



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS  
UTILIZANDO EL PROGRAMA EASY POWER**

**Marcos Eduardo Guoz Rodas**

Asesorado por el Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez

Guatemala, septiembre de 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS  
UTILIZANDO EL PROGRAMA EASY POWER**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARCOS EDUARDO GUOZ RODAS**

ASESORADO POR EL ING. GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Sergio Leonel Gómez Bravo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS UTILIZANDO EL PROGRAMA EASY POWER**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de mayo de 2021.

**Marcos Eduardo Guoz Rodas**





Guatemala, 8 de marzo de 2022.

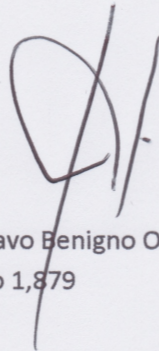
Ingeniero José Aníbal Silva  
Coordinador Área de Electrotecnia  
Escuela Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
USAC.

Estimado Ingeniero:

De acuerdo con la designación efectuada por la Dirección de Escuela, me permito informarle que he procedido a asesorar el Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE ARCO ELECTRICO EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS UTILIZANDO EL PROGRAMA EASY POWER**, desarrollado por el estudiante MARCOS EDUARDO GUOZ RODAS, carne 2015-03593 y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo, remitiéndolo a esa Coordinación para el trámite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Agradeciendo la atención a la presente, me es grato suscribirme, deseándole éxitos en sus labores.

Atentamente,



Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez.  
Colegiado 1,879  
ASESOR

ING. GUSTAVO B. OROZCO  
COLEGIADO 1879





REF. EIME 11.2022.  
19 DE ABRIL 2022

Señor Director  
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS UTILIZANDO EL PROGRAMA EASY POWER, del estudiante: Marcos Eduardo Guoz Rodas, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. José Anibal Silva de los Angeles  
Coordinador de Electrotécnia



STO



REF. EIME 40.2022.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área , al trabajo de graduación del estudiante Marcos Eduardo Guoz Rodas: **“ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS UTILIZANDO EL PROGRAMA EASY POWER”**, procede a la autorización del mismo.



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 26 de mayo de 2022.



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por amarme tal como soy y tomarme como tu hijo. Por tu salvación a mi vida.
<b>Mi padre</b>	Abner Guoz, por ser mi mejor ejemplo y amigo
<b>Mi madre</b>	Ilse Rodas, por siempre estar al pendiente de mi bienestar y por tanto amor sincero.
<b>Mis hermanos</b>	J. Pablo y J. Daniel Guoz. Los mejores hermanos.
<b>Mis abuelos</b>	Salomón Guoz, Berta Morales de Guoz, Guillermo Rodas y Leonarda Vargas de Rodas.
<b>Mi novia</b>	Astrid Choxin, siempre has estado para mí.
<b>Mis tíos y primo</b>	Erick Galdámez, Ada Guoz, Elmer Guoz y Bryan Galdámez Guoz. Demasiado especiales para mí.
<b>Mis mejores amigos</b>	Mauricio Rosales, Stuardo Batres, Lester García.
<b>Mi familia</b>	Guoz y a la familia Rodas.





## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por la vida y salud, por permitirme realizar mis sueños.
<b>Mis padres</b>	Por todo su apoyo y amor.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por la oportunidad de formarme profesionalmente.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por enseñarme nuevas formas de retarme a mí mismo.
<b>Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica</b>	Por el esfuerzo constante para compartir conocimiento.
<b>Proyectos Eléctricos y Control Industrial de C. A., S. A.</b>	Ingenieros Jorge Escobar y Juan Carlos Sáenz, por permitirme utilizar sus medios para la elaboración de esta investigación.
<b>Ing. Gustavo Beningno Orozco Godínez</b>	Por el apoyo en la asesoría de este trabajo de graduación.
<b>Global Screen Printing, S. A.</b>	Ing. Luis Herrera y Lcda. Mónica Acevedo, por ser parte importante en mi formación profesional.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXII
1. INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES .....	1
1.1. Subestaciones industriales .....	1
1.1.1. Esquema unifilar de una subestación .....	1
1.1.2. Tipos de subestaciones industriales .....	4
1.1.2.1. Subestación compacta .....	4
1.1.2.2. Subestaciones de interior y exterior.....	6
1.1.2.3. Subestaciones aéreas .....	7
1.2. Transformadores eléctricos .....	8
1.2.1. Aspectos constructivos .....	9
1.2.1.1. Núcleo .....	9
1.2.1.2. Devanados.....	10
1.2.1.3. Sistema de refrigeración.....	10
1.2.1.4. Otros elementos .....	11
1.2.1. Principio de funcionamiento de un transformador ideal .....	12
1.2.2. Funcionamiento de un transformador real .....	14
1.2.2.1. Circuito equivalente .....	15
1.2.3. Conexiones de transformadores trifásicos.....	16

	1.2.3.1.	Conexión estrella-estrella .....	16
	1.2.3.2.	Conexión estrella-delta.....	17
	1.2.3.3.	Conexión delta-estrella.....	17
	1.2.3.4.	Conexión delta-delta .....	17
	1.2.4.	Criterios para selección de un transformador.....	18
1.3.		Conductores eléctricos.....	18
	1.3.1.	Calibre de conductores.....	19
	1.3.2.	Selección de conductores .....	20
	1.3.2.1.	Criterio de caída de tensión.....	20
	1.3.2.1.	Criterio por corriente.....	22
	1.3.3.	Canalización y tuberías .....	24
1.4.		Tableros eléctricos .....	25
	1.4.1.	Protecciones eléctricas.....	26
	1.4.1.1.	Fusibles .....	26
	1.4.1.2.	Interruptores termomagnéticos.....	28
	1.4.1.3.	Interruptor automático tipo guardamotor .....	30
	1.4.2.	Otros elementos de tableros eléctricos .....	31
	1.4.2.1.	Celdas y gabinetes.....	31
	1.4.2.2.	Barras conductoras .....	33
	1.4.2.3.	Contactores y relés .....	34
	1.4.2.4.	Controlador lógico programable (PLC).....	36
	1.4.2.5.	Variador de frecuencia .....	37
2.		ARCO ELÉCTRICO .....	39
	2.1.	El fenómeno del arco eléctrico .....	39
	2.1.1.	Propiedades físicas de un arco .....	40
	2.1.2.	Disposiciones comunes para su creación .....	42

2.1.3.	Comportamiento eléctrico de un arco .....	44
2.2.	Repercusiones en el ser humano .....	48
2.2.1.	Límites de temperatura del cuerpo humano .....	48
2.2.2.	Fronteras de aproximación por arco eléctrico.....	50
2.3.	Métodos de cálculo existentes para la energía incidente .....	52
2.3.1.	Significado físico de la energía incidente.....	52
2.3.2.	Métodos de cálculo teóricos .....	53
2.3.2.1.	<i>Software</i> de Kinectrics .....	53
2.3.2.2.	Método de Ralph Lee .....	56
2.3.3.	Métodos de cálculo estadísticos.....	58
2.3.3.1.	NFPA 70E-2018.....	59
2.3.3.2.	IEEE 1584-2018 .....	62
2.4.	Equipo de protección personal resistente al arco eléctrico.....	66
2.4.1.	Niveles de protección .....	66
2.4.1.1.	Nivel 1.....	67
2.4.1.2.	Nivel 2.....	68
2.4.1.3.	Nivel 3.....	68
2.4.1.4.	Nivel 4.....	69
2.4.2.	Normatividad de telas resistente al arco eléctrico... 70	
2.4.2.1.	Norma ASTM F1506.....	71
2.4.2.1.	Norma ASTM D6413 .....	72
2.4.2.1.	Norma ASTM F1959.....	73
3.	ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO EN INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS .....	77
3.1.	Tipos de fallas en instalaciones eléctricas.....	77
3.1.1.	Fallas trifásicas simétricas .....	78
3.1.2.	Fallas asimétricas .....	78

3.1.2.1.	Componentes de secuencia positiva (Z1) .....	80
3.1.2.2.	Componentes de secuencia negativa (Z2) .....	81
3.1.2.3.	Componentes de secuencia cero (Z0) .....	81
3.2.	Fundamentos para el cálculo de la corriente de cortocircuito ..	83
3.2.1.	Fuentes alimentadoras de corriente de falla.....	84
3.2.2.	Método por unidad para cálculo de cortocircuito .....	86
3.2.2.1.	Diagrama unifilar y de impedancias .....	87
3.2.2.2.	Cálculo de corriente de cortocircuito ....	89
3.2.2.3.	Impedancia de elementos eléctricos ....	90
3.3.	Resultados de cortocircuito en industria procesadora de embutidos.....	92
3.3.1.	Determinación del diagrama unifilar de la instalación eléctrica .....	92
3.3.2.	Cálculo de reactancias transitorias de la red.....	99
3.3.3	Simplificación de la red de reactancias .....	107
3.3.4	Cálculo de corrientes de cortocircuito .....	110
4.	CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO .....	115
4.1.	Estudio de cortocircuito utilizando Easy Power.....	115
4.2.	Antecedentes .....	116
4.3.	Cálculos del bus principal.....	118
4.3.1.	Cálculos con NFPA 70E .....	118
4.3.2.	Cálculos con IEEE 1584-2018.....	119
4.3.2.1.	Corriente de arco eléctrico .....	119
4.3.2.2.	Energía incidente .....	121
4.3.2.3.	Frontera de relámpago de arco .....	123

4.4.	Cálculos de buses 1, 2 y 14.....	125
4.4.1.	Corriente de arco eléctrico.....	126
4.4.2.	Energía incidente.....	127
4.4.3.	Frontera de relámpago de arco .....	128
4.5.	Resultados de arco eléctrico en todos los buses.....	129
5.	SIMULACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO UTILIZANDO EASY POWER .	135
5.1.	Creación de un diagrama unifilar.....	136
5.1.1.	Parámetros necesarios para los buses.....	139
5.1.2.	Parámetros necesarios para la subestación industrial .....	140
5.1.3.	Parámetros necesarios para referencia de voltaje principal .....	141
5.1.4.	Parámetros necesarios para los generadores .....	141
5.1.5.	Parámetros necesarios para los motores .....	142
5.1.6.	Parámetros necesarios para los capacitores .....	144
5.1.7.	Parámetros necesarios para los transformadores	145
5.1.8.	Parámetros necesarios para los interruptores .....	146
5.1.9.	Parámetros necesarios para los interruptores con fusibles .....	148
5.2.	Simulación del análisis de cortocircuito .....	149
5.3.	Simulación de arco eléctrico.....	157
5.3.1.	Selección de los parámetros a utilizar para el cálculo .....	157
5.3.2.	Generación de resultados de arco eléctrico .....	161
5.3.3.	Generación de etiquetas para cada elemento de la instalación.....	162
5.4.	Aspectos generales de señalizaciones de seguridad .....	164
5.5.	Etiquetas por bus.....	166

5.5.1.	Etiquetas de señalización de arco eléctrico.....	167
6.	PROYECCIÓN ECONÓMICA.....	179
6.1.	Descripción técnica del estudio de arco eléctrico.....	179
6.1.1.	Trabajo en campo .....	179
6.1.2.	Análisis de ingeniería .....	182
6.2.	Costos técnico-financieros .....	182
	CONCLUSIONES.....	185
	RECOMENDACIONES .....	187
	BIBLIOGRAFÍA.....	189
	APÉNDICES.....	193



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama unifilar de una subestación eléctrica industrial.....	3
2.	Subestación compacta aislada en aire.....	5
3.	Subestación compacta aislada en hexafluoruro de azufre.....	6
4.	Subestación tipo interior.....	7
5.	Subestación tipo aérea.....	8
6.	Tipos de núcleos transformadores monofásicos.....	10
7.	Aspectos constructivos de un transformador de potencia trifásico.....	12
8.	Transformador eléctrico monofásico ideal.....	13
9.	Circuito equivalente del transformador.....	16
10.	Sección de conductores TW y THW en $mm^2$ .....	23
11.	Área de tuberías conduit a diferentes factores de relleno.....	25
12.	Curva típica de operación de fusibles.....	27
13.	Interruptor magneto-térmico para riel DIN.....	29
14.	Interruptor de caja moldeada.....	30
15.	Simbología del contactor: bobina, polos y contactos.....	34
16.	Diferencias entre un contactor y un relé.....	35
17.	Clasificación de un arco entre dos electrodos.....	41
18.	Regiones de un arco eléctrico.....	42
19.	Representación de parámetros de un arco eléctrico.....	45
20.	Diagrama vectorial de un arco eléctrico.....	47
21.	Curva de efecto de la temperatura sobre la piel humana.....	49
22.	Fronteras de aproximación por arco eléctrico.....	51
23.	Método teórico-ARCPRO.....	54

24.	Energía incidente versus corriente de falla sólida: arco eléctrico trifásico de 6 ciclos de duración.....	59
25.	Máxima energía incidente versus distancia de los electrodos de arco eléctrico .....	60
26.	Especificaciones de la Norma ASTM F1506.....	72
27.	Aparato de prueba para flamabilidad en textiles.....	73
28.	Aparato de prueba para resistencia de arco eléctrico.....	75
29.	Gráfica de probabilidad de quemadura de segundo grado .....	76
30.	Periodos de un cortocircuito en un generador .....	79
31.	Falla trifásica.....	79
32.	Componentes de secuencia positiva .....	80
33.	Componentes de secuencia negativa.....	81
34.	Componentes de secuencia cero.....	82
35.	Fuentes de alimentación de cortocircuito.....	86
36.	Diagrama unifilar-acometida principal.....	94
37.	Diagrama unifilar-bus 1 parte 1 .....	95
38.	Diagrama unifilar-bus 1 parte 2.....	96
39.	Diagrama unifilar-bus 2 parte 1 .....	97
40.	Diagrama unifilar-bus 2 parte 2.....	98
41.	Diagrama de reactancias acometida principal .....	105
42.	Diagrama de reactancias bus 1 .....	106
43.	Diagrama de reactancias bus 2 .....	107
44.	Simplificación 1 de reactancias.....	109
45.	Diagrama de reactancias simplificado .....	111
46.	Análisis de cortocircuito-corrientes de falla.....	113
47.	Corrientes de cortocircuito por bus .....	117
48.	Espacio de trabajo en Easy Power .....	137
49.	Paleta de equipos Easy Power .....	138
50.	Datos de buses y <i>switchgear</i> .....	140

51.	Datos de utilidad .....	142
52.	Datos de generadores.....	143
53.	Datos de motores.....	144
54.	Datos de bancos de capacitores .....	145
55.	Datos de transformadores.....	146
56.	Datos de interruptores.....	147
57.	Datos de interruptores con fusibles.....	149
58.	Estudio de cortocircuito paso 2 .....	150
59.	Estudio de cortocircuito paso 3 .....	151
60.	Estudio de cortocircuito paso 4 .....	151
61.	Estudio de cortocircuito.....	152
62.	Diagrama unifilar bus 1, 2 y 14.....	153
63.	Diagrama unifilar cargas de bus 1-parte 1 .....	154
64.	Diagrama unifilar cargas de bus 1-parte 2 .....	155
65.	Diagrama unifilar cargas de bus 2.....	156
66.	Selección de parámetros arco eléctrico paso 1.....	157
67.	Selección de parámetros arco eléctrico paso 2.....	158
68.	Selección de parámetros arco eléctrico paso 3.....	159
69.	Simulación de arco eléctrico en Easy Power .....	160
70.	Simulación de arco eléctrico en Easy Power .....	161
71.	Etiqueta de señalización de arco eléctrico generada con Easy Power... ..	164
72.	Etiqueta de señalización conforme a ANSI Z535.4 .....	166
73.	Etiqueta de bus principal .....	167
74.	Etiqueta de bus 1 .....	168
75.	Etiqueta de bus 2 .....	168
76.	Etiqueta de bus 14 .....	169
77.	Etiqueta de bus 3 .....	169
78.	Etiqueta de bus 4 .....	170

79.	Etiqueta de bus 5 .....	170
80.	Etiqueta de bus 6 .....	171
81.	Etiqueta de bus 7 .....	171
82.	Etiqueta de bus 8 .....	172
83.	Etiqueta de bus 9 .....	172
84.	Etiqueta de bus 10 .....	173
85.	Etiqueta de bus 11 .....	173
86.	Etiqueta de bus 12 .....	174
87.	Etiqueta de bus 13 .....	174
88.	Etiqueta de bus 15 .....	175
89.	Etiqueta de bus 16 .....	175
90.	Etiqueta de bus 17 .....	176
91.	Etiqueta de bus 18 .....	176
92.	Etiqueta de bus 19 .....	177

## TABLAS

I.	Nomenclatura utilizada para tipo de refrigerante en transformadores eléctricos.....	11
II.	Grados de protección contra cuerpos extraños indicado por el primer dígito de la nomenclatura IP .....	32
III.	Grados de protección contra humedad indicado por el segundo dígito de la nomenclatura IP .....	33
IV.	Configuración de electrodos comunes en un arco eléctrico.....	43
V.	Fronteras de aproximación .....	50
VI.	Constantes de cálculo para la corriente de arco eléctrico según el método de IEEE 1584-2018.....	63
VII.	Constantes de cálculo para energía incidente y distancia de relámpago de arco .....	65

VIII.	Categorías de EPP para arco eléctrico .....	67
IX.	Cortocircuito en fallas asimétricas.....	82
X.	Cálculo de reactancias p.u. de todos los motores de inducción.....	101
XI.	Resultados de corriente de cortocircuito referido a 480 V.....	112
XII.	Corrientes de falla disponibles por bus .....	115
XIII.	Comparación de cálculos de bus principal .....	124
XIV.	Resultados de arco eléctrico buses 1, 2 y 14.....	129
XV.	Datos por bus utilizados para el cálculo .....	130
XVI.	Resultados de arco eléctrico en todos los buses .....	131
XVII.	Categorías de EPP para arco eléctrico .....	132
XVIII.	Listado de equipos utilizados en el estudio de arco eléctrico.....	139
XIX.	Comparativa de cálculos manuales y utilizando Easy Power.....	162
XX.	Costos de ingeniería .....	183
XXI.	Costos de <i>software</i> y materiales .....	184
XXII.	Resumen de costos totales para la elaboración del proyecto .....	184



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<i>I arc</i>	Corriente de arco eléctrico
<b>I</b>	Corriente eléctrica
<b>ABF</b>	Distancia de relámpago de arco (mm)
<b>D</b>	Distancia (en metros, mm o pulgadas)
<b>E</b>	Energía incidente en calorías por centímetro cuadrado
<b>Z</b>	Impedancia eléctrica
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>P</b>	Potencia activa (kW)
<b>S</b>	Potencia aparente (kVA)
<b>Q</b>	Potencia reactiva (kVAR)
<b>plg</b>	Pulgada
<b>R</b>	Resistencia eléctrica
<b>X''</b>	Reactancia subtransitoria
<b>X'</b>	Reactancia transitoria
<b>V</b>	Voltaje





## GLOSARIO

<b>Acometida</b>	Instalación por la que se deriva de la red de distribución hacia un edificio u otro lugar, parte del fluido que circula por una conducción principal.
<b>Arco eléctrico</b>	Descarga eléctrica luminosa entre dos electrodos, en el seno de un gas que se ioniza.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
<b>Bus</b>	Conjunto de conductores común a varios dispositivos, que permite distribuir corrientes de alimentación.
<b>Campo eléctrico</b>	Región del espacio en el que se define una intensidad de fuerza eléctrica.
<b>Cortocircuito</b>	Circuito que se produce, generalmente de manera accidental, por contacto entre dos conductores de polos opuestos y suele ocasionar una descarga.
<b>Falla</b>	Defecto o falta.
<b>Flamabilidad</b>	Probabilidad de que un material se queme al estar expuesto al fuego.

<b>Inducción</b>	Producción de electricidad en un conductor por influencia de un campo magnético variable.
<b>Impedancia</b>	Relación entre la tensión alterna aplicada a un circuito y la intensidad de la corriente producida, y que se mide en ohmios.
<b>NFPA</b>	Asociación Nacional de Protección contra el Fuego
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b>Potencia</b>	Proporción por unidad de tiempo mediante la cual, la energía eléctrica es transferida a través de un circuito eléctrico.
<b>Reactancia</b>	Impedancia ofrecida por un circuito eléctrico en el que existe inducción o capacidad, sin resistencia. Se mide en ohmios.
<b>Simétrico</b>	Que tiene simetría.
<b>Subestación</b>	Instalación, generalmente eléctrica, dependiente de otra principal, que da servicio a una zona determinada.
<b>Trifásico</b>	Dicho de una corriente eléctrica compuesta por tres corrientes eléctricas alternas iguales, desfasadas entre sí en un tercio de período.

## RESUMEN

Los estudios de arco eléctrico se convierten, cada vez más, en requisitos de seguridad eléctrica en la industria guatemalteca, mientras que globalmente ya lleva varios años de ser uno de los más importantes estudios eléctricos.

El capítulo uno lleva al lector a una introducción en los elementos principales de una instalación eléctrica industrial, partiendo de la acometida principal hasta las cargas eléctricas básicas. Su fin es establecer bases firmes para la posterior discusión de arco eléctrico.

