.75 a 170°C.

Conclusiones de Normas:

Nuevamente, haciendo énfasis en que este cálculo está basado en las recomendaciones prácticas del estándar IEEE-141, se tomaron las siguientes consideraciones:

- 1) Estudios de cortocircuito en el sistema industrial, si se siguen los procedimientos de las normas aplicables sin interpretación. El procedimiento de aplicación del disyuntor de alta tensión descrito en ANSI / IEEE C37.010-1979 y ANSI / IEEE C37.5-1979, recomienda omitir el grupo de motores de menos de 50 hp cada uno y aplica factores multiplicadores de 1,2 o 1,0 a impedancias sub-transitorias.
- 2) En grupos de motores más grandes el interruptor de baja tensión, la guía de aplicación, ANSI / IEEE C37.13-1981 recomienda que se utilicen las impedancias base sub-transitorias, estas permiten estimar las contribuciones simétricas típicas del primer ciclo desde motores de baja tensión conectados a cortocircuitos de bus un de una subestación a 4 veces su corriente (el equivalente a 0,25 por unidad de impedancia).

- 3) La guía de aplicación ANSI / IEEE C37.13-1981 determina que un motor contribuye aproximadamente 4 veces el valor de su corriente nominal durante un corto circuito, si este opera desde una subestación de bajo voltaje. Si la suma de las potencias de los motores conectados a un sistema eléctrico en 480 o 600 V es aproximadamente igual a la potencia del transformador en kilo volts - amperes (KVA), se puede considerar una reactancia por unidad de 0.25 y utilizarla como una sola impedancia para representar dicho grupo de motores.
- 4) Para un grupo de motores cuyas capacidades sean menores a 50 HP conectados a un sistema industrial multi-tensión, se puede considerar un valor de reactancia por unidad de 0.28 basado en la potencia del motor en kilo volts - amperes.

Cálculos Generales.

A.- selección de cantidades base:

Potencia Base= 500 KVA= 1p.u.

Voltaje Base 1= 13.2 KV.

Voltaje Base 2= 0.48 KV.

Corriente Base 1= 21.869 A.

Corriente Base 2= 601.42 A.

B.- Conversión de impedancias a una base común:

Compañía suministradora= Pcc3F= 160,000 KVA.

Corriente de corto circuito de la Compañía suministradora= 6,998.39 A.

$$\text{Impedancia Compañía Suministradora: } X_s = \frac{500kVA}{160,000kVA} = 0.003125ohms$$

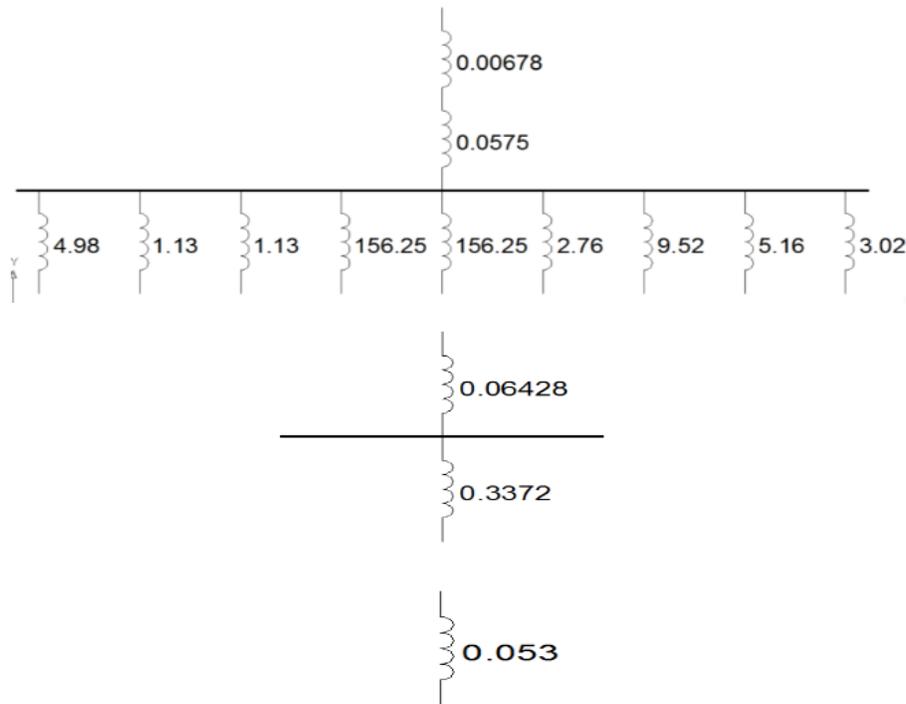
$$\text{Impedancia de transformadores} = \frac{\%Zx(500)}{(500)(100)} = 0.0575pu$$