El capítulo dos describe el desarrollo teórico del arco eléctrico; propiedades físicas, comportamiento eléctrico, repercusiones en el ser humano, sus métodos de cálculo, la normativa existente acerca de él, el uso de equipo de protección adecuado y las normas para la fabricación de ropa resistente al arco eléctrico.

En el capítulo tres se desarrolla el estudio de cortocircuito, estableciendo los conceptos necesarios para su elaboración, tipos de fallas, el procedimiento adecuado para su realización y los resultados obtenidos de cortocircuito en la industria objeto de estudio.

El capítulo cuatro contiene todos los cálculos de arco eléctrico: corrientes de arco eléctrico, energía incidente y distancia de arco eléctrico. En él se acude a los métodos descritos en el capítulo dos, específicamente, el método de la NFPA 70E y el de IEEE 1584-2018, ambos, los más actualizados en el estudio global de arco eléctrico.

El capítulo cinco detalla el procedimiento utilizado para el estudio de cortocircuito y de arco eléctrico utilizando el *software* Easy Power; desde la creación de un diagrama unifilar hasta la generación de etiquetas de seguridad para los equipos.

El último capítulo es una proyección económica en moneda local guatemalteca (quetzales) para guiar al lector en el procedimiento técnico-financiero para la elaboración de un estudio de arco eléctrico.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Implementar una guía práctica para estudios de arco eléctrico utilizando el programa Easy Power, aplicada a una industria procesadora de embutidos guatemalteca, comparando los cálculos, según normativa de IEEE 1584-2018 y NFPA 70E.

### **Específicos**

1. Brindar al lector un ejemplo claro de aplicación de estudio de arco eléctrico, explicando el significado de los parámetros de dicho fenómeno.
2. Comparar los resultados obtenidos de arco eléctrico entre la normativa, según IEEE y NFPA, conociendo sus métodos de cálculo, alcances y limitaciones.
3. Interpretar los resultados de arco eléctrico con respecto a la seguridad eléctrica en la industria procesadora de embutidos.



## INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, la energía eléctrica ha tomado un rol protagónico en todos los ámbitos de la vida. No existe industria sin electricidad, sistemas integrados electrónicos; no hay comunicaciones, economía formal, producción; nada.

Toda instalación eléctrica, ya sea en baja, media o alta tensión, conlleva un riesgo de choque eléctrico, de cortocircuito y de arco eléctrico. El arco eléctrico, como tema de interés en esta investigación, es un fenómeno ampliamente estudiado internacionalmente. Existen métodos establecidos por varias instituciones reconocidas para el cálculo de protección ante este riesgo, siendo siempre lo más importante la señalización y el equipo de protección personal adecuado.

Las industrias de producción masiva reúnen elementos eléctricos como subestaciones eléctricas, celdas de media tensión, transformadores de potencia, centros de control de motores, variadores de frecuencia, reactores, capacitores, elementos de campo, instrumentación, entre otros. Todos ellos se relacionan entre sí formando un sistema complejo, que es fácil de resumir en un diagrama conocido como unifilar. Este diagrama es la base de todo tipo de análisis de red, por ejemplo el estudio de arco eléctrico.

Para contar con instalaciones eléctricas seguras y confiables es necesario realizar el estudio de arco eléctrico, el cual está relacionado directamente al análisis de cortocircuito. Existen artículos internacionales para el cálculo de sus parámetros, así como varios programas para simularlo.

Esta investigación abarca el tema desde el planteamiento del problema hasta la aplicación física del estudio de arco eléctrico en una industria procesadora de embutidos guatemalteca; como ejemplo de aplicación para apoyar al lector a mejorar su análisis y comprensión de la aplicación correcta de las normas existentes.

En Estados Unidos de Norte América, diariamente existen de 5 a 10 accidentes ocasionados por el arco eléctrico. El aporte principal de esta investigación es apoyar a los ingenieros de Guatemala a realizar buenos estudios de arco eléctrico para reducir la incidencia de accidentes en los trabajadores.

Se estudiará el cálculo adecuado de los parámetros de arco, según normativas, mostrando comparaciones entre las mismas, interpretaciones físicas de los resultados, señalización de distancias de seguridad y simulación utilizando la herramienta Easy Power.



# **1. INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES**

A partir de la revolución industrial, todo el mundo ha cambiado. La industria ha incrementado sus requerimientos eléctricos a partir de la evolución a sistemas automatizados para producción masiva.

Actualmente, todas las plantas industriales cuentan con un sin fin de elementos eléctricos que conforman una red única, por lo que es importante conocer todos ellos para el análisis de arco eléctrico.

## **1.1. Subestaciones industriales**

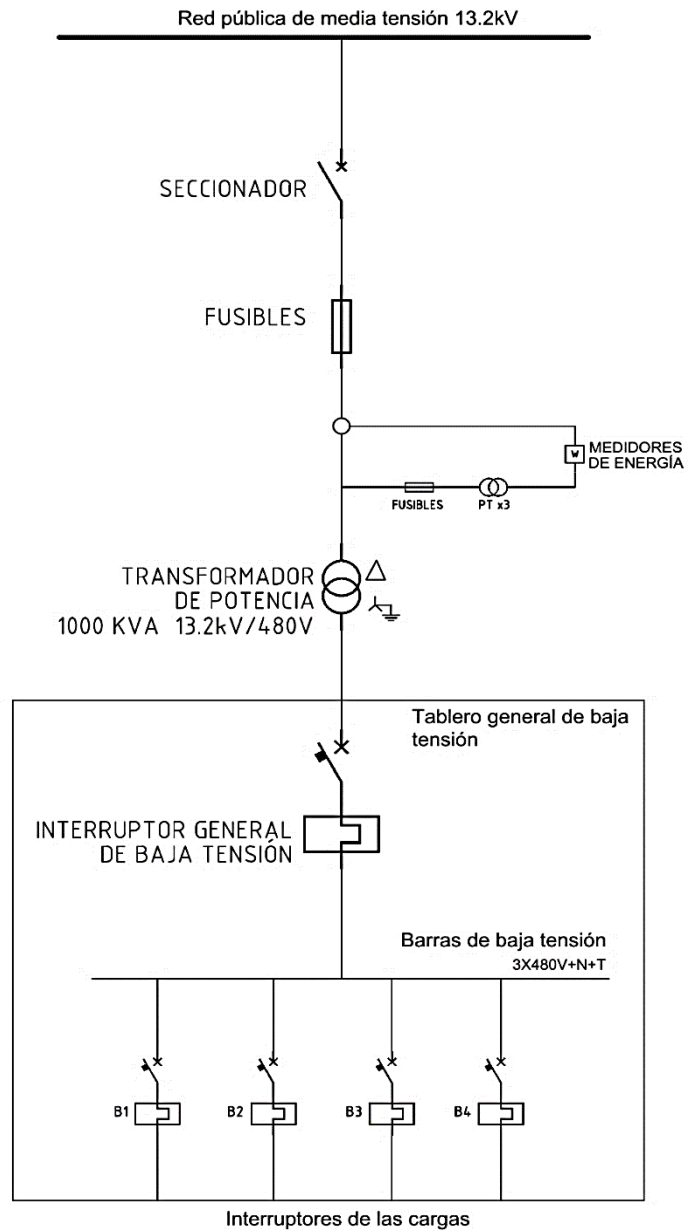
Las industrias de gran envergadura acostumbran incorporar en sus instalaciones acometidas eléctricas en media tensión, mediante un contrato con una empresa distribuidora de energía. En estos casos es necesario instalar una subestación transformadora; su alimentación es realizada con un seccionador bajo carga y fusibles para 13,2 kV, seguidos por transformadores de medida para el registro de consumo de energía eléctrica. Estos medidores son requeridos por la empresa distribuidora para la facturación mensual del servicio eléctrico; son de utilidad para el usuario.

### **1.1.1. Esquema unifilar de una subestación**

A continuación, el corazón de la subestación: el transformador de potencia. De acuerdo a la demanda en kVA de la planta industrial, así será el tamaño y cantidad de transformadores necesarios.

A partir de este punto, se instala un tablero principal de baja tensión, protegido por un interruptor termomagnético, el cual es el punto de partida para la distribución eléctrica en baja tensión dentro de la instalación; como se observa en la figura 1.

Figura 1. Diagrama unifilar de una subestación eléctrica industrial



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Electrical 2018.

### **1.1.2. Tipos de subestaciones industriales**

La principal función de una subestación eléctrica es manipular el circuito de conexión de voltaje entre dos puntos de interés. Esta manipulación se realiza en media tensión, por lo que cuando una acometida eléctrica ingresa a una instalación industrial es de suma importancia contar con un equipo capaz de manejar estos niveles de voltaje y así suministrar de energía eléctrica al transformador o transformadores principales.

Existen diversos tipos de subestaciones transformadoras para grandes industrias, centros comerciales y grandes residenciales, eso sin contar aquellas subestaciones de transmisión de alta y media tensión. En este apartado se detallarán los tipos más comunes que son utilizadas como centros de transformación.

#### **1.1.2.1. Subestación compacta**

También conocidas como subestación unitaria, cuenta con un diseño de bloque, en el que se incluye el tablero de media tensión, el transformador y el tablero de baja tensión. Es utilizada en recintos con espacio muy reducido.

Los fabricantes de este tipo de subestaciones han lanzado al mercado diversos diseños, incluyendo subestaciones aisladas en aire y en hexafluoruro de azufre (SF6).

Entre las principales ventajas de utilizar este tipo de subestaciones se pueden mencionar:

- Diseño modular
- Ocupan poco espacio
- Operación segura y simple
- Mínimo mantenimiento
- Aislamiento total de las partes energizadas

Figura 2. **Subestación compacta aislada en aire**



Fuente: Driescher y Wittjohann, S. A. *Medium Voltage Solutions. Especificación técnica. Subestaciones compactas.* [www.driwisa.com](http://www.driwisa.com). Consulta: 15 de mayo de 2021.

Figura 3. **Subestación compacta aislada en hexafloruro de azufre**



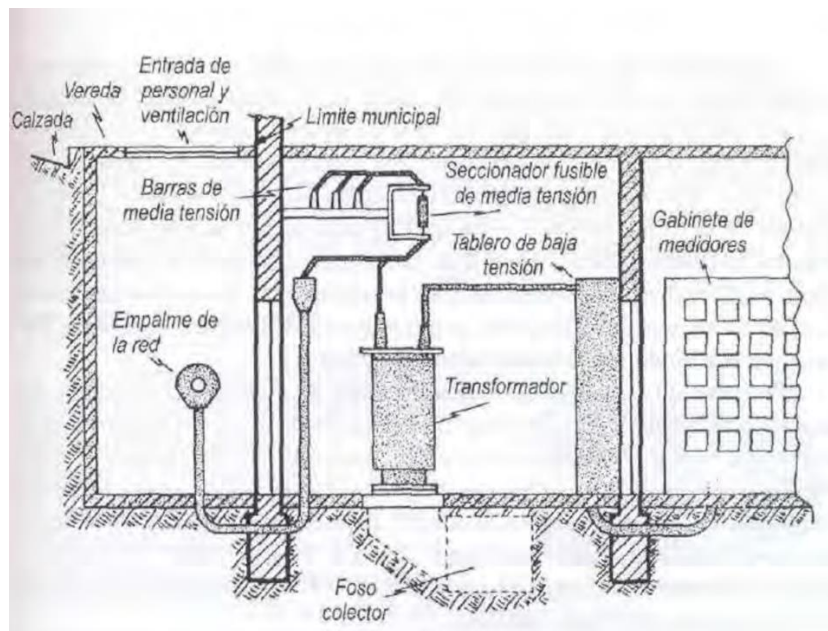
Fuente: ABB US Electrification. *Subestación con aislamiento en SF6.*  
[www.industrialsolutions.mx.abb.com](http://www.industrialsolutions.mx.abb.com). Consulta: 15 de mayo de 2021.

### **1.1.2.2. Subestaciones de interior y exterior**

En algunas aplicaciones es necesario construir un apartado de tipo interior para alojar el centro de transformación. En este se aloja el transformador principal, los elementos de protección y maniobra, así como el tablero principal en baja tensión.

Como puede observarse en la figura 4, la acometida en media tensión ingresa al recinto especial, pasando por seccionadores con fusibles de media tensión. A continuación, se conecta al transformador principal; su lado de bajo voltaje va hacia el gabinete de medidores y posteriormente al tablero principal.

Figura 4. **Subestación tipo interior**



Fuente: SOBREVILA, Marcelo; FARINA, Alberto Luis. *Instalaciones eléctricas*. p. 361.

Cuando se trata de industrias de alto consumo, las cuales se consideran como grandes usuarios, se acostumbra fabricar una subestación tipo convencional, al aire libre y alejada de edificaciones.

### 1.1.2.3. **Subestaciones aéreas**

Las aéreas son la forma más comunes de formar redes de distribución eléctrica. Este tipo de subestaciones es utilizado en muchas industrias, siendo sus principales características las siguientes:

- Costo relativamente bajo
- Montaje al aire libre
- Alto mantenimiento
- Difícil acceso

Como puede observarse en la figura 5, al estar montada sobre postes de concreto, madera u hormigón, estas subestaciones están lejos de la instalación industrial, por lo que beneficia a la seguridad eléctrica dentro de edificios. Sin embargo, su limitante es que no suelen ser construidas para potencias mayores a 630 kVA, lo que para algunas aplicaciones es muy bajo.

Figura 5. **Subestación tipo aérea**



Fuente: LA CAPITAL, Argentina. *Subestación transformadora*. [www.lacapital.com.ar](http://www.lacapital.com.ar). Consulta: 20 de abril de 2021.

## 1.2. Transformadores eléctricos

El transformador es una máquina eléctrica estática de corriente alterna, constituida por dos devanados: primario (inductor) y secundario (inducido). Este permite transformar energía eléctrica, con voltaje y amperaje determinadas a otros parámetros diferentes, ya sean mayores o menores.



La utilización de transformadores se basa en la necesidad de transmisión y distribución de energía eléctrica a altos valores de voltaje, pues de esta manera los calibres de conductores son pequeños, por lo tanto, el costo es menor. Existen diversos tipos de transformadores, cada uno con distinta aplicación; el objetivo de este apartado es conocer los aspectos generales de un transformador de potencia.

### **1.2.1. Aspectos constructivos**

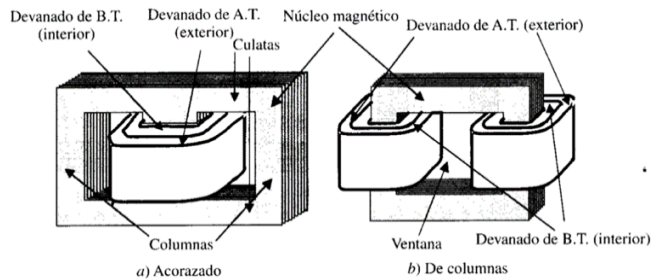
Los transformadores se construyen por distintos elementos, los cuales se describen a continuación.

#### **1.2.1.1. Núcleo**

Un transformador es un circuito magnético formado por uno o varios devanados enrollados en un sistema constituido de chapas de acero al silicio, laminadas en frío. Existen dos tipos de núcleo: acorazado y de columnas. Sus partes principales son:

- Columnas: locación donde son montados los devanados
- Culatas: unión entre columnas
- Ventanas de núcleo: locación entre columnas y a donde pasa el devanado

Figura 6. **Tipos de núcleos transformadores monofásicos**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Transformadores. Máquinas eléctricas*. p. 163.

### 1.2.1.2. Devanados

Constituyen el circuito eléctrico del transformador. Son fabricados por medio de conductores de cobre, enrollados en las columnas del núcleo. El devanado primario, al ser energizado con corriente alterna crea un flujo magnético por el núcleo, el cual es inducido en un devanado secundario, creando así un voltaje inducido con distintos valores de voltaje y corriente a los del primario, dependiente del número de vueltas de los devanados.

### 1.2.1.3. Sistema de refrigeración

Los transformadores eléctricos se dimensionan, según su capacidad de potencia en kVA. Cuando se trata de potencias pequeñas, la superficie externa del transformador es suficiente para formar un sistema de refrigeración natural, por lo que se suelen utilizar transformadores secos. Sin embargo, al tratarse de potencias elevadas, los transformadores requieren de un sistema de refrigeración en aceite.

El tipo de refrigeración de un transformador se designa por medio de 4 letras: las primeras dos se refieren al tipo de refrigerante en contacto con los arrollamientos y las siguientes dos letras se refieren al tipo de refrigerante en contacto con el sistema de refrigeración externa. A continuación, en la tabla I, se muestra la nomenclatura utilizada para referirse al tipo de refrigerante utilizado en los transformadores y su tipo de circulación.

**Tabla I. Nomenclatura utilizada para tipo de refrigerante en transformadores eléctricos**

<b>Naturaleza del refrigerante</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Circulación</b>	<b>Símbolo</b>
Aceite mineral	O	Natural	N
Pyraleno	L	Forzada	F
Gas	G		
Agua	W		
Aire	A		
Aislante sólido	S		

Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Transformadores. Máquinas eléctricas*. p. 168.

#### **1.2.1.4. Otros elementos**

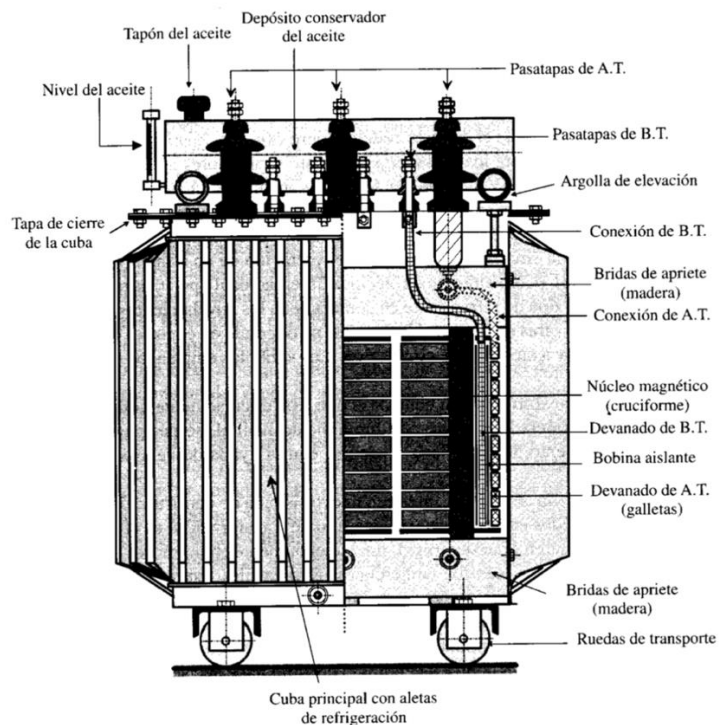
Las terminales de transformadores de media tensión son llevados al exterior de la cuba por medio de pasa tapas de porcelana, los cuales funcionan como aislantes. En transformadores de potencia es normal la instalación de un relé Buchholz, el cual es instalado en el tubo que une la cuba principal con el depósito de expansión. Este dispositivo protege al transformador contra sobrecargas, fallos de aislamientos, entre otros.

### 1.2.1. Principio de funcionamiento de un transformador ideal

Se presenta un transformador monofásico ideal con permeabilidad infinita y dos arrollamientos de ( $N_p$ ,  $N_s$ ) vueltas sin resistencia. Cuando se aplica un voltaje alterno  $V_p$  al lado primario, este produce una corriente eléctrica  $I_p$ , por lo que se crea un flujo alterno en el núcleo.

De acuerdo a la ley de Faraday, la alternancia de este flujo magnético crea dos f.e.m.s. inducidas en los devanados, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Aspectos constructivos de un transformador de potencia trifásico



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Transformadores. Máquinas eléctricas*. p. 172.

$$V_p = e_p = N_p \frac{d\Phi}{dt} \quad V_s = e_s = N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

Donde:

$V_p$  = voltaje primario

$e_p$  = voltaje primario

$N_p$  = número de vueltas del devanado primario

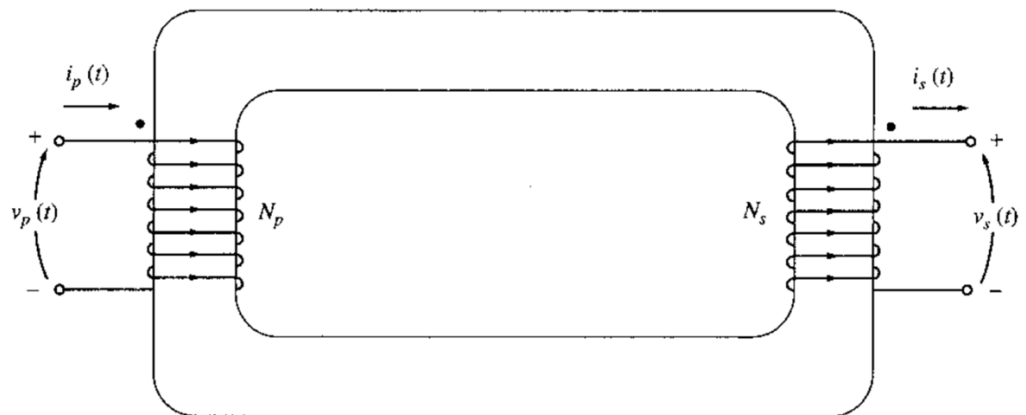
$\frac{d\Phi}{dt}$  = flujo magnético

$V_s$  = voltaje secundario

$e_s$  = voltaje secundario

$N_s$  = número de vueltas del devanado secundario

Figura 8. Transformador eléctrico monofásico ideal



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. p. 66.

Al saber que el flujo magnético puede expresarse en forma de onda senoidal y que es común entre ambos devanados, se concluye en la siguiente expresión:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = m \quad (1-2)$$

De la misma manera, considerando que la potencia eléctrica se mantiene entre ambos devanados y que esta es igual al producto entre el voltaje con la corriente, se define:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} = m \quad (1-3)$$

El factor  $m$  se conoce como relación de transformación, el cual es de suma importancia para la selección adecuada de un transformador. Al analizar los resultados antes presentados, es notoria la relación directa entre el factor  $m$  y el voltaje, así como la relación inversa que existe entre este con la corriente eléctrica. En otras palabras, un transformador reductor reducirá el voltaje primario en una magnitud dependiente de la relación de transformación mientras que la corriente incrementará de acuerdo a esta misma relación.

### **1.2.2. Funcionamiento de un transformador real**

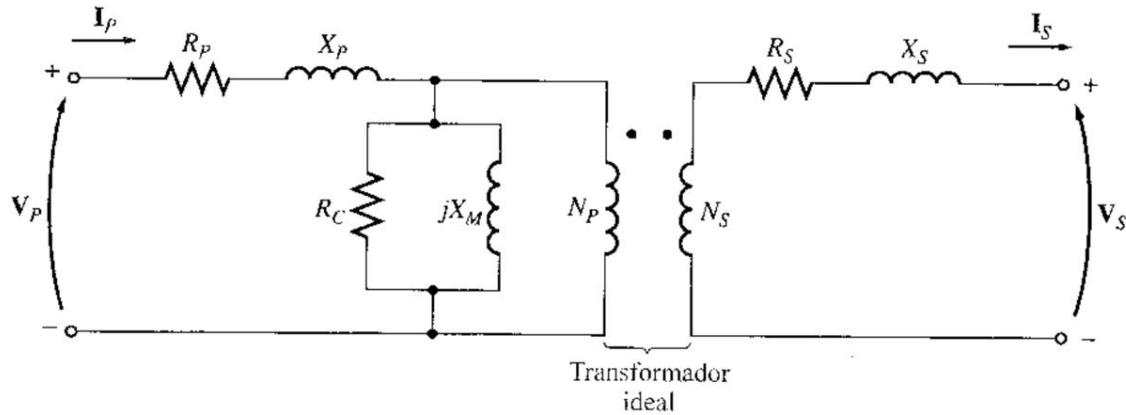
Se refiere a un transformador real cuando se toman en cuenta en el análisis, los factores de resistencia y flujo de dispersión en los devanados enrollados en el núcleo. Con base en esto, el análisis de su funcionamiento es un tanto distinto al de un transformador ideal.

### 1.2.2.1. Circuito equivalente

Para comprender de una manera más clara el fenómeno que ocurre en un transformador real se ha representado con un circuito equivalente el cual incluye los siguientes elementos:

- Resistencia de los devanados ( $R_P$  y  $R_S$ ): son aquellas inherentes a la construcción de los devanados con un hilo conductor.
- Reactancias del flujo disperso ( $jX_P$  y  $jX_S$ ): conllevan el flujo magnético que no queda confinado dentro del núcleo y constituye una pérdida de energía del transformador.
- Resistencia de pérdidas ( $R_C$ ): representa las pérdidas por histéresis, por corrientes parásitas, saturación y calor. El flujo magnético alterno, además de inducir f.e.m. en los devanados secundarios, induce también en el núcleo; inducción que produce a su vez una pequeña circulación de corrientes que actúan sobre la superficie del núcleo, lo que provoca calentamiento. La solución a este fenómeno es la utilización de láminas delgadas para la construcción de las chapas.
- Reactancia de magnetización ( $jX_m$ ): representa la pérdida por histéresis, la cual es provocada por la imantación del material magnético por el flujo invertido que sufre el núcleo.

Figura 9. **Circuito equivalente del transformador**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. p. 85.

### 1.2.3. Conexiones de transformadores trifásicos

Es el conjunto de tres transformadores monofásicos, ya sea construido como un conjunto o con cada transformador por separado. El lado primario y secundario pueden conectarse en dos formas, en delta o en estrella.

#### 1.2.3.1. Conexión estrella-estrella

Por el tipo de conexión, si las cargas conectadas son desbalanceadas, las fases estarán desbalanceadas. Esta conexión tiene la desventaja de tener armónicos en voltaje muy notables, por lo que se utiliza en pocas ocasiones. La solución que se ha dado a este problema es la incorporación de un tercer devanado con conexión delta, por el cual los armónicos circulan y se anulan entre sí.

$$\frac{V_{Línea P}}{V_{Línea S}} = \frac{V_{Fase P}}{V_{Fase S}} \quad (1-4)$$



### 1.2.3.2. Conexión estrella-delta

No tiene problemas de armónicas, sus fases son equilibradas, el voltaje secundario se retrasa 30 grados con respecto al primario. Son utilizados como transformadores reductores, estaciones transformadoras y finales de líneas.

$$\frac{V_{Línea P}}{V_{Línea S}} = \sqrt{3} \frac{V_{Fase P}}{V_{Fase S}} \quad (1-5)$$

### 1.2.3.3. Conexión delta-estrella

Esta es la conexión más utilizada en transformadores de principio de línea de transmisión. Empleados para alimentación de redes de media y baja tensión. Sus características son muy similares a la conexión estrella-delta.

$$\frac{V_{Línea P}}{V_{Línea S}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{Fase P}}{V_{Fase S}} \quad (1-6)$$

### 1.2.3.4. Conexión delta-delta

Esta conexión se usa en transformadores de poca potencia para alimentar redes de baja tensión, para cargas trifásicas mayormente. Todo esto debido a la ausencia de un neutro, a pesar de ellos se suele acostumbrar a tener una referencia de neutro a la mitad de uno de los devanados y así contar con dos niveles de tensión.

$$\frac{V_{Línea P}}{V_{Línea S}} = \frac{V_{Fase P}}{V_{Fase S}} \quad (1-7)$$

#### **1.2.4. Criterios para selección de un transformador**

Habiendo analizado los aspectos técnicos y de funcionamiento de un transformador es necesario conocer los criterios básicos para seleccionar un transformador eléctrico.

El punto de partida es la aplicación y tipo de servicio para el cual es requerido un transformador eléctrico. En este apartado los datos importantes a considerar es la potencia de demanda en kVA de la instalación, el espacio físico disponible, el tipo de acometida de alimentación y la tensión nominal. Una vez definida la aplicación, es importante realizar un análisis de cargas de la instalación para determinar el grupo de conexión adecuado del transformador.

Los elementos adicionales a tomar en consideración son los valores de impedancia típico del transformador, el contenido armónico de la carga, los niveles de ruido y los niveles de temperatura a los cuales se realizará la instalación.

### **1.3. Conductores eléctricos**

La conducción de energía eléctrica en baja tensión se realiza por medio de circuitos, que a su vez están formados esencialmente por cables soportados por canalizaciones. Debido a que su uso es muy común y necesario, se ha expuesto una diversidad de bibliografía del tema.

Los materiales conductores facilitan el flujo de electrones a través de su composición, son utilizados en la fabricación de cables eléctricos.

Los más comunes en electricidad son el cobre y el aluminio, cada uno empleado en distintas aplicaciones.

### **1.3.1. Calibre de conductores**

El calibre de un conductor eléctrico está asociado directamente a sus características conductivas. A raíz de la fabricación de cables comercialmente, a lo largo de los años diversas empresas tanto americanas como europeas han designado de varias formas a sus conductores eléctricos. La designación más utilizada en América es AWG (American Wire Gauge). Los calibres AWG se identifican por medio de números inversos a la capacidad de corriente de conducción. En otras palabras, mientras más alto es el número, menos corriente eléctrica este puede conducir.

Los conductores con designación AWG llegan hasta el calibre 4/0, por lo que para conductores de mayor calibre se utiliza lo que se conoce como los miles de circular mil (MCM). Un circular mil representa el área de una circunferencia con diámetro igual a la milésima parte de una pulgada.

El artículo 310 del NEC especifica las capacidades a distintas temperaturas para conductores con calibres AWG/MCM, al aire libre y encapsulados. Estas referencias son las más aceptadas, por lo que se tomarán como referencia para cualquier cálculo en esta investigación.

Todos los cables eléctricos están recubiertos de una capa aislante que se para la parte conductora del exterior, proveyendo de esa forma una protección al cable, así como un robustez y resistencia ante diversas condiciones ambientales.

En general, el material aislante más utilizado son los polímeros termoplásticos (identificados con una letra T) y de hule (identificados con una letra R). Las designaciones más comunes para identificar los materiales aislantes de los conductores eléctricos son:

T: aislamiento termoplástico

R: aislamiento de hule

X: aislamiento de polímero sintético

H: resistente al calor hasta 75 °C

HH: resistente al calor hasta 90 °C

W: resistente al agua y humedad

UF: para uso subterráneo

N: cubierta de nylon

LS: cable que tiene baja emisión de humos y bajo contenido de gases contaminantes

### **1.3.2. Selección de conductores**

La selección de conductores es una de las actividades más repetitivas al momento de diseñar una instalación eléctrica. De igual forma, la elección del conductor adecuado influye significativamente en la elaboración de proyectos eléctricos tanto técnica como económicamente. Por estas razones es necesario realizar la selección basada en parámetros eléctricos reales, considerando todos los factores que afecten a la conducción eléctrica del cable.

#### **1.3.2.1. Criterio de caída de tensión**

Este criterio se basa en el cálculo del área en  $mm^2$  del cobre requerido para transportar una corriente nominal a lo largo de una determinada distancia, considerando un nivel de caída de tensión permisible. Su planteamiento surge de la alimentación de una carga eléctrica: se sabe que el voltaje en una carga está dado por la ley de Ohm de la siguiente forma:

$$e = IR \quad (1-8)$$

Y sabiendo que la resistencia, se puede definir dependiendo de la resistividad de la siguiente forma:

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{L}{kA} \quad (1-9)$$

Se puede despejar el área del conductor:

$$A = \frac{2dI_N}{k e} \quad (1-10)$$

Donde:

$A$  = área del conductor

$d$  = distancia de la carga

$I_N$  = corriente nominal

$k$  = conductividad del material

$e$  = caída de tensión

Para el cálculo de cargas trifásicas, se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, lo cual concluye en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\sqrt{3} dI_N}{k e} \quad (1-11)$$

La caída de tensión es de 3 % para cargas en ramales y del 2 % del voltaje nominal para alimentadores, para un total de 5 % desde el punto de alimentación hasta la carga más alejada. Esta caída de tensión se refiere al porcentaje de voltaje permisible que puede disminuir en el punto de la carga con referencia al voltaje nominal de alimentación. Al determinar el área transversal necesaria del

cobre, se puede elegir un calibre de conductor adecuado para alimentar la carga de estudio.

### 1.3.2.2. Criterio por corriente

El criterio de selección de conductores eléctricos por corriente se basa en el consumo de corriente eléctrica de la carga de estudio para la cual se requiere seleccionar el calibre de sus conductores. Esta capacidad de corriente se ve reducida por varios factores ambientales y de instalación.

La potencia trifásica está dada por la ecuación (1-12), obteniendo así una expresión para el cálculo de la corriente nominal de una carga trifásica.

$$S = \sqrt{3} V I_N \quad (1-12)$$

Al realizar las sustituciones adecuadas, se concluye en la siguiente expresión:

$$I_T = \frac{S}{\sqrt{3} V * \text{factores de corrección}} \quad (1-13)$$

Figura 10. **Sección de conductores TW y THW en  $mm^2$**

Cal AWG ó MCM	Sección del cobre		Diam. del conduc mm	Suma de las secciones para cada cantidad de conductores				
	MCM	$mm^2$		1	2	3	4	5
14	1.107	2.08	3.43	9.2	18.5	27.7	37.0	46.2
12	6.530	3.31	3.91	12.0	24.0	36.0	48.0	60.0
10	10.38	5.26	4.52	16.1	32.1	48.1	64.2	80.2
8	16.51	8.37	6.10	29.2	58.5	87.7	116.9	146.1
6	26.50	13.30	7.82	48.0	96.1	144.1	192.1	240.1
4	41.74	21.15	9.04	64.2	128.4	192.6	256.7	321.9
2	66.37	33.63	10.57	87.8	175.5	263.3	351.0	438.7
1/0	105.5	53.48	13.44	142	284	425.6	567.5	709.3
2/0	133.1	67.43	14.61	168	335	502.9	670.6	838.2
3/0	167.8	85.05	15.90	199	397	595.7	794.2	992.8
4/0	211.6	107.2	17.37	237	474	710.9	947.9	1185
250	250	126.7	19.38	295	590	885	1180	1475
300	300	152.2	20.78	339	678	1017	1357	1696
350	350	177.6	22.07	383	765	1148	1530	1913
400	400	202.6	23.27	425	851	1276	1701	2127
500	500	253.1	25.43	508	1016	1524	2032	2540
600	600	303.7	28.22	626	1251	1876	2502	3127
750	750	379.3	30.89	749	1499	2248	2998	3747
1000	1000	506.7	34.80	951	1902	2853	3805	4756

Fuente: BRATU, Neagu Serbán; CAMPERO, Eduardo. *Instalaciones eléctricas, conceptos básicos y diseño. Cálculo y especificación de conductores eléctricos.* p. 103.

Los factores de corrección dependen de la temperatura ambiente, del número de conductores entubados del material del tubo y del tipo de servicio.

- Temperatura ambiente: el artículo 310 del NEC muestra las ampacidades de los conductores; al pie de las tablas se especifican diversos factores de corrección dependientes de la temperatura ambiente de la instalación eléctrica para la cual se están eligiendo los conductores.
- Conductores entubados: al tratarse de más de 3 conductores entubados se debe aplicar un factor de corrección, que corresponde a 0,8 si son de 4 a 6 conductores por tubo y un factor de 0,7 si son de 7 a 10 conductores por tubo.

- Material del tubo: si el material del tubo es otro distinto al acero, se debe de aplicar un factor de corrección de 0,8.
- Servicio continuo: el servicio continuo se define como una carga eléctrica conectada por más de 3 horas seguidas. De tratarse de cargas de este tipo, debe aplicarse un factor de corrección de 0,8.

Al determinar todas las condiciones ambientales y de instalación, el calibre conductor puede seleccionarse de acuerdo a la corriente resultante en la ecuación (1-13).

Siempre al realizar una selección de un conductor es de suma importancia corroborar si es crítico por caída de tensión o por su corriente de consumo, dado que en ocasiones los resultados pueden ser distintos. En ese caso, se selecciona el calibre más alto para cubrir cualquiera de los dos criterios.

### **1.3.3. Canalización y tuberías**

El cableado de una instalación eléctrica debe de ir acompañado de un sistema de canalización; la elección de esta es de suma importancia tanto para el diseño eléctrico como estructural de la instalación. En general, la tubería debe seleccionarse por medio de la suma de las áreas de los cables que estarán dentro de la tubería.

A partir de este dato, se selecciona una tubería considerando un factor de relleno considerable dependiendo de la aplicación y crecimiento a futuro. El resultado en mm es el diámetro del tubo necesario a utilizar en el arreglo del cableado eléctrico.



Figura 11. **Área de tuberías conduit a diferentes factores de relleno**

Tuberías Conduit					
Diámetro		Área en mm cuadrados			
Pulgadas	Mm	100 %	40 %	30 %	20 %
1/2	13	195	78	58,5	39
3/4	19	340	136	102,5	68
1	25	555	222	166,5	111
1 1/4	32	975	390	292,5	195
1 1/2	38	1 325	530	397,5	265
2	51	2 175	870	652,0	425
2 1/2	64	3 100	1 240	930,0	620
3	75	4 767	1 907	1 430,0	953
3 1/2	88	6 375	2 550	1 912,5	1 275
4	102	8 250	3 300	2 475,0	1 650

Fuente: BRATU, Neagu Serbán; CAMPERO, Eduardo. *Instalaciones eléctricas, conceptos básicos y diseño. Cálculo y especificación de conductores eléctricos.* p. 105.

$$A_{Arreglo} = \sum A_{individuales} \quad (1-13)$$

#### 1.4. Tableros eléctricos

Dentro de la instalación eléctrica industrial es necesario distribuir la energía de forma que cada punto de interés cuente con la alimentación adecuada para cada aplicación. Los tableros eléctricos son conjuntos de elementos de protección y otros para proveer electricidad adecuada a la instalación.

### **1.4.1. Protecciones eléctricas**

Una falla es una situación anormal en el funcionamiento de los equipos eléctricos. Las fallas más comunes son el cortocircuito y la sobrecarga. Sus consecuencias pueden ser esfuerzos térmicos, esfuerzos en el dieléctrico, así como esfuerzos electrodinámicos. Dado que este es un tema de suma importancia para esta investigación, el capítulo 3 está destinado a él.

Existen muchas formas de protección para diferentes tipos de circuitos eléctricos, en este apartado se presentan las principales protecciones utilizadas.

#### **1.4.1.1. Fusibles**

Es un dispositivo contra sobrecorriente que se funde para apertura del circuito, cuando una sobrecorriente pasa por él. Es el elemento de protección más utilizado y más común. Este está colocado en una estructura adecuada para su fijación con los aislamientos necesarios. Puede estar rodeado de aire, arena de cuarzo o algún otro material para enfriar los gases del arco eléctrico.

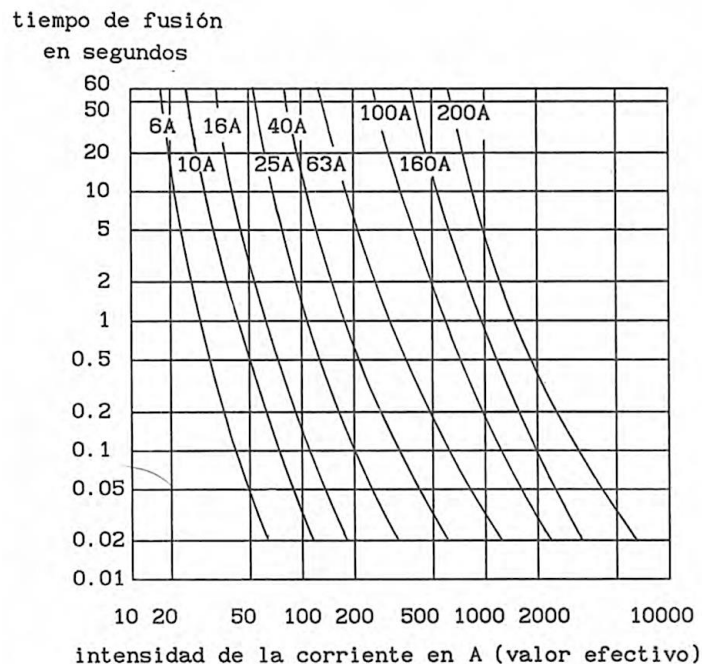
El funcionamiento del fusible es el siguiente: la energía producida en forma de calor de la corriente nominal es disipada en el medio ambiente, no afectando la integridad del material del fusible, sin embargo, cuando la corriente sobrepasa por cierto tiempo el valor de corriente nominal, la temperatura del fusible alcanza su punto de fusión y se funde abriendo así el circuito que protege.

Los fusibles son de una sola operación, pues una vez se funden estos deben ser reemplazados. Si se trata de un sistema trifásico, debe existir un fusible por cada fase: la protección es individual. Entre las mayores ventajas que esta protección ofrece se pueden mencionar las siguientes:

- Su precio es bajo en comparación con otras protecciones
- Alta confiabilidad
- Rara vez operan sin causa
- Potencia de cortocircuito superior a otras protecciones

Las curvas de tiempo-corriente determinan la operación de un fusible y detallan el tiempo que se tarda en fundirse ante cierta sobrecorriente. Estas son graficadas en escala logarítmica para su fácil comprensión, las cuales facilitan la coordinación de protecciones con otros elementos del sistema.

Figura 12. **Curva típica de operación de fusibles**



Fuente: BRATU, Neagu Serbán; CAMPERO, Eduardo. *Instalaciones eléctricas, conceptos básicos y diseño. Cálculo y especificación de conductores eléctricos*. p. 175.

### **1.4.1.2. Interruptores termomagnéticos**

Estos interruptores son comunes; se definen como aparatos de interrupción de corriente eléctrica, una vez esta sobrepase un valor determinado. Poseen la posibilidad de disparo térmico y disparo magnético.

El disparo magnético está formado por una bobina que es atravesada por la corriente del circuito, la cual actúa sobre los elementos de desconexión mediante la atracción de un núcleo del interruptor. El disparo magnético funciona si la corriente se eleva a un valor alto, protegiendo en caso de cortocircuito.

Un cortocircuito es el contacto de dos o más puntos con potenciales eléctricos distintos, en corriente alterna: entre fases, entre fase con neutro o entre fases y masas conductoras; en corriente directa entre los dos polos o entre los polos y masas conductoras. Este provoca un aumento altísimo de corriente, que en menos de un segundo puede alcanzar valores de hasta cien veces la corriente nominal.