C.- Impedancias de los motores.

Tabla 1. (Impedancias de los motores)

PARTIDA	DESCRIPCIÓN	HP	KVA	X p.u.
1	MOTOR 1	30	28.1	4.982206406
2	MOTOR 2	125	110	1.136363636
3	MOTOR 3	125	110	1.136363636
4	MOTOR 4	0.5	0.8	156.25
5	MOTOR 5	0.5	0.8	156.25
6	MOTOR 6	50	45.3	2.759381898
7	MOTOR 7	15	14.7	9.523809524
8	MOTOR 8	25	27.1	5.166051661
9	MOTOR 9	40	41.4	3.019323671

D.- Diagrama de Impedancias.



Por lo tanto:

Z equivalente= 0.053 p.u.

Corriente de corto circuito $3F = I_B / Z_{p.u.}$

$$I_{cc} = \frac{601.42A}{0.053 Ohms}$$

I_{cc} = 11,347.55 A.

El valor de cortocircuito monofásico, de acuerdo a lo indicado en el estándar IEEE-141, para línea a línea es aproximadamente el 87% de la corriente de corto circuito trifásica y para la falla de línea a tierra, el valor de corto circuito se puede considerar un 125% de la corriente de corto circuito trifásica. Entonces:

NÚMERO DE BUS	DESCRIPCIÓN	I _{cc} 3F (KA)	I _{cc} 2F (KA)	I _{cc} F-T (KA)
1	TG-01	11.34755	9.872325	14.184375

Utilizamos el método anexo B de acuerdo al estándar NFPA 70E de la publicación de Mayo 2003.

Límite de arco eléctrico: La potencia máxima teórica en MW es la mitad de la falla de tres fases, esto ocurre cuando la corriente de arco es 70.7% de la corriente de falla. Basado en esto, el límite de protección del arco es calculada en la siguiente fórmula [ecuación 6] como:

$$D_B = \sqrt{(2.65)(1.732)(V)(I_{bf})(t)}$$

Ecuación 6

Dónde:

D_B = Distancia del límite desde el punto de arco (pulgadas)

V = Rango de voltaje L – L (kV)

I_{bf} = Corriente de falla, sólidamente aterrizada (kA)

t = tiempo de arco (segundos)

lcc = 11,347.55 A

$$D_B = \sqrt{(2.65)(1.732)(V)(I_{bf})(t)}$$

$$D_B = \sqrt{(2.65)(1.732)(48)(11,347.55)(0.06s)}$$

$$D_B = 1.2247$$

Energía Incidente (Arc in box) 0.6 kV o menor, 16 – 50 kA corriente de corto circuito representada en la siguiente formula **[ecuación 7]** como sigue:

$$E = (1,038.7)(D)^{-1.4738}(t)[0.0093(I_{bf})^2 - 0.3453(I_{bf}) + 5.9675]$$

Ecuación 7

Dónde:

E = energía incidente (cal / cm^2)

I_{bf} = Corriente de falla, sólidamente aterrizada (kA)

t = tiempo del arco (segundos)

D = Distancia de trabajo del arco (pulgadas)

$$E = (1,038.7)(25)^{-1.4738}(0.06s)[0.0093(11.34755)^2 - 0.3453(11.34755) + 5.9675]$$

$$E = [1.1975 - 3.918 + 5.9675]0.542447106$$

$$E = [3.247]0.542447106$$

$$E = 1.761325$$

Utilizamos el método de “Arc in box” de acuerdo al estándar NFPA 70E del anexo C de la publicación de Mayo 2003.