El disparo térmico actúa si la corriente toma un valor inadecuado después de cierto tiempo, protegiendo contra sobrecargas. Una sobrecarga es un aumento de la demanda de corriente eléctrica de una máquina, la cual puede ocurrir por diversas razones. Las máquinas reducen su vida útil al sufrir sobrecargas constantes por lo que esta protección resulta indispensable para optimizar la durabilidad de los motores y evitar paros imprevistos de las máquinas imprevistas.

Comercialmente estos interruptores se dividen, según su potencia, de la siguiente forma:

- Magneto térmico: interruptores unipolares con corrientes nominales de 10 a 125 amperios y capacidad interruptiva de 10 kA. Pueden acoplarse en dos o tres polos; son utilizados generalmente en tableros eléctricos, instalaciones domiciliarias, circuitos de iluminación, como interruptor principal en tableros pequeños.
- Interruptor automático de caja moldeada: termomagnético de mayor capacidad de corriente, hasta 2 000 amperios en algunos modelos. Su capacidad de corte puede llegar hasta los 100 kA y son utilizados, mayormente, en grandes tableros industriales.

Las curvas de protección se representan por medio de gráficas corriente versus tiempo en escala logarítmica y son proporcionadas por el fabricante de cada interruptor. Estos interruptores son de los más comunes en protecciones eléctricas, por lo que este tema se trata ampliamente en el capítulo 3.

Figura 13. **Interruptor magneto-térmico para riel DIN**



Fuente: Siemens Industry Mall. *Aparatos de protección, maniobra, medida y vigilancia SENTRON*. [www.mall.industry.siemens.com](http://www.mall.industry.siemens.com). Consulta: 13 de junio de 2021.

Figura 14. **Interruptor de caja moldeada**



Fuente: Siemens Industry Mall. *Aparatos de protección, maniobra, medida y vigilancia SENTRON*. [www.mall.industry.siemens.com](http://www.mall.industry.siemens.com). Consulta: 13 de junio de 2021.

#### **1.4.1.3. Interruptor automático tipo guardamotor**

La protección eléctrica para circuitos de potencia, normalmente se realiza por medio de los dispositivos anteriormente mencionados. Cuando se trata de motores eléctricos de inducción la protección más adecuada es el interruptor automático tipo guardamotor. Los motores eléctricos presentan sobreintensidades transitorias asociadas a su arranque, por lo que los guardamotores están diseñados en sus curvas de protección para soportar dichas corrientes.

Los de tipo magnético cuentan con protección para cortocircuito, cumpliendo así la función de los fusibles con la ventaja de tener capacidad de amperaje regulable. Estos normalmente se utilizan acompañados de un contactor y una protección térmica adicional para proteger el motor contra sobre cargas.

El interruptor tipo guardamotor tipo termomagnético cuenta, de igual forma que los interruptores con protección contra cortocircuito y sobrecarga, teniendo capacidad regulable.

#### **1.4.2. Otros elementos de tableros eléctricos**

Existen diversos tipos de tableros eléctricos comercializados mundialmente, en esta sección, se detallarán los elementos principales y más comunes encontrados dentro de los ambientes industriales.

##### **1.4.2.1. Celdas y gabinetes**

Son utilizados para la contención de una forma segura de equipos eléctricos; útiles para un determinado fin.

Hay en diversos tamaños, materiales y tipos de protección; cada uno de estos es se requiere para diferentes aplicaciones.

- El tamaño: depende completamente del diseño de tablero a realizar. Por ejemplo, las dimensiones de un tablero que contendrá 8 interruptores termomagnéticos de caja moldeada con interruptor principal, de acuerdo a un diseño previamente elaborado, puede ser de 1 600 X 600 X 400 mm (alto, ancho, profundidad). De igual forma, el tamaño depende de la aplicación y espacio disponible en el lugar de montaje.
- El material: la elección del material a utilizar en un gabinete depende del destino de la instalación del mismo. En ambientes corrosivos es recomendable utilizar gabinetes de acero inoxidable. Estos también son útiles para ambientes húmedos, al igual que de plástico. El material más común para la fabricación de gabinetes eléctricos es el metal.

- La protección IP: por sus siglas en inglés *Ingress Protection*, se utiliza esta nomenclatura para asignar un nivel de sellado ante la intrusión de cuerpos extraños y humedad a equipos electrónicos. La mayoría de equipos electrónicos utilizan esta nomenclatura. La protección IP se identifica con estas siglas seguidas por dos números. El primer dígito hace referencia al nivel de protección contra cuerpos extraños (polvo), su máximo valor es el 6. El segundo dígito describe la protección contra el ingreso de agua. En ambos casos.

Las tablas II y III describen los grados de protección.

Tabla II. **Grados de protección contra cuerpos extraños indicado por el primer dígito de la nomenclatura IP**

<b>Primer dígito</b>	
0	No está protegido
1	Protegido contra cuerpos extraños de 50 mm de diámetro o mayor
2	Protegido contra cuerpos extraños de 12,5 mm de diámetro o mayor
3	Protegido contra cuerpos extraños de 2,5 mm de diámetro o mayor
4	Protegido contra cuerpos extraños de 1 mm de diámetro o mayor
5	Protegido contra polvo que pueda dañar el equipo
6	Totalmente protegido contra polvo

Fuente: *Norma IEC 60529*. Tabla 2. Edición 2001-02. p. 27.



Tabla III. **Grados de protección contra humedad indicado por el segundo dígito de la nomenclatura IP**

<b>Segundo dígito</b>	
0	No está protegido
1	Protegido contra gotas de agua que caen verticalmente
2	Protegido contra gotas de agua que caen verticalmente cuando el gabinete está inclinado hasta 15°
3	Protegido contra agua rociada
4	Protegido contra agua salpicada
5	Protegido contra chorros de agua
6	Protegido contra fuertes chorros de agua
7	Protegido contra los efectos de una momentánea inmersión en agua
8	Protegido contra los efectos de una continua inmersión en agua

Fuente: *Norma IEC 60529*. Tabla 3. Edición 2001-02. p. 29.

#### **1.4.2.2. Barras conductoras**

Las barras conductoras son de gran utilidad, con capacidad para grandes cantidades de corriente eléctrica; suelen utilizarse individualmente o agrupadas, de esta última forma para elevar la capacidad de corriente del grupo. La selección de estas barras se realiza por medio del cálculo de la corriente nominal de conducción del tablero o circuito eléctrico y enseguida compararlo con una tabla de capacidad de barras.

Los diferentes fabricantes de estas barras suelen proveer tablas de características de estas barras en las cuales se puede comprobar la capacidad de cada barra y de los arreglos de 2 o más barras de ciertas medidas. La principal ventaja de utilizar barras es la estética, así como el ordenamiento que se gana en un gabinete eléctrico; además de la alta capacidad de amperaje, que en caso

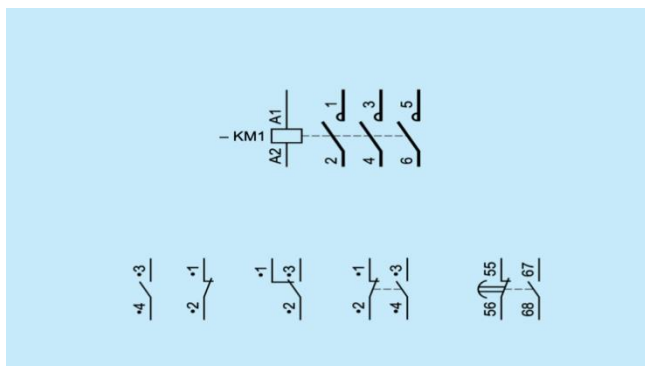
de utilizarse cables este sería un calibre muy alto, lo cual en muchas aplicaciones el espacio no es el adecuado.

### 1.4.2.3. Contactores y relés

El contactor es un aparato mecánico controlado por un electroimán, el cual al ser energizado atrae una parte móvil del electroimán que a su vez arrastra consigo la parte móvil de los polos y contactos auxiliares, proveyendo así un funcionamiento de cierre/apertura entre una parte energizada con un circuito eléctrico. Al desmagnetizar el electroimán, la parte móvil del contactor vuelve a su posición original por medio de la acción de resortes de retorno. El contactor es el principal componente de un circuito de automatización industrial pues permite controlar por medio de una señal el accionamiento de un elemento de interés.

Sus aplicaciones van desde energizar un circuito de iluminación, un arranque estrella-delta de un motor asíncrono, hasta formar parte de complejos sistemas de control.

Figura 15. **Simbología del contactor: bobina, polos y contactos**



Fuente: Telesquemario. Schneider Electric. *Manual electrotécnico. Control de potencia.* p. 26.

El relé o relay cuenta con el mismo principio de funcionamiento que un contactor, de hecho se utiliza la misma simbología con diferencia en la designación de números para los contactos. Las principales diferencias entre un relé y un contactor son:

- El relé es un dispositivo de baja potencia o de control, mientras que el contactor está diseñado para alta potencia.
- Los relés están diseñados para aplicaciones monofásicas generalmente, mientras que los contactores son trifásicos.
- El relé no está equipado con resortes de retorno ni supresión de arco eléctrico.
- La velocidad de conmutación de un relé es mucho mayor a la del contactor.

Figura 16. **Diferencias entre un contactor y un relé**



Fuente: Mechanical Engineering. *Difference Between contactor and relay*. [www.mectips.com](http://www.mectips.com).

Consulta: 13 de junio de 2021.

Las aplicaciones y tipos de relé son muy bastos, por lo que se podría desarrollar una investigación completa a estos mismos. Se mencionan algunos tipos de aplicaciones más comunes para los relés:

- Inteligente
- Temporizador (*timer*)
- De sobrecorriente
- Diferencial
- Térmico

#### **1.4.2.4. Controlador lógico programable (PLC)**

Un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) es una computadora utilizada para la automatización de procesos electromecánicos. Es un dispositivo digital, al cual se le pueden asignar funciones para controlar sus salidas eléctricas a partir de parámetros establecidos en sus entradas, ya sean analógicas o digitales.

Su utilidad radica en ser el cerebro del proceso automatizado, controla dependiendo de varias condiciones de entrada, las salidas ya sea analógicas o digitales, que a su vez permiten el funcionamiento adecuado del proceso.

Comercialmente existen muchos tipos de PLC, entre los cuales se pueden mencionar de estilo compacto, modulares, tipo de montaje en *rack*, con interfaz HMI, entre otros.

El funcionamiento de todos los PLC depende de tres importantes partes:

- Módulo de entradas: recibe la información de campo por medio de sensores, interruptores y señales para su correcto procesamiento y posterior acción del PLC.

- Unidad central de procesamiento (CPU): utiliza la información de entrada digital o analógica para variar las salidas, todo dependiendo de una programación preestablecida en el autómata.
- Módulo de salidas: genera señales analógicas o digitales que van hacia los equipos controlados.

#### **1.4.2.5. Variador de frecuencia**

Los motores eléctricos controlan gran parte de las instalaciones industriales. La maquinaria industrial cuenta con un sin fin de aplicaciones para ellos, los cuales deben de contar con características específicas de alimentación eléctrica, corriente eléctrica, frecuencia y velocidad.

Un variador de frecuencia es un equipo instalado entre la alimentación de voltaje y un motor eléctrico. Realiza la función de regular los parámetros pertinentes para el control adecuado del funcionamiento del motor.

El funcionamiento de un variador de frecuencia comienza al ingresar corriente eléctrica trifásica. Dicha corriente eléctrica es convertida por medio de puentes rectificadores a corriente directa, la cual es estabilizada en el bus de corriente continua por medio de la acción de capacitores de gran capacidad o bobinas, los cuales almacenan y filtran la corriente alterna rectificada.

Una vez estabilizada la corriente directa, se genera por medio de equipos electrónicos como tiristores y transistores una onda senoidal con valores de voltaje y frecuencia variables. Dichos parámetros se pueden manipular para obtener un funcionamiento determinado en el motor que se quiere controlar. Cuenta adicionalmente con circuitos de control para la regulación de los parámetros por medio de señales analógicas o digitales.

Es normal realizar el control de los variadores de frecuencia por medio del acoplamiento con un PLC. Las salidas necesarias del PLC se conectan a los circuitos de control del variador y así automatizar un sistema de control dependiente de los valores de entrada.

## 2. ARCO ELÉCTRICO

### 2.1. El fenómeno del arco eléctrico

Los peligros de la electricidad son ampliamente conocidos por todo el mundo y generalmente todas las personas tienen precaución para evitar el contacto con conductores eléctricos, pues de tenerlo ocasionarían un choque eléctrico que podría lastimar, dependiendo de las condiciones, gravemente a una persona o trabajador. Sin embargo, existe un peligro en el cual no es necesario estar en contacto con la electricidad para sufrir una lesión considerable.

Este es conocido como arco eléctrico (*Arc flash*); puede provocar quemaduras por la radiación emitida, alcanzando valores muy altos de temperatura y es causado, regularmente, por malas condiciones eléctricas o fallos en los aislamientos de los conductores.

Fuertes ondas de presión son liberadas que pueden alcanzar cualquier persona cercana al arco y causar serios golpes por el choque con alguna pared u otro objeto. Puede causar sordera por el sonido que este emite y su intensa luminosidad puede causar lesiones en los ojos o ceguera.

Un arco eléctrico puede alcanzar temperaturas de unas 4 veces la temperatura de la superficie del sol (de unos 20 000 °K o 35 000 °F). Esta temperatura no puede ser resistida por ningún material en la tierra, los cuales son vaporizados al instante creando gases tóxicos para el ser humano. Los gases tóxicos pueden afectar los pulmones, piel y ojos.

A lo largo de este capítulo se expondrá todo lo relacionado al arco eléctrico: origen, cálculos, precauciones, repercusiones en el ser humano y la normativa existente para el arco eléctrico.

### **2.1.1. Propiedades físicas de un arco**

Se emplea el término arco eléctrico para describir la conducción de una considerable cantidad de energía eléctrica a través del espacio ocupado por el vapor del material cercano del punto de su creación, que usualmente es un metal conductor o carbón.

Las razones más comunes por las que un arco eléctrico es creado son las siguientes:

- Malas condiciones eléctricas.
- Partículas de polvo y suciedad.
- Trabajadores que por accidente botan una herramienta cerca de un conductor eléctrico.
- Cortocircuitos accidentales.
- Fallas eléctricas.
- Errores de conexión.
- Equipos de protección obsoletos.

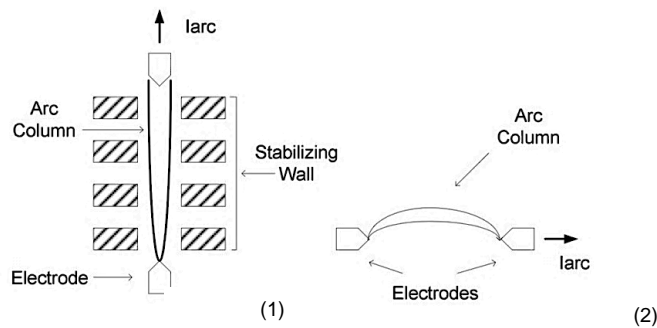
Existen muchas formas de creación para un arco eléctrico siendo las más comunes entre dos electrodos. De igual forma, existen casos en los que el arco ocurre entre varios conductores de distintas disposiciones.

Para el primer caso, los arcos eléctricos pueden ser axisimétricos o no axisimétricos.



Los arcos axisimétricos se comportan uniformemente; los no axisimétricos son inestables. La figura 17 muestra el comportamiento de los arcos axisimétricos y no axisimétricos.

Figura 17. **Clasificación de un arco entre dos electrodos**



Fuente: AMMERMAN, R. F. *Cálculo de la energía incidente y modelos de arco de c. p. 2.*

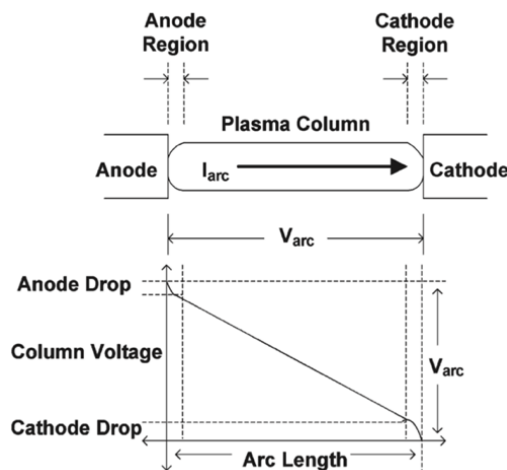
En el momento de creación de un arco eléctrico entre dos electrodos, se genera una columna de plasma. El plasma es el estado de la materia conocido más común del universo, sin embargo, en la tierra este es más escaso. Los plasmas son creados por descargas eléctricas en gases de baja presión y mientras los campos magnéticos sigan estando presentes, los electrones liberados en su ionización seguirán ganando energía, pero si la fuente de energía cesa, este se extinguirá rápidamente.

La forma de la columna de plasma, como puede notarse en la figura 17 tiende a orientarse hacia arriba creando una forma de arco matemático; por esta razón comúnmente se le conoce como arco eléctrico a este fenómeno. En el caso de arcos axisimétricos la columna de plasma toma una forma cilíndrica debido a su comportamiento uniforme.

Las regiones del suceso de un arco eléctrico se muestran en la figura 18, dividido en la región de ánodo, región de cátodo y la región de columna de plasma.

Las regiones de ánodo y cátodo son regiones de transición entre los electrodos y el plasma. Puede notarse como el gradiente de voltaje depende de la longitud del arco: disminuye conforme la longitud se incrementa.

Figura 18. **Regiones de un arco eléctrico**



Fuente: AMMERMAN, R. F. *Cálculo de la energía incidente y modelos de arco de c. p. 3.*

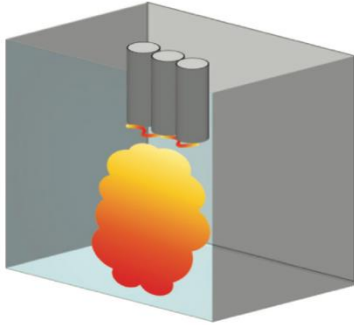
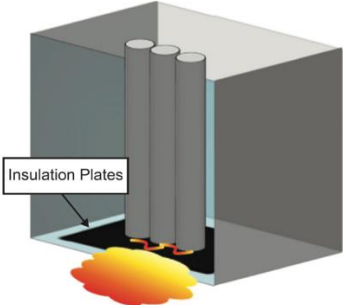
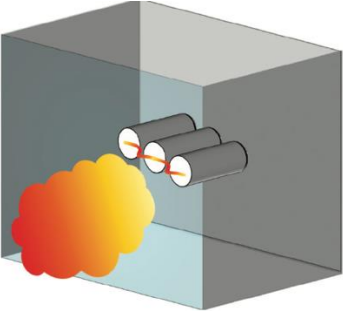
### 2.1.2. Disposiciones comunes para su creación

Los arcos no solamente pueden ocurrir entre dos electrodos, sino que también estos están presentes en los conocidos sistemas eléctricos industriales donde existen diferentes disposiciones de conductores eléctricos.

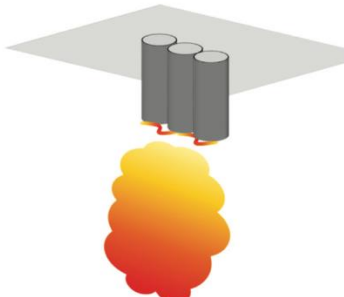
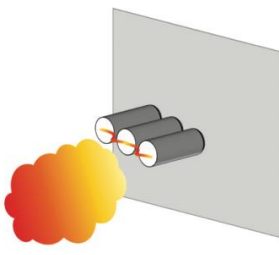
La IEEE, en su artículo IEEE Std 1584-2018 establece un método para el cálculo de parámetros de arco eléctrico de acuerdo a muchos factores.

En ella se muestran disposiciones comunes de instalaciones eléctricas donde pueden presentarse arcos eléctricos.

Tabla IV. **Configuración de electrodos comunes en un arco eléctrico**

Descripción	Disposición de electrodos
Electrodos en disposición vertical	
Electrodos en disposición vertical sobre una placa aislante	
Electrodos horizontales hacia el frente de un panel	

Continuación tabla IV.

Electrodos verticales con soporte superior	
Electrodos horizontales con soporte posterior	

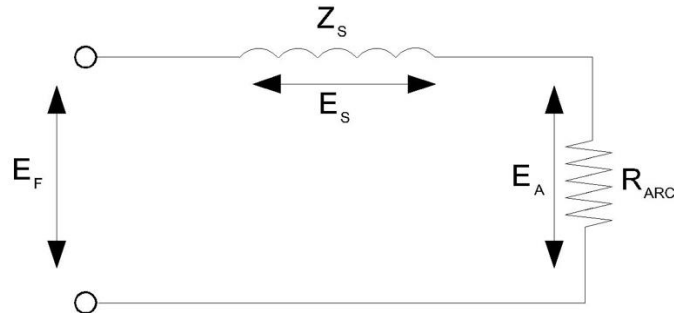
Fuente: IEEE Std. 1584-2018. *Guía para realizar los cálculos de relámpago de arco*. p. 38.

El arco eléctrico es un fenómeno caótico, difícil de describir y calcular, sobre todo cuando se presenta en sistemas trifásicos. Su comportamiento es impredecible. No obstante, muchas aproximaciones satisfactorias se han realizado para su análisis, las cuales serán presentadas posteriormente en este capítulo.

### 2.1.3. Comportamiento eléctrico de un arco

Pudo comprobarse en el apartado anterior que el gradiente de voltaje disminuye conforme la distancia del arco eléctrico aumenta. Para facilitar la comprensión de su comportamiento eléctrico se considerará el siguiente circuito eléctrico.

Figura 19. Representación de parámetros de un arco eléctrico



Fuente: LEE, Ralph H. *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*. IEEE Transactions on industry applications .pp. 246-251.

Las variables involucradas en el circuito de la figura 19 se identifican de la siguiente manera:

- $E_F$  = voltaje nominal del sistema
- $Z_S$  = impedancia total de falla
- $E_S$  = caída de voltaje de la fuente
- $E_A$  = voltaje de arco
- $R_{ARC}$  = impedancia del arco eléctrico, mayormente resistiva

Un arco eléctrico puede representarse como una caída de tensión ( $E_A$ ) la cual varía conforme a la longitud del arco. Mientras más largo sea, mayor voltaje consumirá de la fuente ( $E_F$ ) y su resistencia será mayor.

Al contrario, cuando ocurre una falla sólida ( $R_{ARC} = 0$ ), este voltaje desaparece; un arco eléctrico no se forma. Una falla sólida es definida como un cortocircuito entre dos o más partes conductores con cero impedancia en el punto de falla, por lo que se obtiene una conducción de corriente máxima. En estas fallas, no existe un arco eléctrico pues poco calor es generado en ellas.

Debe de existir una resistencia apreciable en el punto de falla como metales, carbón o elementos constructivos para que al derretirse y evaporarse un arco eléctrico sea creado.

Al situarse en esta última situación y analizando el circuito de la figura 19, se puede concluir que para una falla sólida:

$$E_F = E_{S0} \quad (2-1)$$

$$I_0 = \frac{E_{S0}}{Z_S} \quad (2-2)$$

Sin embargo, cuando no ocurre una falla sólida y un arco eléctrico es formado las variables se comportan todas dependiendo de la longitud del arco eléctrico. Según la ley de voltajes de Kirchhoff la suma de las caídas de tensión en un circuito eléctrico es igual a la fuente principal de voltaje.

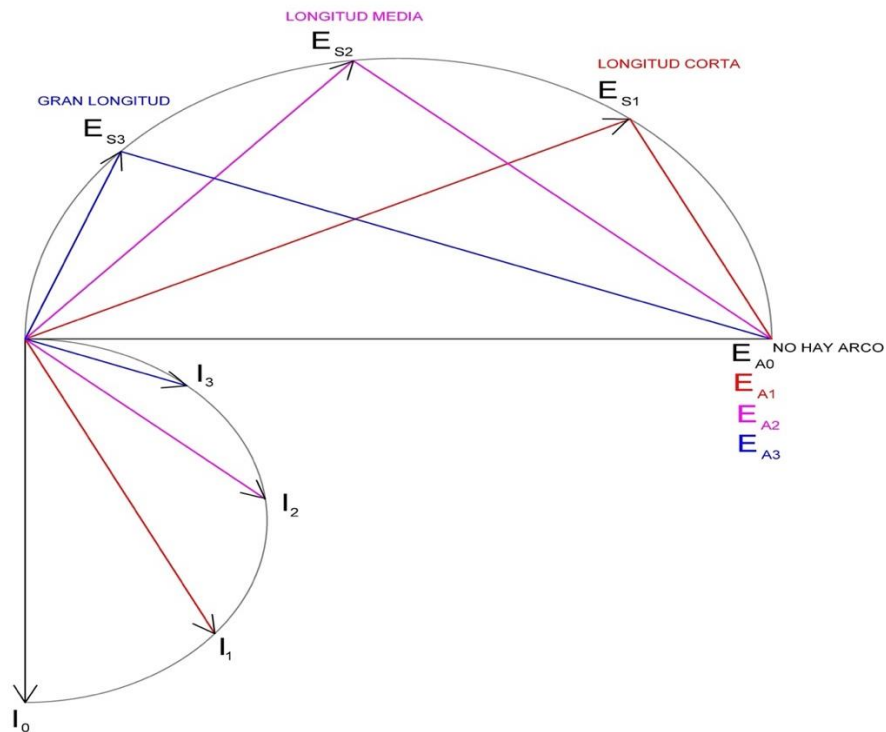
$$E_F = E_A + E_S \quad (2-3)$$

Cuando un arco eléctrico tiene una gran longitud, su voltaje  $E_A$  es muy grande, lo que hace que la caída de voltaje por la impedancia de la fuente tenga que disminuir. La forma en que el arco presenta esta disminución es decrementando la corriente eléctrica, que según la (2-2) es directamente proporcional a  $E_S$ . Por ello es que al existir un largo arco eléctrico, su corriente se estabiliza en valores cercanos. Su potencia variará de acuerdo al producto de  $E_A$  y la corriente eléctrica. Contrariamente a la discusión anterior, cuando un arco eléctrico consume una pequeña cantidad de voltaje, su corriente incrementará considerablemente, incluso incrementando su potencia a pesar de la reducción de voltaje.

Estas condiciones fueron representadas por Ralph Lee en su artículo de IEEE El otro riesgo eléctrico: quemaduras por relámpago de arco eléctrico, en un diagrama fasorial mostrado en la figura 20. Su conclusión es que existirá un arco eléctrico en la condición 2, en donde el voltaje de arco igualará a la caída de tensión de la fuente ( $E_S = E_A$ ), por lo que se creará la máxima potencia de arco eléctrico.

El voltaje de arco es un 70,7 % el voltaje del sistema y la corriente de arco es un 70,7 % la corriente de falla: ambos están en fase, formando un ángulo recto debido a que la impedancia de la fuente es inductiva y la de arco es resistiva; por lo que el arco sería un 50 % ( $0,707^2$ ) de la máxima potencia de falla sólida del sistema.

Figura 20. Diagrama vectorial de un arco eléctrico



Fuente: elaboración propia, realizado con Autocad Electrical 2022.

## **2.2. Repercusiones en el ser humano**

Una vez analizada la temperatura que un arco eléctrico puede alcanzar, se deben establecer las repercusiones reales sobre un cuerpo humano. El tema con el arco eléctrico es que puede presentarse en instalaciones eléctricas en las que el personal trabajador de una industria puede verse afectado por la cercanía a los puntos de riesgo.

### **2.2.1. Límites de temperatura del cuerpo humano**

La temperatura del cuerpo humano es de 36,5 °C, al incrementar un poco esta temperatura el cuerpo humano regula su temperatura por medio de la transpiración. Ralph Lee dice en su artículo *El otro riesgo eléctrico: quemaduras por relámpago de arco eléctrico*, que si la temperatura de la piel alcanza un valor de 44 °C, la regulación de temperatura del cuerpo humano comienza a fallar y al cabo de 6 horas se presenta un daño celular en la piel. Al ser incrementada la temperatura, el tiempo de daño celular es menor. Con base en este comportamiento, la publicación *Burns* de Artz, Moncrief y Pruitt presenta una gráfica que explica la relación entre la temperatura de la piel humana con el tiempo de exposición a la misma.

En el párrafo anterior se indican las temperaturas a las cuales se crea muerte celular de la piel, de acuerdo a cada una de los tiempos de exposición. Por ejemplo, para una temperatura de 58 °C, el tiempo de exposición para que la quemadura sea incurable es de 10 segundos. Para 70 °C, el tiempo de exposición crítico es de 1 segundo. Por ello, la piel humana sufre quemaduras incurables al estar expuesto a un arco eléctrico el cual tiene una temperatura muy mayor a 100 °C que es el límite de esta tabla. Se puede concluir que cualquier quemadura por encima de 100 °C, a al menos 0,1 segundos de exposición es incurable.



Lee concluyó en su investigación encontrando relaciones de potencia de arco eléctrico y distancias seguras para que al existir un arco eléctrico sean curables. A continuación se muestran sus ecuaciones de distancias de seguridad.

$$D_C = \sqrt{2,65 * MVA_{bf} * t} = \sqrt{53 * MVA * t} \quad (2-4)$$

$$D_F = \sqrt{1,96 * MVA_{bf} * t} = \sqrt{39 * MVA * t} \quad (2-5)$$

Donde:

$D_C$  = distancia para una quemadura curable de un arco eléctrico

$D_F$  = distancia para una quemadura fatal de un arco eléctrico

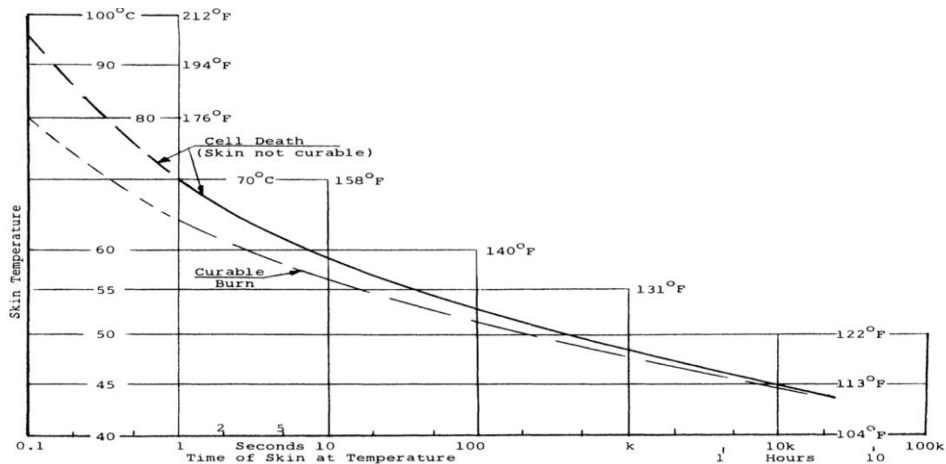
$MVA_{bf}$  = falla sólida en MVA en el punto de arco eléctrico

$MVA$  = capacidad del transformador de 0,75 MVA o mayor

(multiplicar por 1,25 para mayores capacidades)

$t$  = tiempo de exposición al arco eléctrico

Figura 21. Curva de efecto de la temperatura sobre la piel humana



Fuente: LEE, Ralph H. *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*. IEEE Transactions on industry applications. p. 246-251.

### 2.2.2. Fronteras de aproximación por arco eléctrico

Un estudio de arco eléctrico se caracteriza por la delimitación de zonas de seguridad en las áreas cercanas a los puntos de riesgo por arco eléctrico. Estas distancias están estrictamente relacionadas con el concepto de energía incidente. La energía incidente es la cantidad de energía térmica expuesta en una superficie cualquiera debido a la generación de altas temperaturas por un arco eléctrico. Es por ello que generalmente se expresa en unidades de calorías por centímetro cuadrado, sin embargo, también es común expresarlo en Joule por centímetro cuadrado.

A continuación, se definen las 3 fronteras características para seguridad eléctrica establecidas en la Norma NFPA 70E.

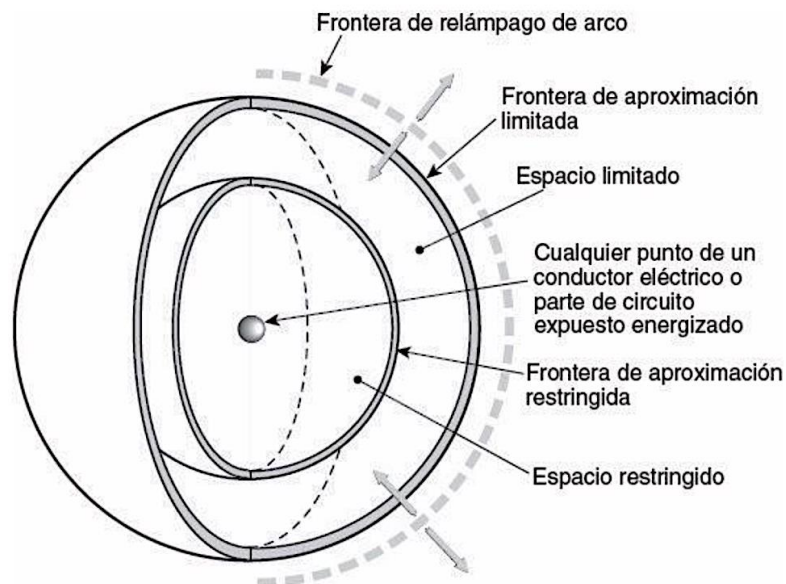
Tabla V. **Fronteras de aproximación**

Frontera	Concepto
Frontera de relámpago de arco	Límite desde la fuente de arco en el cual una quemadura de segundo grado puede ocurrir y la energía incidente es de $1,2 \text{ cal/cm}^2$
Frontera de aproximación limitada	Límite desde la fuente de arco eléctrico en el cual existe peligro de choque eléctrico
Frontera de aproximación restringida	Límite desde la fuente de arco eléctrico en el cual incrementa la probabilidad de choque eléctrico debido a un arco

Fuente: NFPA 70E. *Definiciones*. p. 14.

Estas señalizaciones se realizan físicamente cerca de los puntos de riesgo de arco eléctrico y, aunque no está normado, generalmente se utiliza el color amarillo para la frontera de aproximación limitada, el color naranja para la frontera de aproximación restringida y el color rojo para la frontera de relámpago de arco.

Figura 22. **Fronteras de aproximación por arco eléctrico**



Fuente: NFPA 70E. *Definiciones*. p. 14.

La figura 22 muestra las diferentes zonas y fronteras a partir de cualquier punto conductor eléctrico cumpliendo con seguridad eléctrica.

Como se define en la Norma NFPA 70E, una persona calificada es aquella que ha demostrado habilidades y conocimientos relacionados con la construcción de las instalaciones eléctricas, capacitado para evitar riesgos eléctricos. De la misma manera, una persona no calificada es aquella que no cumple con lo anterior.

Una persona no calificada está segura en el límite de aproximación limitada, puede pasar a la zona limitada si cuentan con el equipo de protección adecuado y esté acompañado por una persona calificada. Las personas no deben sobrepasar la frontera de relámpago de arco a menos que cuenten con ropa de protección adecuada y estén bajo estricta supervisión.

Con respecto a una persona calificada; es autorizado ingresar a todas las zonas y sobrepasar todas las fronteras cumpliendo con el equipo de protección adecuado, demostrando conocimiento acerca de los riesgos presentes, trabajando sólidamente para evitar un posible arco eléctrico.

### **2.3. Métodos de cálculo existentes para la energía incidente**

Al conocer el origen de un arco eléctrico, enmarcar las repercusiones en el ser humano y mostrar las fronteras de aproximación de seguridad; surge ahora el siguiente cuestionamiento: ¿Cómo realizar un cálculo real del arco eléctrico? La respuesta a esta interrogante no es sencilla: mucha investigación se ha realizado al respecto, diferentes aproximaciones se han desarrollado, no siendo ninguna de estas aceptadas generalmente por la comunidad científica. El objetivo de esta sección de la investigación es presentar de una manera concreta los distintos métodos desarrollados, detallando sus ventajas y limitaciones.

#### **2.3.1. Significado físico de la energía incidente**

En pocas palabras la energía incidente es aquella energía que está disponible en el punto de falla al momento de generarse un arco eléctrico. Es la energía en forma de calor ( $cal/cm^2$ ) que se transmite a todo alrededor del arco.

El calor puede transmitirse de 3 diferentes formas: conducción, radiación y convección. La conducción, en un arco eléctrico, ocurre entre el ánodo y cátodo, estando en contacto directo con el arco. Esta transmisión de calor es la responsable de que los materiales cercanos se fundan. Estos materiales pueden proyectarse hacia una persona que esté cerca del evento o provocar que la ropa se incendie, causando graves quemaduras en la piel.

La determinación experimental de la energía incidente se puede realizar por medio de un calorímetro de cobre, el cual mide la temperatura emitida por convección y radiación del arco. Cada grado Celsius de incremento es multiplicado por el factor de  $0,135\text{cal}/\text{cm}^2 * ^\circ\text{C}$ . En general, se ha adoptado que un nivel de  $1,2\text{cal}/\text{cm}^2$  es la energía incidente necesaria para provocar quemaduras de segundo grado en un ser humano; este valor es la base de selección de fronteras de aproximación, como se puede notar en la sección anterior.

### **2.3.2. Métodos de cálculo teóricos**

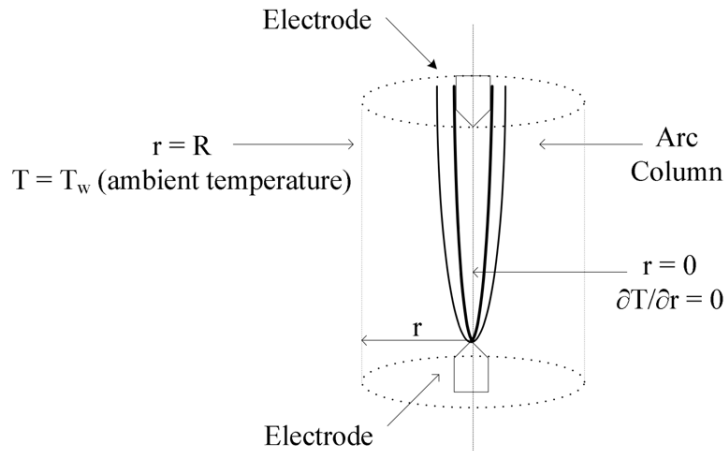
Los métodos teóricos son los menos utilizados, sin embargo, constituyen un fundamento esencial para la correcta comprensión del fenómeno.

#### **2.3.2.1. Software de Kinectrics**

Existe un software basado en planteamientos físicos para determinar varios parámetros del arco eléctrico. Kinectrics, ubicado en Toronto, Canadá, es una empresa multinacional que desarrolló un programa llamado ARCPRO, el cual basa sus cálculos en un método teórico de cálculo explicado a continuación.

Se considera un arco eléctrico unidimensional axisimétrico con un radio representado por  $r$ . Al asumir equilibrio térmico en el área del arco eléctrico, sus principales características pueden determinarse por medio de las ecuaciones de balance de energía:

Figura 23. **Método teórico-ARCPRO**



Fuente: AMMERMAN, Ravel F. *Estudio comparativo de modelado de arco y energía incidente del arco eléctrico*. p. 2.

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx \frac{\sigma E^2}{\rho C_p} - \frac{U}{\rho C_p} + \frac{1}{\rho C_p} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \eta \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2-5)$$

$$I_{arc} = E \int_0^R \sigma 2\pi r dr \quad (2-6)$$

$$V_{arc} = E(L) + V_{electrodo} \quad (2-7)$$

$$H_T = \int P_{arc} dt = \int P_R dt + H_C \quad (2-8)$$

Donde:

$E$  = campo eléctrico en el arco (V/m)

$L$  = longitud del arco eléctrico (m)

$V_{arc}$  = voltaje del arco eléctrico (V)

$V_{electrodo}$  = caída de tensión del arco (electrodo) (V)

$r$  = distancia radial del arco (m)

$\sigma$  = conductividad eléctrica del gas (S/m)

$I_{arc}$  = corriente eléctrica del arco eléctrico (A)

$t$  = tiempo (s)

$T$  = temperatura (°K)

$\rho$  = densidad del gas ( $kg/m^3$ )

$C_p$  = temperatura específica del gas a presión constante ( $J/K * kg$ )

$U$  = radiación neta transmitida de arco eléctrico ( $W/m^3$ )

$\eta$  = conductividad térmica del gas (W/m-K)

$H_T$  = calorías totales disipadas por el arco eléctrico

$H_R$  = calorías generadas por radiación

$H_C$  = calorías generadas por conducción

$P_R$  = potencia de radiación

La resolución de las ecuaciones se realiza por medio del *software* ARCPRO, diseñado para las siguientes condiciones:

- Corrientes de arco eléctrico entre 3,5 a 21,5 kA
- Distancia entre electrodos entre 1 a 12 pulgadas
- Duración del arco entre 4 y 30 ciclos
- Tamaño del arco entre 8 a 42 pulgadas
- Arcos monofásicos dentro de una caja
- Arcos provocados por fallas trifásicas

Sin embargo, este método no toma en cuenta el calor conducido a los electrodos, la vaporización de los materiales cercanos al arco eléctrico ni la formación de ondas de presión.

### 2.3.2.2. Método de Ralph Lee

Ralph Lee fue uno de los pioneros en la investigación del arco eléctrico y sus contribuciones son consideradas la base de lo que se sabe del arco eléctrico. Sus estudios se resumen en las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para corriente de falla y potencia de arco:

$$I_{SC} = \left( \frac{MVA_{base} \times 10^6}{1,732 \times V} \times \frac{100}{\%Z} \right) \quad (2-9)$$

$$P_{arc} = 1,732 V I_{SC} \times 10^{-6} \times 0,707^2 \quad (2-10)$$

$P_{arc}$  = potencia máxima en un arco trifásico (MW)

$I_{SC}$  = corriente trifásica de cortocircuito de un transformador(A)

$MVA_{base}$  = potencia del transformador (MVA)

$V$  = voltaje (V)

$\%Z$  = impedancia del transformador p.u.