Anexo Método C (2003).

Tabla 2 Ecuaciones “Arc in box” para calcular la corriente de arco, energía incidente y el límite de protección eléctrica en las ecuaciones 8 y 9.

	V < 1 kV	1 kV < V < 5 kV	V > 5 kV
I_a =	$0.85I_{bf} - 0.004I_{bf}^2$	$0.928I_{bf}$	I_{bf}
E =	$416I_{at}D^{-1.6}$	$21.8I_{at}D^{-0.77}$	$16.5I_{at}D^{-0.77}$
D_B =	$(416I_{at} / 1.2)^{0.625}$	$(21.8I_{at} / 1.2)^{1.3}$	$(16.5I_{at} / 1.2)^{1.3}$

$$I_a = 0.85(11.34755kA) - 0.004(11.34755kA)^2 \text{ (Ecuación 8)}$$

$$I_a = 9.6454$$

$$E = 416(9.6454)(0.06)(25)^{-1.6} \text{ (Ecuación 9)}$$

$$E = 1.396$$

$$D_B = \frac{[(416)(9.6454)(0.06)]^{0.625}}{1.2}$$

$$D_B = 27.48in$$

RESULTADOS.

El cálculo refleja la Categoría 0 (Algodón no tratado, lana, rayón) mostrado en la tabla 3, la cual sugiere la siguiente información [etiqueta 1].



Etiqueta 1



Figura 2. (Ejemplos de vestimenta para Arco Eléctrico)

Tabla 3 - Tabla de parámetros por tipo de prenda industrial utilizada por el personal que trabaja cerca de conductores energizados [1]

CATEGORIA	NIVEL DE ENERGIA (cal / cm ²)	NIVEL DE ENERGIA (j / cm ²)
0	< 2	< 8.4
Algodón NO tratado, Lana, Rayón		
1	5	21
Camisas y pantalones FR		
2	8	34
Ropa interior de algodón más camisa y pantalón FR		
3	25	105
Ropa interior de algodón más camisa y pantalón FR más overol FR		
4	40	168
Ropa interior de algodón más camisa y pantalón FR más vestido de arco multicapas (3 o más)		

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Como se observó en los cálculos realizados de corto circuito teóricamente de nuestro sistema eléctrico industrial y los valores obtenidos prácticamente mediante el software ETAP, podemos concluir que el nivel de corriente y la dimensión del arco eléctrico que se produciría en caso de una falla trifásica (el caso más crítico) es muy peligroso para las personas que vayan a operar cerca del sistema, ya que pueden ser víctimas de quemaduras, electrocuciones, o en el peor de los casos, la muerte.

Con el fin de evitar o disminuir la probabilidad de que suceda alguno de estos incidentes, se hace la recomendación de utilizar el equipo de seguridad con un determinado nivel (hacer mención del nivel de seguridad según la etiqueta que seleccionamos de la NFPA), que, de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, este tipo de equipo cumple con las especificaciones necesarias para poder operar cerca de nuestro sistema eléctrico cuando en este ocurra una falla.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Chet Davis, P.E., Conrad St. Pierre, David Castor, P.E., Robert Luo, PhD, Satish Shrestha, 2003, Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards. ESA Inc., 2003
- [2] IEEE Standards 1584 – 2002, IEEE Guide for performing Arc – Flash Hazard calculations, IEEE Industry Applications Society, September 23, 2002 (SH95023).
- [3] ETAP, 1986, Electrical Power System Analysis Software, Irvine California, USA, 2014 Edition.
- [4] “IEEE Red Book”, 1986, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, ANSI / IEEE Std 141 – 1986, IEEE, 1986 Edition.
- [5] NFPA – 70E, May 2003, “Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces”, 2003 Edition.