Ecuación para distancia de frontera de relámpago de arco:

$$D_C = \sqrt{2,65 \times MVA_{bf} \times t} \quad (2-11)$$



$$D_C = \sqrt{53 \times MVA \times t} \quad (2-12)$$

Donde:

$D_C$  = frontera de relámpago de arco (pies)

$MVA_{bf}$  = potencia de falla sólida en el punto de arco eléctrico (MVA)

$MVA$  = potencia del transformador (MVA), potencias mayores a 0,75 MVA, para potencias menores a 0,75 MVA multiplicar 1,25

$t$  = tiempo de exposición (s)

Ecuación para energía incidente:

$$E = \frac{5,12 \times 10^5 \times V \times I_{bf} \times t}{D^2} \quad (2-13)$$

$E$  = energía incidente ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )

$I_{bf}$  = corriente de falla sólida (kA)

$t$  = tiempo de arco (s)

$D$  = distancia de un posible arco a una persona (mm)

Ralph Lee basó su estudio en el teorema de máxima transferencia de potencia, recalando que el mayor riesgo en un arco eléctrico es la energía incidente que este provoca, que se traduce en el calor asociado a un arco. Estas ecuaciones han sido discutidas ampliamente, destacando que son útiles para arcos al aire libre que al superar los 600 V sus resultados son conservadores.

### **2.3.3. Métodos de cálculo estadísticos**

Los cálculos teóricos suelen ser complejos, conllevan gran cálculo y muchos métodos numéricos para la solución de sus ecuaciones. Por ello, se han realizado modelos estadísticos que describen acertadamente el fenómeno del arco eléctrico. Además, tomando en cuenta que el estudio del arco eléctrico conlleva un sinnúmero de variables es difícil establecer cálculos exactos, dado que en cada caso el arco eléctrico puede cambiar por alguno de los factores a continuación mencionados:

- Condiciones eléctricas del sistema
- Dispositivos de protección y su coordinación
- Resistencia de puesta a tierra
- Potenciales longitudes de arco
- Tipo y tamaño de gabinetes eléctricos
- Comportamiento impredecible del arco
- Condiciones ambientales
- Disipación de energía

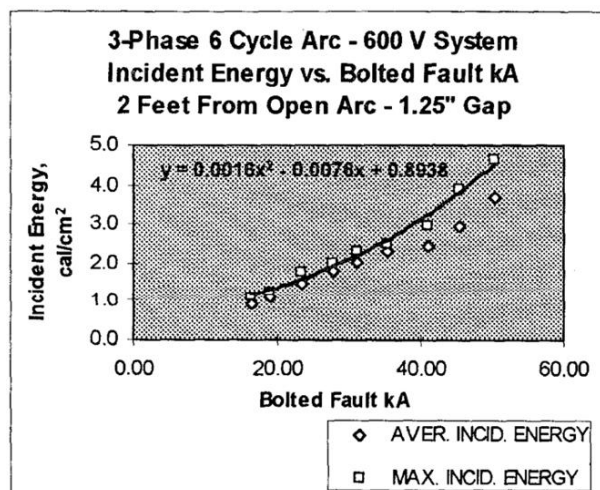
La Norma NFPA 70E y la IEEE 1584 presentan métodos estadísticos para el cálculo del arco eléctrico, comprobados en diversas pruebas y simulaciones.

Estos métodos son los mayormente aceptados, considerando muchos comportamientos posibles que un arco eléctrico podría tomar.

### 2.3.3.1. NFPA 70E-2018

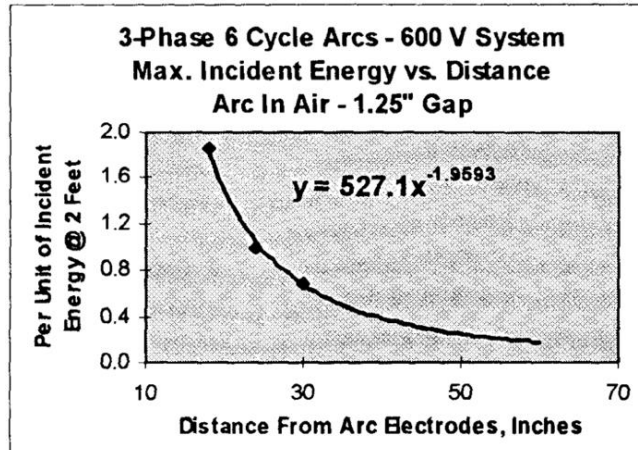
El método de cálculo para energía incidente y distancias de relámpago de arco adoptado por la Norma NFPA 70E-2018 se basa en el artículo publicado por Richard L. Doughty en IEEE llamado *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600V power distribution systems*. En este artículo, Doughty lleva a cabo un análisis estadístico para arcos eléctricos trifásicos, de 6 ciclos de duración, con una separación entre electrodos de 1,25 pulgadas, al aire libre, en un sistema de 600V. Sus resultados experimentales son asombrosos, siendo las siguientes gráficas los resultados utilizados para modelar el arco eléctrico.

Figura 24. **Energía incidente versus corriente de falla sólida: arco eléctrico trifásico, de 6 ciclos de duración**



Fuente: DOUGHTY, Richard L.; NEAL, Thomas E.; FLOYD, H. Landis. *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600V power distribution systems*. Ensayo de IEEE No. PCIC-98-36. p. 332.

Figura 25. **Máxima energía incidente versus distancia de los electrodos de arco eléctrico**



Fuente: DOUGHTY, Richard L.; NEAL, Thomas E.; FLOYD, H. Landis. *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600V power distribution systems. Ensayo de IEEE No. PCIC-98-36. p. 333.*

Con base en estos resultados, Doughty establece la relación para calcular la máxima energía incidente de un arco trifásico al aire libre. De igual forma, realizó un estudio estadístico para un arco dentro de una caja, determinando una relación para calcular la máxima energía incidente de un arco trifásico dentro de una caja.

Energía incidente máxima al aire libre:

$$E_{MA} = 5\,271 \times D_A^{-1.9593} \times t_A (0,0016I_{bf}^2 - 0,0076I_{bf} + 0,8938) \quad (2-14)$$

Energía incidente máxima en una caja cúbica de 20 pulgadas:

$$E_{MB} = 1038,7 \times D_B^{-1.4738} \times t_A (0,0093I_{bf}^2 - 0,3453I_{bf} + 5,9675) \quad (2-15)$$

Distancia de relámpago de arco al aire libre:

$$D_A = \left[ \left( \frac{t_A}{E_{MA}} \right) \times (8,434 I_{bf}^2 - 40,06 I_{bf} + 4\,711) \right]^{0,5104} \quad (2-16)$$

Distancia de relámpago de arco en una caja cúbica de 20 pulgadas:

$$D_B = \left[ \left( \frac{t_A}{E_{MB}} \right) \times (9,66 I_{bf}^2 - 358,7 I_{bf} + 6\,198) \right]^{0,6785} \quad (2-17)$$

Donde:

$E_{MA}$  = máxima energía incidente al aire libre ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )

$E_{MB}$  = máxima energía incidente en una caja cúbica de 20 pulgadas ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ )

$D_A, D_B$  = distancias del electrodo de arco eléctrico, para distancias mayores de 18 pulgadas (pulgadas)

$t_A$  = duración del arco eléctrico (s)

$I_{bf}$  = corriente de falla sólida (kA)

Entre las mayores ventajas de este método destaca el hecho que sus modelos son válidos para sistemas de 600 V y menores, lo que cubre gran parte de los voltajes manejados en la industria de baja tensión, sin embargo, cabe destacar que solamente se utilizan para corrientes de falla entre 16 k A a 50 kA por lo que si se realiza un extrapolación para mayores corriente de falla es posible que la desviación con respecto al valor real sea muy grande.

### 2.3.3.2. IEEE 1584-2018

La Norma IEEE 1584-2018 cuenta con una guía detallada de cálculos de arco eléctrico para distintos niveles de voltaje. Es la guía que toma en cuenta más factores para un cálculo adecuado. Sus ecuaciones han sido basadas en registros de experimentación y análisis exhaustivo. A continuación, se presenta el procedimiento planteado para los cálculos para sistemas menores a 600V; para sistemas mayores a este voltaje se recomienda al lector referenciarse directamente a la norma.

El procedimiento de cálculo inicia con la resolución de la siguiente ecuación:

$$I_{Arc_{600}} = 10^{(k1+k2 \lg I_{bf} + k3 \lg G)} (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf} + k10) \quad (2-18)$$

Donde:

$I_{arc_{600}}$  = corriente de arco RMS a 600 V (kA)

$I_{bf}$  = corriente de falla sólida (kA)

$G$  = distancia entre electrodos (mm)

$k1$  a  $k10$  = constantes de cálculo de acuerdo a la tabla VI

Tabla VI. Constantes de cálculo para la corriente de arco eléctrico, según el método de IEEE 1584-2018

E.C. / $V_{oc}$	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$	$k7$	$k8$	$k9$	$k10$	
VCB	600 V	-0.04287	1.035	-0.083	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	0.0065	1.001	-0.024	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005795	1.015	-0.011	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
VCBB	600 V	-0.017432	0.98	-0.05	0	0	-5.767E-09	2.524E-06	-0.00034	0.01187	1.013
	2 700 V	0.002823	0.995	-0.0125	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825
	14 300 V	0.014827	1.01	-0.01	0	-9.204E-11	2.901E-08	-3.262E-06	0.0001569	-0.004003	0.9825
HCB	600 V	0.054922	0.988	-0.11	0	0	-5.382E-09	2.316E-06	-0.000302	0.0091	0.9725
	2 700 V	0.001011	1.003	-0.0249	0	0	4.859E-10	-1.814E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9881
	14 300 V	0.008693	0.999	-0.02	0	-5.043E-11	2.233E-08	-3.046E-06	0.000116	-0.001145	0.9839
VOA	600 V	0.043785	1.04	-0.18	0	0	-4.783E-09	1.962E-06	-0.000229	0.003141	1.092
	2 700 V	-0.02395	1.006	-0.0188	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
	14 300 V	0.005371	1.0102	-0.029	-1.557E-12	4.556E-10	-4.186E-08	8.346E-07	5.482E-05	-0.003191	0.9729
HOA	600 V	0.111147	1.008	-0.24	0	0	-3.895E-09	1.641E-06	-0.000197	0.002615	1.1
	2 700 V	0.000435	1.006	-0.038	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981
	14 300 V	0.000904	0.999	-0.02	0	0	7.859E-10	-1.914E-07	-9.128E-06	-0.0007	0.9981

Fuente: IEEE Industry Applications Society. *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. Std 1584-2018. Coefficients for Equation. p. 23.*

Al resolver la ecuación (2-18) se procede a resolver la siguiente ecuación de corriente de arco eléctrico:

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{V_{oc}}\right]^2 \times \left[ \frac{1}{I_{arc\_600}^2} - \left( \frac{0,6^2 - V_{oc}^2}{0,6^2 \times I_{bf}^2} \right) \right]}} \quad (2-19)$$

Donde:

$I_{arc\_600}$  = corriente de arco RMS a 600V (kA)

$I_{bf}$  = corriente de falla sólida (kA)

$V_{oc}$  = voltaje de operación (kV)

$I_{arc}$  = corriente de arco eléctrico (kA)

Es importante destacar que con esta corriente de arco eléctrico debe determinarse el tiempo en el que el dispositivo de protección actuará sobre esta falla, que es, el tiempo que durará el arco eléctrico.

Por medio de las características de disparo del dispositivo de protección se interseca su curva de protección y el valor de la corriente de arco.

Una vez obtenido este valor, puede calcularse el valor de la energía incidente que el arco eléctrico generará por medio de las siguientes 2 ecuaciones.

$$E_{\leq 600} = \frac{12,522}{50} T \times 10^b \quad (2-20)$$

$$b = k1 + k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc_{600}}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + \dots + k11 \lg I_{bf} + k12 \lg D + k13 \lg I_{arc} + \lg \frac{1}{CF} \quad (2-21)$$

Donde;

$I_{arc_{600}}$  = corriente de arco RMS a 600V (kA)

$I_{bf}$  = corriente de falla sólida (kA)

$G$  = distancia entre electrodos (mm)

$I_{arc}$  = corriente de arco eléctrico (kA)

$D$  = distancia del arco hacia un punto de trabajo (mm)

$k1$  a  $k10$  = constantes de cálculo de acuerdo a la tabla VIII

$CF$  = factor de corrección por dimensiones del gabinete (ecuación 2-24)

$T$  = duración del arco eléctrico (s)



Tabla VII. **Constantes de cálculo para energía incidente y distancia de relámpago de arco**

600 V	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7
<b>VCB</b>	0.753364	0.566	1.752636	0	0	-4.783E-09	0.000001962
<b>VCBB</b>	3.068459	0.26	-0.098107	0	0	-5.767E-09	0.000002524
<b>HCB</b>	4.073745	0.344	-0.370259	0	0	-5.382E-09	0.000002316
<b>VOA</b>	0.679294	0.746	1.222636	0	0	-4.783E-09	0.000001962
<b>HOA</b>	3.470417	0.465	-0.261863	0	0	-3.895E-09	0.000001641

k8	k9	k10	k11	k12	k13
-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.957
-0.00034	0.01187	1.013	-0.06	-1.809	1.19
-0.000302	0.0091	0.9725	0	-2.03	1.036
-0.000229	0.003141	1.092	0	-1.598	0.997
-0.000197	0.002615	1.1	0	-1.99	1.04

Fuente: IEEE Industry Applications Society. *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. Std 1584-2018. 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997 USA.*  
Coefficients for Equation. p. 26.

Al conocer la corriente de arco y la energía incidente, es necesario conocer la distancia de relámpago de arco, aquella donde una quemadura de segundo grado puede existir.

$$ABF_{\leq 600} = 10^{\frac{c}{-k12}} \quad (2-22)$$

$$c = k1 + k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc600}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + \dots + k11 \lg I_{bf} + k13 \lg I_{arc} + \lg \frac{1}{CF} - \lg \frac{20}{T} \quad (2-23)$$

Donde:

$ABF_{\leq 600}$  = distancia de relámpago de arco (mm)

$I_{arc,600}$  = corriente de arco RMS a 600 V (kA)

$I_{bf}$  = corriente de falla sólida (kA)

$G$  = distancia entre electrodos (mm)

$I_{arc}$  = corriente de arco eléctrico (kA)

$D$  = distancia del arco hacia un punto de trabajo (mm)

$k1$  a  $k10$  = constantes de cálculo de acuerdo a la tabla VIII

$CF$  = ractor de corrección por dimensiones del gabinete

$T$  = duración del arco eléctrico (s)

## **2.4. Equipo de protección personal resistente al arco eléctrico**

La normativa más utilizada con respecto a la seguridad eléctrica es la NFPA 70E, dando muchas recomendaciones y lineamientos a cumplir para un buen programa de seguridad. Se puede definir como el procedimiento para el buen manejo de los peligros de la electricidad. Un peligro inminente, como es tema de este trabajo de investigación, es el arco eléctrico.

### **2.4.1. Niveles de protección**

Para dividir el nivel de riesgo de arco eléctrico, se suele clasificar de acuerdo a la energía incidente producida por el arco. De acuerdo a la norma NFPA 70E-2018, existen 4 niveles de protección siendo el primero el menos riesgoso y el último el más riesgoso. De acuerdo a cada nivel, el equipo de protección personal se hace más robusto. A continuación, se muestra una tabla comparativa de cada uno de los niveles de protección.

Cuando una persona autorizada sobrepasa la frontera de relámpago de arco debe de cumplir con ciertos requisitos de vestimenta como una forma de precaución ante arco eléctrico. Como se definió en la tabla VIII, cada nivel de riesgo conlleva un valor de energía incidente de arco eléctrico.

De acuerdo a esa energía incidente se puede definir una recomendación de vestimenta y de equipo de protección para cada nivel.

Tabla VIII. **Categorías de EPP para arco eléctrico**

Categoría de EPP	Energía incidente
1	$E \leq 4 \text{ cal/cm}^2$
2	$4 \text{ cal/cm}^2 < E < 8 \text{ cal/cm}^2$
3	$8 \text{ cal/cm}^2 < E < 25 \text{ cal/cm}^2$
4	$25 \text{ cal/cm}^2 < E < 40 \text{ cal/cm}^2$

Fuente: NFPA 70E, Tabla 130.7(C)(15)(c). *Equipo de protección personal (EPP)*. p. 41

#### 2.4.1.1. Nivel 1

Con una energía incidente asociada máxima de  $4 \text{ cal/cm}^2$  el nivel 1 de protección es el nivel más bajo y por lo tanto el requerimiento de protección personal es menos riguroso que los otros niveles. Los requerimientos son:

- Camisa de manga larga y pantalones resistente al arco de  $4 \text{ cal/cm}^2$ .
- Protector facial resistente al arco o capucha del traje de protección resistente al arco de  $4 \text{ cal/cm}^2$ .
- Chaqueta con valor de resistencia al arco de  $4 \text{ cal/cm}^2$ .
- Casco, tapones de oído, lentes de seguridad, guantes de cuero para uso industrial y calzado de trabajo de cuero.

### 2.4.1.2. Nivel 2

El nivel 2 comprende energía incidente entre  $4 \text{ cal/cm}^2$  y  $8 \text{ cal/cm}^2$ , sus requerimientos de protección son:

- Camisa de manga larga y pantalones resistente al arco u overol resistente al arco de  $8 \text{ cal/cm}^2$ .
- Capucha del traje de protección contra relámpago de arco, resistente al arco o protector facial resistente al arco de  $8 \text{ cal/cm}^2$
- Chaqueta con valor de resistencia al arco de  $8 \text{ cal/cm}^2$ .
- Casco, tapones de oído, lentes de seguridad, guantes de cuero para uso industrial y calzado de trabajo de cuero.

### 2.4.1.3. Nivel 3

El nivel 3 comprende energía incidente entre  $8 \text{ cal/cm}^2$  y  $25 \text{ cal/cm}^2$ , sus requerimientos de protección son:

- Camisa de manga larga resistente al arco de un valor de  $25 \text{ cal/cm}^2$ .
- Pantalones resistentes al arco de  $25 \text{ cal/cm}^2$ .
- Traje resistente al arco de  $25 \text{ cal/cm}^2$ .

- Chaqueta de traje de protección resistente al arco de  $25 \text{ cal/cm}^2$ .
- Pantalones del traje de protección con un valor de resistencia al arco de  $25 \text{ cal/cm}^2$ .
- Capucha del traje de protección resistente al arco eléctrico con un valor de  $25 \text{ cal/cm}^2$ .
- Guantes resistentes al arco  $25 \text{ cal/cm}^2$ .
- Chaqueta con valor de resistencia al arco de  $25 \text{ cal/cm}^2$ .
- Casco, tapones de oído, lentes de seguridad, guantes de cuero para uso industrial y calzado de trabajo de cuero.

#### 2.4.1.4. Nivel 4

El nivel 4 comprende energía incidente entre  $25 \text{ cal/cm}^2$  y  $40 \text{ cal/cm}^2$ , sus requerimientos de protección son:

- Camisa manga larga resistente al arco de  $40 \text{ cal/cm}^2$ .
- Pantalones resistentes al arco de  $40 \text{ cal/cm}^2$ .
- Traje resistente al arco de  $40 \text{ cal/cm}^2$ .

- Chaqueta de traje de protección resistente al arco de  $40 \text{ cal/cm}^2$ .
- Pantalones del traje de protección con un valor de resistencia al arco de  $40 \text{ cal/cm}^2$ .
- Capucha del traje de protección resistente al arco eléctrico con un valor de  $40 \text{ cal/cm}^2$ .
- Guantes resistentes al arco  $40 \text{ cal/cm}^2$ .
- Casco, tapones de oído, lentes de seguridad, guantes de cuero para uso industrial y calzado de trabajo de cuero.

Muchos fabricantes fabrican vestimentas para valores mayores a los  $40 \text{ cal/cm}^2$ ; sin embargo, no existe una categoría para estos valores de energía incidente. En estos casos, no se recomienda sobrepasar la frontera de relámpago de arco con el equipo energizado, pues el riesgo de accidentes graves es muy alto.

#### **2.4.2. Normatividad de telas resistente al arco eléctrico**

La fabricación de telas y prendas de vestir resistentes al arco es un tema muy amplio. Existen un sin fin pruebas a realizar a dichas prendas. De acuerdo a la norma NFPA 70E, las prendas de vestir resistentes al arco deben de cumplir con la Norma ASTM F1506. Además, se expondrán otras normas pertinentes para explicar el proceso que una prenda lleva para certificarse como resistente al arco eléctrico a cierto valor de energía incidente.

### **2.4.2.1. Norma ASTM F1506**

La Norma ASTM F1506 de la Asociación Estadounidense para Pruebas y Materiales que detalla las especificaciones requeridas para resistencia de flama en materiales textiles para la fabricación de vestimenta para trabajadores expuestos a arco eléctrico y otros peligros térmicos.

Especifica varios parámetros que debe de cumplir una tela resistente al arco, como firmeza del color, flamabilidad inicial, flamabilidad después de 25 lavadas y resultados de arco eléctrico. Todas las telas utilizadas para fabricar prendas de vestir resistentes al arco eléctrico deben de cumplir con los parámetros de esta norma, la cual a su vez cita otras normas en las que se detalla los procedimientos de prueba para la tela.

Existen parámetros textiles, como resistencia, color, sombra, entre otros, los cuales no son objeto de esta investigación. Sin embargo, las pruebas de arco y la flamabilidad son de crucial importancia para determinar si una tela es resistente o no al arco eléctrico.

En la figura 26, se pueden notar muchos parámetros para la tela, pero destaca la flamabilidad inicial, la cual indica que la longitud de la carbonización en la tela provocada por una flama puede ser como máximo de 152 mm.

De igual forma, luego de aplicarse una flama, el máximo tiempo que puede existir dicha flama después de ser expuesto es de 2 segundos.

Figura 26. Especificaciones de la Norma ASTM F1506

Characteristic:	Fabric Weight Ranges, oz/yd <sup>2</sup>			Section Reference
	3.0–5.9	6.0–8.4	8.5 and higher	
Breaking load, min, N (lbf)	134 (30)	179 (40)	223 (50)	7.1
Tear resistance, min, N (lbf)	11 (2.5)	18 (4.0)	22 (5.0)	7.2
Seam slippage, max	6 mm at 134 N (0.25 in. at 30 lbf)	6 mm at 179 N (0.25 in. at 40 lbf)	6 mm at 223 N (0.25 in. at 50 lbf)	7.3
<i>Colorfastness:</i>				
Laundering shade change, min	Class 3	Class 3	Class 3	7.4.1
Dry-cleaning shade change, min	Class 3	Class 3	Class 3	7.4.2
Dimensional change, max	3.0 %	3.0 %	3.0 %	7.5
<i>Initial Flammability: <sup>A,B</sup></i>				
Char length, max, mm (in.)	152 (6.0)	152 (6.0)	152 (6.0)	7.6
Afterflame, max, s	2	2	2	7.6
<i>Flammability After 25 Washes/Dry Cleaning:</i>				
Char length, max, mm (in.)	152 (6.0)	152 (6.0)	152 (6.0)	7.6
Afterflame, max, s	2	2	2	7.6
<i>Arc Test Results:</i>				
Afterflame time, max, s (for single layer arc test specimens)	5	5	5	7.8.1
Reported Values Arc Rating, <sup>C</sup> cal/cm <sup>2</sup>		Report measured values <sup>C</sup>		7.8

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. Standard Performance Specification for Flame Resistant and Electric Arc Rated Protective Clothing Worn by Workers Exposed to Flames and Electric Arcs (ASTM F1506-20a). West Conshohocken, PA, 2020. p. 3.

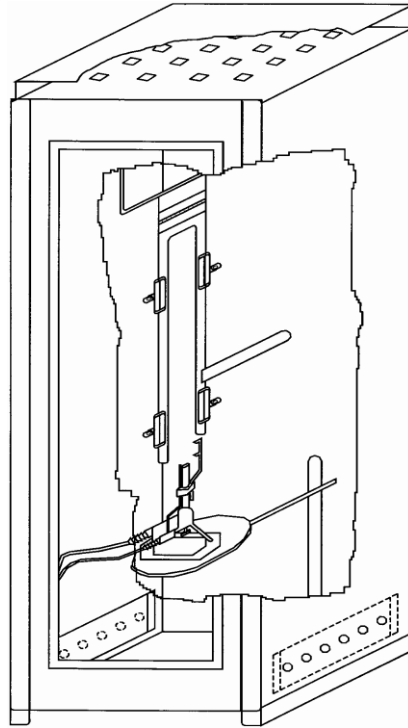
### 2.4.2.2. Norma ASTM D6413

La Norma ASTM D6413 detalla el método de prueba para flamabilidad en textiles. Las telas utilizadas resistentes al arco deben de someterse a una prueba controlada, con el fin de determinar la respuesta de los textiles a una fuente de ignición estándar, derivando los valores de medición para el tiempo de post llama, el tiempo de post incandescencia y la longitud de la carbonización.

La prueba consiste en colocar la tela verticalmente con un mechero en la parte de abajo a la tela. El mechero debe de estar entre 1,2 a 1,5 calorías por centímetro cuadrado por segundo; la exposición durará 12 segundos; al retirar el mechero los parámetros de reacción deben de cumplir con la ASTM 1506. La flama post llama no debe durar más de 2 segundos y la carbonización no debe ser mayor a 152 mm. Es muy importante hacer notar que la prenda no debe de gotear ni fundirse de ninguna forma.



Figura 27. **Aparato de prueba para flamabilidad en textiles**



Fuente: ASTM D6413 / D6413M-15, *Standard Test Method for Flame Resistance of Textiles (Vertical Test)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. [www.astm.org](http://www.astm.org). Consulta: 5 de diciembre de 2021.

La tela es colocada en la parte superior del aparato de prueba mostrado en la figura 27, suministrando la llama adecuada en la parte inferior de la tela. Este método es utilizado por los fabricantes de prendas de vestir resistentes al arco, para asegurar que sus telas son adecuadas para soportar altos niveles de temperatura, como los que el arco eléctrico conlleva.

#### **2.4.2.3. Norma ASTM F1959**

La segunda prueba indispensable para las telas contra arco eléctrico es la determinación del nivel de energía incidente que dicha tela resiste.

Esto le dará a la tela la clasificación de riesgo para el cual está capacitada a resistir. La Norma ASTM F1959 es un método de prueba estándar para determinar el rendimiento térmico del arco para materiales resistentes al arco. Su utilización es de suma importancia para determinar el valor de ATPV (valor de rendimiento térmico del arco) el cual describe la energía incidente en un material a la cual existe un 50 % de probabilidad que una persona expuesta a ella sufra una quemadura de segundo grado. De igual forma este método evalúa el EBT (rotura de energía umbral) que es el valor de energía incidente a la cual existe un 50 % de probabilidad de rotura del material. Una rotura se define como cualquier área abierta de al menos de  $1,6 \text{ cm}^2$ .

La prueba consiste en crear un arco eléctrico controlado para medir la energía incidente en la prenda. El arco se crea con 8 000 amperios a una distancia de 12 pulgadas de la prenda, se realizan 7 arcos a distintas intensidades. La manera de variar la intensidad no es con la corriente sino con la frecuencia.

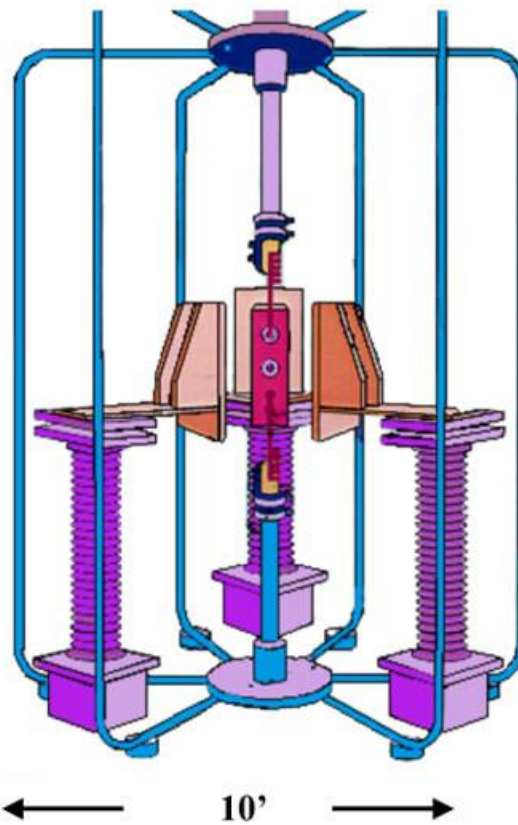
Con esta variación se obtiene la medición de energía incidente por medio de dos calorímetros ubicados en la configuración de la prueba. Cabe destacar que estas pruebas son realizadas por laboratorios de alta tecnología y certificados para realizarlas.

Una vez obtenida la energía incidente de cada medición, una gráfica de probabilidad de quemadura de segundo grado es generada: en cada variación de intensidad de arco eléctrico, una energía incidente conocida (mediante los calorímetros) tuvo una probabilidad del 100 % o del 0 % de quemadura de segundo grado.

Cuando existe un 100 % de probabilidad de quemadura de segundo grado es cuando el textil no soportó el arco eléctrico, creando una rotura (superando el EBT). Utilizando estas mediciones se determina aquel valor de energía incidente en el cual existe un 50 % de probabilidad de que exista una rotura. Dicho valor es la energía incidente para el cual el textil es resistente.

Figura 28. **Aparato de prueba para resistencia de arco eléctrico**

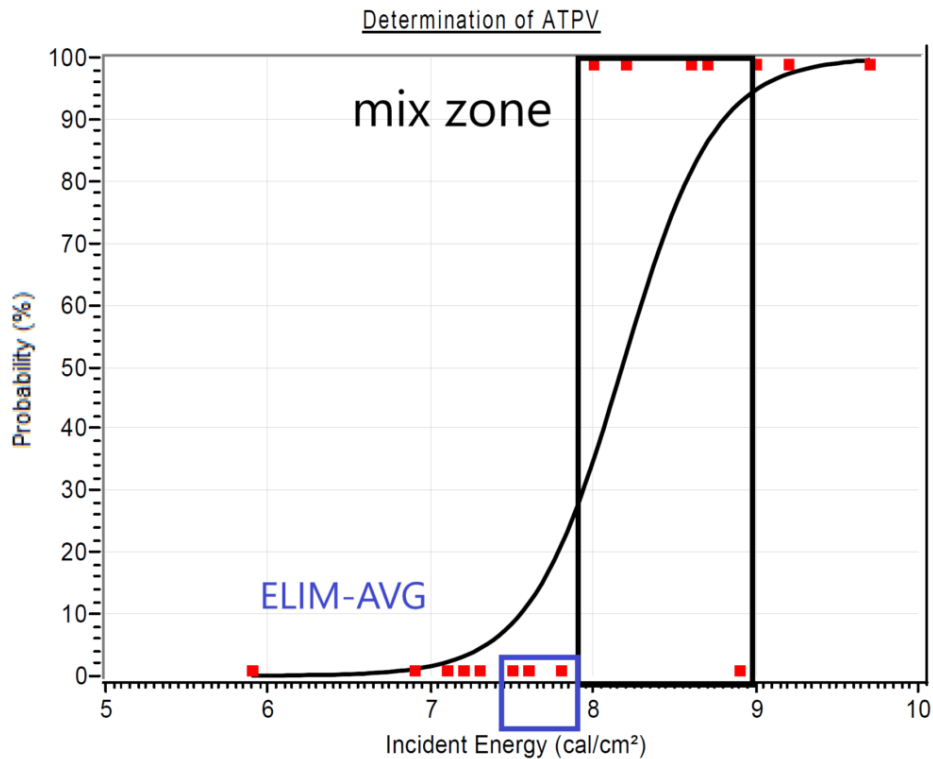
**ASTM F1959**



**Three Panel Test Apparatus  
At Ontario Hydro - Kinectrics**

Fuente: NASCO. *ASTM-F1959-test-apartus. Arc Standards.* [www.nascoinc.com](http://www.nascoinc.com). Consulta: 18 de agosto de 2021.

Figura 29. **Gráfica de probabilidad de quemadura de segundo grado**



Fuente: ArcWear, A division of Kinectrics. *Blog. IEC 61482-1-1 Edition 2.0 Published.* <https://www.arcwear.com/blog/iec-61482-1-1-edition-2-0-published/>. Consulta: 18 de agosto de 2021.

La gráfica de probabilidad de quemadura de segundo grado es requerida para determinar la energía incidente que el textil resiste. Además de esta prueba, la ASTM F2621 propone una prueba para una prenda de vestir completo muy similar a la prueba anteriormente discutida.

Lo más importante a tomar en cuenta es que todos los materiales utilizados para fabricar una prenda de vestir resistente al arco eléctrico deben de ser resistentes al arco.

### **3. ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO EN INDUSTRIA PROCESADORA DE EMBUTIDOS**

Un cortocircuito es una falla común en cualquier tipo de instalación eléctrica, siendo este la creación de un flujo de corriente eléctrica muy alta que ocurre por accidente. Pueden provocar el daño permanente de los equipos, pues puede producir explosiones que destruyan por completo las instalaciones y crear condiciones peligrosas para las personas cercanas.

El estudio de cortocircuito de la instalación es esencial para posteriormente realizar el estudio de arco eléctrico: su objetivo es determinar las corrientes de cortocircuito en cada punto del diagrama unifilar, analizar la correcta selección de protecciones y coordinar sus curvas de protección. Para más información de las curvas de operación de las protecciones eléctricas referirse al capítulo 1.

#### **3.1. Tipos de fallas en instalaciones eléctricas**

Una falla se puede definir como cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente en un circuito. El cortocircuito por lo tanto es una falla en la cual se crean altas corrientes por el contacto de 1 o más fases entre sí o con la tierra. En tendidos eléctricos aéreos, por ejemplo, un causante de una falla trifásica puede ser una rama de un árbol que cae e interconecta los cables de alta tensión. En un tablero industrial, como otro ejemplo, una falla bifásica puede ocurrir cuando un trabajador por equivocación las interconecta al estar manipulando los equipos a tensión.

### 3.1.1. Fallas trifásicas simétricas

Una falla trifásica se establece cuando las 3 fases de un sistema trifásico se interconectan creando un cortocircuito entre ellas. La corriente de la falla es igual en las tres fases y comúnmente se denomina como una falla simétrica. Al analizar la corriente eléctrica durante un cortocircuito trifásico en una máquina síncrona se puede observar la división en tres principales periodos: subtransitorio, transitorio y estacionario.

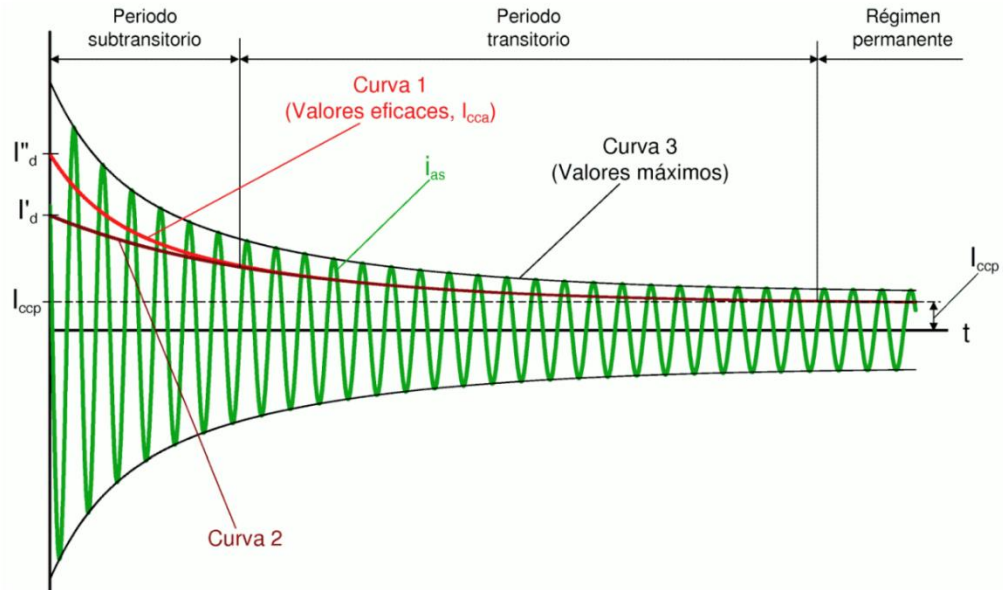
El periodo subtransitorio dura pocos ciclos, caracterizado por una reactancia sub transitoria  $X_d''$  del generador, la cual produce corriente eléctrica, al tiempo decrece con la medida de una constante de tiempo sub transitorio  $T_d''$ . Usualmente estas corrientes son altas y aparecen solamente en los primeros ciclos. El periodo transitorio cubre un tiempo relativamente largo durante el cual la magnitud de corriente está determinada por la reactancia transitoria  $X_d'$  del generador y el decremento del tiempo por una constante de tiempo sub transitorio  $T_d'$ . Finalmente, el periodo de estado estable es el nivel de tiempo más largo de corriente de falla y su magnitud es determinada por la reactancia síncrona del generador.

### 3.1.2. Fallas asimétricas

A diferencia de las fallas trifásicas, existen cortocircuitos que no involucran las tres fases del sistema trifásico. Estas son:

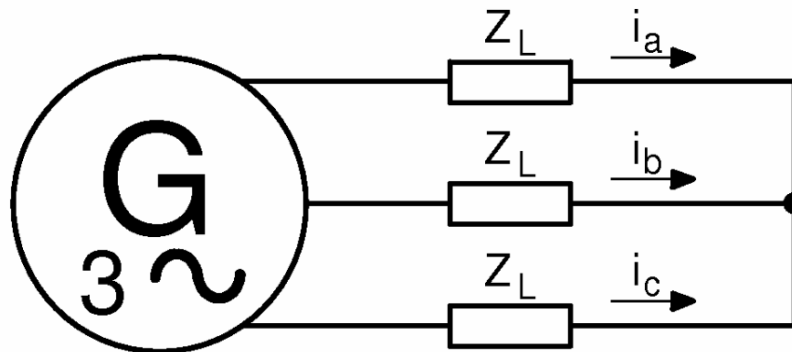
- Fallas monofásicas: cortocircuito entre una fase y el neutro
- Fallas bifásicas: cortocircuito entre dos fases
- Fallas bifásicas a tierra: cortocircuito entre dos fases y tierra

Figura 30. **Periodos de un cortocircuito en un generador**



Fuente: RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel. *Máquinas síncronas: cortocircuitos*.  
 Universidad de Cantabria. <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Cortos%20sincronas.pdf>.  
 Consulta: 10 de septiembre de 2021.

Figura 31. **Falla trifásica**



Fuente: RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel. *Máquinas síncronas: cortocircuitos*.  
 Universidad de Cantabria. <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Cortos%20sincronas.pdf>.  
 Consulta: 10 de septiembre de 2021.

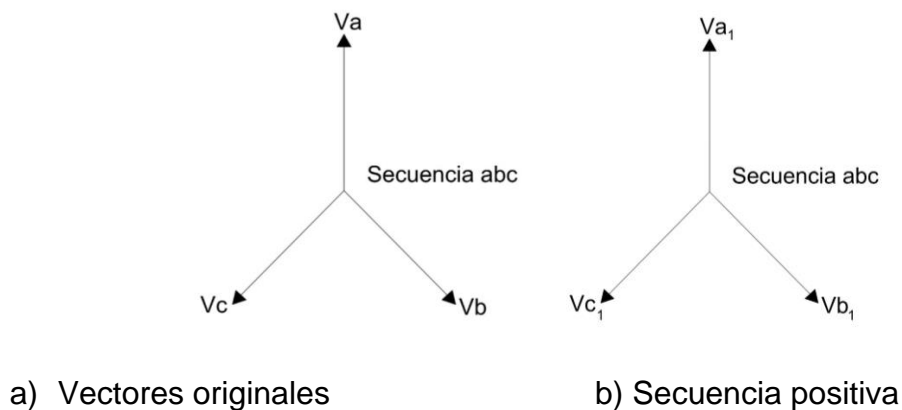
Se conocen como asimétricas, pues sus valores de corriente eléctrica no son iguales entre fases. Su estudio es más complejo, ya que este no se basa en las reactancias del generador, si no en la utilización del método de componentes simétricas. Se utilizan para analizar sistemas desbalanceados.

También conocido como Método de Fortescue, consiste en descomponer un sistema polifásico asimétrico en varios sistemas simétricos, los cuales pueden ser fácilmente analizados. En detalle, un sistema asimétrico se simplifica en 3 componentes: Componente de secuencia negativa, componente de secuencia positiva y componente de secuencia cero.

### 3.1.2.1. Componentes de secuencia positiva ( $Z_1$ )

Representadas por un subíndice (1), estas componentes son formadas por tres vectores de igual magnitud con una diferencia de fases de  $120^\circ$ , con la misma secuencia de fases que los vectores originales. En un generador, esta componente genera un campo magnético giratorio en el sentido de giro del rotor, produciendo así un par útil.

Figura 32. Componentes de secuencia positiva



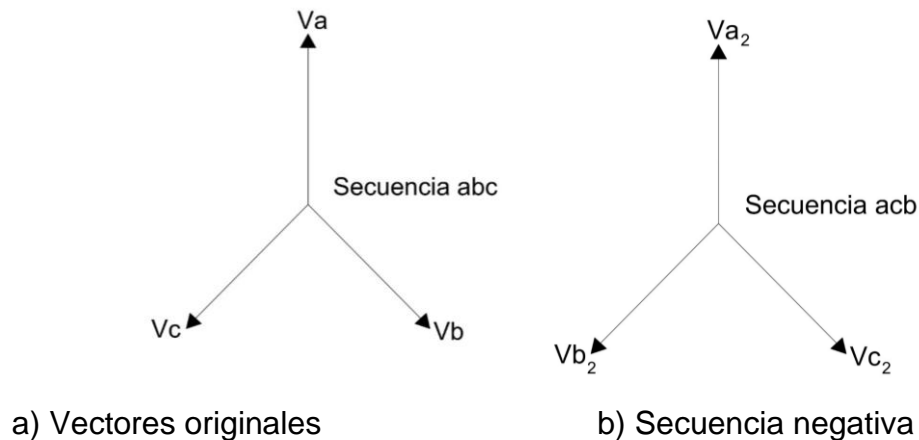
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2018.



### 3.1.2.2. Componentes de secuencia negativa ( $Z_2$ )

Representadas por un subíndice (2), estas componentes están formadas por tres vectores de igual magnitud con una diferencia de fases de  $120^\circ$ , con la secuencia de fases opuesta a la de los vectores originales. En un generador, estas componentes producen un campo magnético giratorio en sentido inverso al movimiento del rotor, creando un par de frenado.

Figura 33. **Componentes de secuencia negativa**

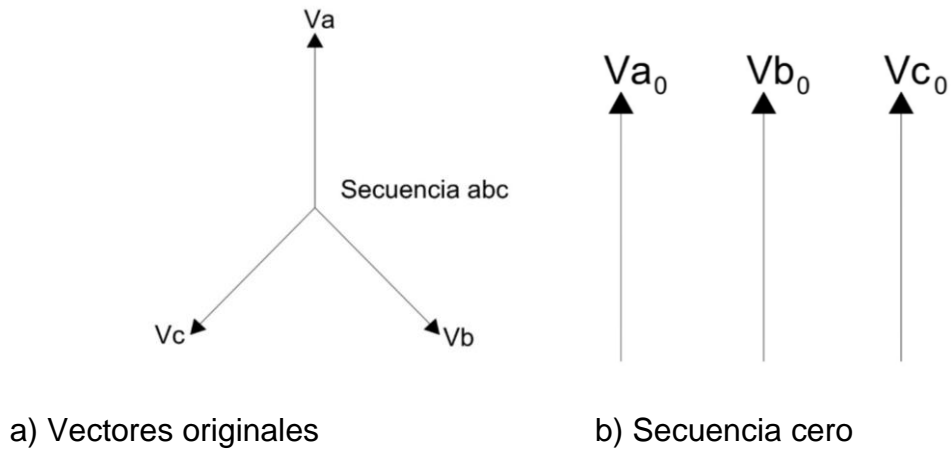


Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2018.

### 3.1.2.3. Componentes de secuencia cero ( $Z_0$ )

Representadas por un subíndice (0), se presentan como tres vectores de igual magnitud con una diferencia de fases igual a cero. Estas componentes no tienen ningún significado físico, pero son de utilidad por el teorema para el análisis de redes desbalanceadas.

Figura 34. Componentes de secuencia cero



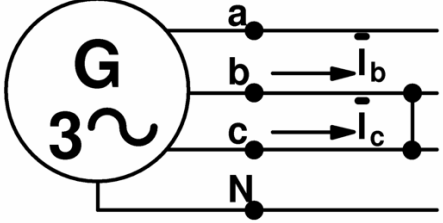
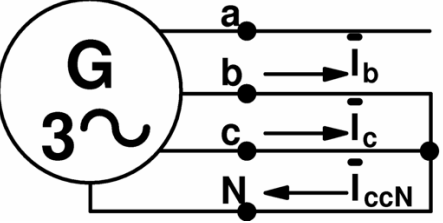
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2018.

La determinación de corrientes de cortocircuito para cada una de las fallas desbalanceadas conlleva un desarrollo matemático extenso, lo cual puede ampliarse en la tabla IX.

Tabla IX. Cortocircuito en fallas asimétricas

Tipo de falla asimétrica	Representación	Corriente de falla
Monofásica	<p>The diagram shows a three-phase source represented by a circle with 'G' and '3' and a wavy line. Three lines extend from the source to terminals labeled 'a', 'b', and 'c'. A fourth line extends to terminal 'N'. Terminal 'a' is shorted to terminal 'N'. An arrow labeled <math>I_a</math> points to the right from terminal 'a'. An arrow labeled <math>I_{ccN}</math> points to the left from terminal 'N'.</p>	$I_b = I_c = 0; V_a = 0$ $I_f = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$

Continuación tabla IX.

Bifásica		$I_f = I_b = -I_c; I_a = 0;$ $V_b = V_c$ $I_f = (\alpha^2 - \alpha) \frac{E}{Z_1 + Z_2}$
Bifásica a tierra		$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0}; I_a = 0;$ $V_b = V_c$ $I_f = 2I_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a1} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a2}$

Fuente: RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel. *Máquinas síncronas: cortocircuitos*.

Universidad de Cantabria. <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Cortos%20sincronas.pdf>.

Consulta: 10 de septiembre de 2021.

### 3.2. Fundamentos para el cálculo de la corriente de cortocircuito

El cortocircuito debe de comprenderse como una falla en cierto punto de la instalación eléctrica en la cual todos los elementos del sistema interactúan entre sí en un flujo de corriente de cortocircuito, en el que las protecciones cumplen una función importante para aislar el circuito.

Se dice que una instalación está preparada para soportar cortocircuitos si cuenta con robustez suficiente para soportar los esfuerzos mecánicos máximos, si la capacidad de sus conductores soporta los esfuerzos térmicos de la corriente máxima de falla, si se cuenta con un sistema de protecciones coordinadas para aislar la falla y si los interruptores tienen la capacidad de disipar la energía de arco.

Un sistema de protecciones debe ser:

- Confiable: aquel sistema que tiene un grado razonable de seguridad de que funciona correctamente.
- Selectivo: debe ser capaz de aislar la menor área que sea posible o el área primaria de cada elemento de protección.
- Sensible: actuar en valores de falla adecuados.
- Simple: menor cantidad de equipos y circuitos para obtener el nivel de protección requerido.
- Veloz: aislar el área con problemas en el menor tiempo posible.

### **3.2.1. Fuentes alimentadoras de corriente de falla**

Los generadores, generadores remotos, motores síncronos o motores de inducción producen corriente de cortocircuito que se limita por su impedancia, que es la suma vectorial de su resistencia  $R$  con su reactancia  $X$ , la cual decrece exponencialmente a partir de que se presenta la corriente de falla.

Los motores al presentarse un cortocircuito se comportan como un generador debido a que utilizan la energía cinética almacenada en sus elementos mecánicos para generar movimiento. Tal como se analizó para fallas trifásicas balanceadas en el apartado anterior, los generadores y motores presentan 3 reactancias distintas. La reactancia subtransitoria  $X_d''$  que es de magnitud muy bajo para los primeros ciclos de la falla por lo que la corriente inicial del cortocircuito es muy alta. El valor de la reactancia se incrementa rápidamente y en 5 o 6 ciclos la reactancia es transitoria  $X_d'$ , por lo que la corriente disminuye. Finalmente, la reactancia alcanza un valor mayor, lo que se conoce como reactancia de estado estable o síncrona  $X$ .

Los motores de inducción pierden su fuente de magnetización cuando se presenta una falla, es por ello que para su análisis se considera solamente la reactancia subtransitoria  $X_d''$  la cual se presenta solo en los primeros instantes del cortocircuito.

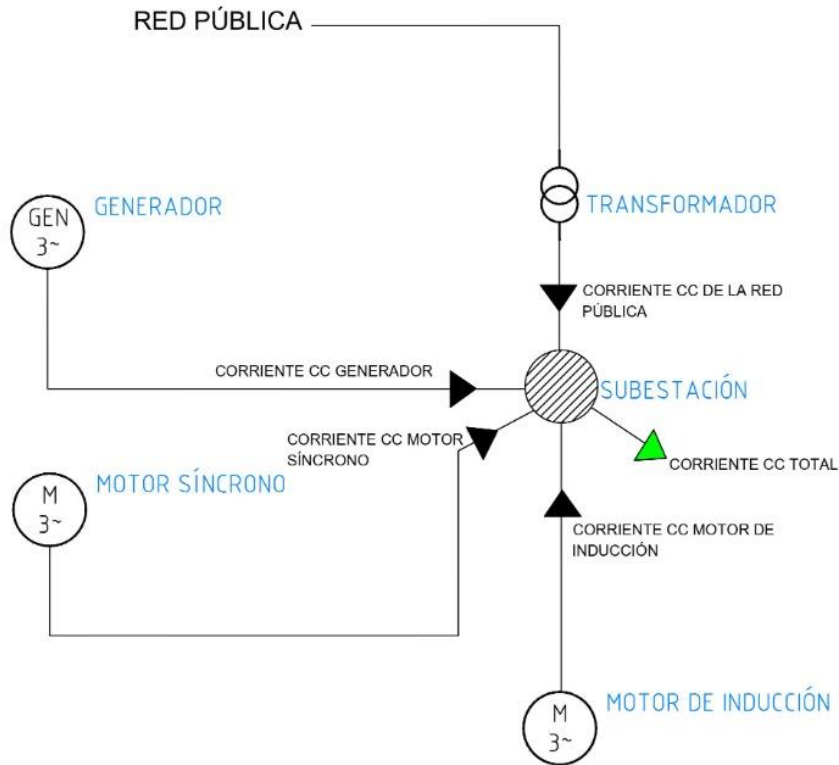
El motor síncrono funciona como un generador al momento de una falla y entrega corriente de cortocircuito. Cuando la falla es reestablecida, el voltaje del sistema se reduce a un valor muy bajo. El motor síncrono comienza a detenerse dejando de entregar energía a la carga mecánica, sin embargo, la inercia de la carga impide que el motor se detenga, pues la carga y el rotor mueven al motor como un primotor mueve a un generador.

Los capacitores no se consideran como fuentes de alimentación al cortocircuito pues tienen una constante de tiempo de descarga que solo dura 1 o 2 ciclos.

La reactancia de estado estable de las máquinas rotatorias no se utiliza en el análisis de cortocircuito debido a que los elementos de protección actuarán antes que la falla llegue a este estado.

La figura 35 muestra las fuentes de corriente de cortocircuito, las cuales se tomarán en cuenta para el estudio de cortocircuito en una industria procesadora de embutidos.

Figura 35. Fuentes de alimentación de cortocircuito



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD electrical 2019.

### 3.2.2. Método por unidad para cálculo de cortocircuito

Existen muchos métodos para el cálculo de cortocircuito, entre los cuales se puede mencionar el método por unidad, el método de las componentes simétricas, el método de la matriz de admitancias, el método de potencias y métodos por computadora. Uno de los más utilizados es el método por unidad, por su simplicidad, pues utiliza la teoría de circuitos básicos para solucionar el problema del cortocircuito.

Durante un cortocircuito se puede considerar que el voltaje es igual al voltaje antes de que se presente la falla, por lo que, según el teorema de Thévenin la

corriente en cierto punto de interés es igual al cociente entre el voltaje con la impedancia equivalente de Thévenin. Es por este principio que una gran red de impedancias puede reducirse a un circuito equivalente y así calcular la corriente de cortocircuito en el punto de interés.

El procedimiento para realizar un cálculo de cortocircuito con el método por unidad es el siguiente:

- Seleccionar el o los puntos de la instalación donde se desea conocer el nivel de cortocircuito.
- Establecer el modelo eléctrico o diagrama unifilar más simple posible para obtener el valor de la corriente, donde se pueda observar todas las reactancias representativas de los elementos del sistema.
- Calcular o estimar las correcciones que se consideren necesarias para compensar las suposiciones tomadas cuando se crea que estas interfieren notablemente en el resultado de cálculo.

### **3.2.2.1. Diagrama unifilar y de impedancias**

Para realizar el estudio es necesario un diagrama unifilar del sistema a estudiar donde aparecen todas las posibles fuentes de cortocircuito, así como información básica de cada uno de los elementos.

Cada componente puede representarse como una impedancia, formando así un segundo diagrama de impedancias para realizar la simplificación necesaria. Normalmente se trabajan 2 diagramas, uno de resistencias y otro de reactancias para posteriormente obtener la relación X/R.

Por la complejidad y los varios niveles de voltaje que se encuentran en una instalación eléctrica, el cálculo se realiza utilizando valores por unidad.

- Escoger una potencia base: puede ser la del equipo más grande del sistema o cualquier valor escogido por conveniencia.
- Calcular más parámetros base: se realizan los cálculos de impedancia base, voltaje base y corriente base. Todo ello para trabajar todo con valores por unidad.

$$Z_2 = Z_1 \left( \frac{KVA \text{ base } 2}{KVA \text{ base } 1} \right) \left( \frac{KV \text{ base } 1}{KV \text{ base } 2} \right)^2 \quad (3-1)$$

Donde:

$Z_1$  = impedancia en p.u. utilizando potencia base del equipo

$Z_2$  = impedancia en p.u. utilizando potencia base elegida

$KVA \text{ base } 1$  = potencia base del equipo

$KVA \text{ base } 2$  = potencia base elegida

$KV \text{ base } 1$  = voltaje base del equipo

$KV \text{ base } 2$  = voltaje base elegido

Esta ecuación (3-1) es funcional para transformar una impedancia referida a la potencia de un equipo específico a la potencia base elegida para resolver todo el análisis de cortocircuito.

$$Z_{pu} = \frac{Z \text{ (Ohms)} * KVA \text{ base}}{1000 (KV \text{ base})^2} \quad (3-2)$$



Donde:

$Z_{pu}$  = impedancia en p.u.

$Z$  (Ohms) = impedancia en Ohmios

Esta ecuación (3-2) se utiliza para calcular la impedancia por unidad cuando se tiene valores de impedancia en Ohmios.

### 3.2.2.2. Cálculo de corriente de cortocircuito

Una vez obtenido el diagrama de impedancias simplificado al equivalente de Thévenin, es necesario conocer la potencia y la corriente de cortocircuito la cual puede ser calculada de la siguiente forma:

$$KVA_{cc} = \frac{KVA \text{ base}}{Z_{eqp.u.}} \quad (3-3)$$

Donde:

$Z_{eqp.u.}$  = impedancia equivalente total en p.u.

$KVA_{cc}$  = potencia de cortocircuito

$$I_{cc} = \frac{KVA_{cc}}{\sqrt{3} KV_{base}} \quad (3-4)$$

Donde;

$I_{cc}$  = corriente de cortocircuito

Si se utilizan valores complejos para los cálculos, la corriente de cortocircuito resulta compleja con un desfase al voltaje. Si solo se consideran las reactancias en el análisis, la corriente de cortocircuito resulta en:

$$I_{cc} = -\frac{1}{X_{eqp.u.}}j \quad (3-5)$$

Donde:

$I_{cc}$  = corriente de cortocircuito

$X_{eqp.u.}$  = reactancia equivalente por unidad

Como es una componente imaginaria, demuestra un retraso de 90° con respecto al voltaje.

### 3.2.2.3. Impedancia de elementos eléctricos

Máquinas rotatorias: se requieren los valores de reactancia de las máquinas rotatorias involucradas, sin embargo, pueden utilizarse los valores descritos en el estándar de IEEE 141-1993 para valores de motores síncronos y de inducción. Para más información de lo recomendado en dicha publicación referirse al artículo *ANSI/IEEE Std 141-1986, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, página 339 tabla N1.1.

Para los motores asíncronos se puede obtener un valor más preciso para la reactancia subtransitoria  $X''$  de la siguiente forma:

$$X'' = \frac{I_{nominal}}{I_{arranque}} \quad (3-6)$$

## Reactancia equivalente de la red de alimentación

La potencia simétrica de cortocircuito es un dato indispensable provisto por la suministradora de energía. Una vez se cuenta con este dato, se puede calcular la reactancia equivalente.

$$X_{cc} = \frac{KVA \text{ base}}{KVA \text{ cc}} \quad (3-7)$$

Reactancia inductiva de los conductores: los campos magnéticos provocados por la circulación de corriente en los conductores crean inductancia en otros conductores cercanos medido en henrys (H). Dicha inductancia es importante tomarla en cuenta para el estudio de cortocircuito. Para 3 conductores A, B, y C la distancia media geométrica de acuerdo a su disposición es igual a:

$$DMG = \sqrt[3]{AB * BC * CA} \quad (3-8)$$

Donde:

$DMG$  = distancia media geométrica

$AB$  = distancia entre conductor A y B

$BC$  = distancia entre conductor B y C

$CA$  = distancia entre conductor C y A

La reactancia inductiva del grupo de conductores puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$X_L = 0,0028 * f * \log \frac{DMG}{RMG} \quad (3-9)$$

Donde:

$X_L$  = reactancia inductiva en Ohm/kilómetro

$f$  = frecuencia (Hz)

$DMG$  = distancia media geométrica

$RMG$  = radio medio geométrico

Elementos de impedancia constante: los restantes del sistema cuentan con impedancias constantes, como los transformadores. Son elementos pasivos, sus impedancias solo limitan el flujo de la corriente de cortocircuito y dichos valores deben ser proporcionados por el fabricante.

### **3.3. Resultados de cortocircuito en industria procesadora de embutidos**

El estudio de cortocircuito es la base para el diseño de cualquier instalación eléctrica, pues en ella se basa la elección de protecciones eléctricas. En el caso de la industria procesadora de embutidos, la instalación ya es existente, por lo que se ha realizado un nuevo estudio de cortocircuito.

#### **3.3.1. Determinación del diagrama unifilar de la instalación eléctrica**

El punto de partida para realizar el estudio de cortocircuito y posteriormente el estudio de arco eléctrico es conocer a totalidad los elementos de la instalación eléctrica. Esto corresponde a transformadores, acometidas, generadores, bancos de capacitores, motores eléctricos, tableros de distribución, incluyendo el detalle de cada carga dentro de la instalación. Para ello se ha accedido a la instalación eléctrica para toma de datos, realizando un diagrama unifilar

completo, con los datos de potencia de motores, calibres de conductores, ubicación de generadores eléctricos, entre otros.

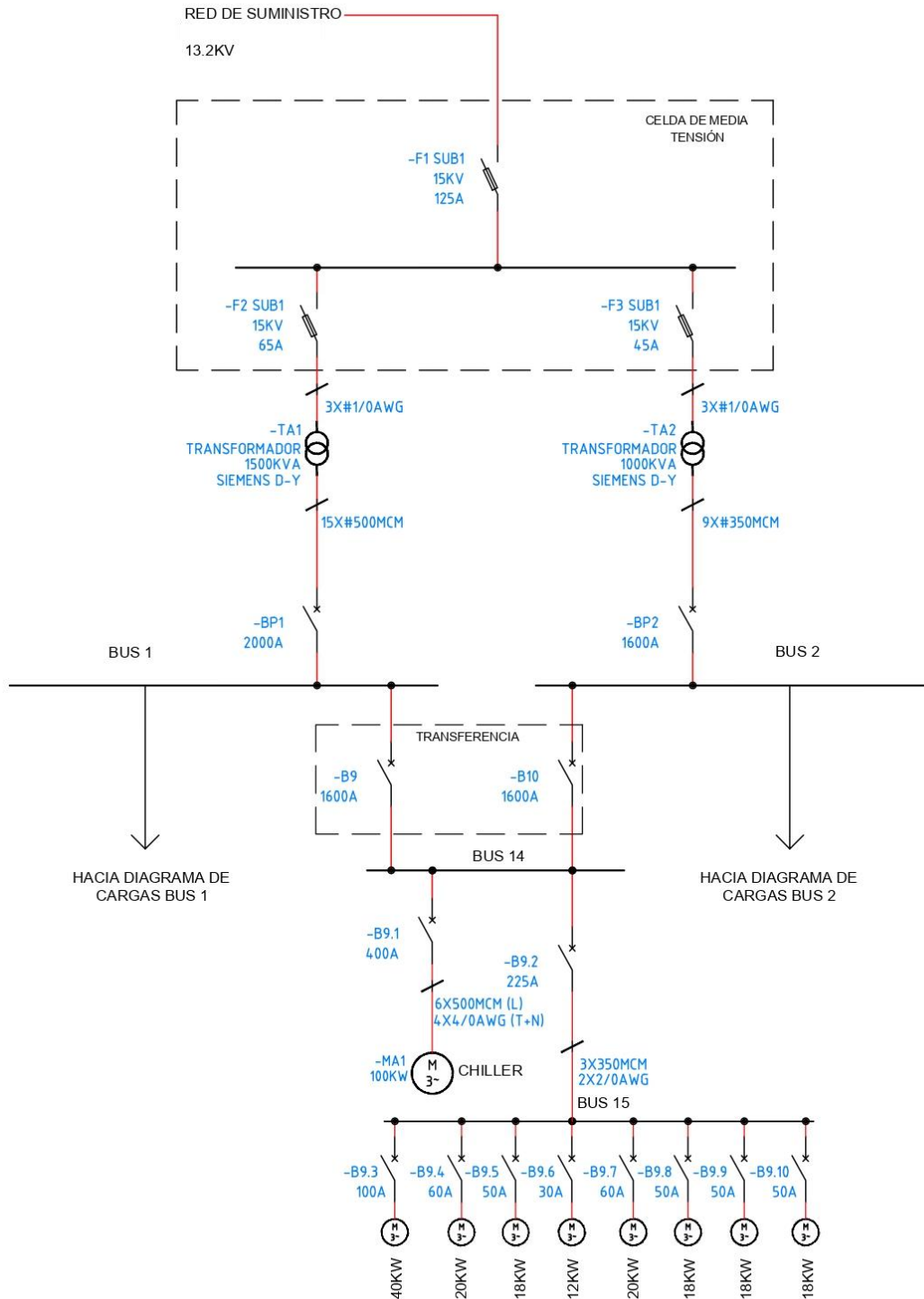
De la figura 36 a la 40 puede observarse el diagrama unifilar obtenido, luego de ser verificado en la instalación eléctrica cada uno de los elementos mostrados.

La instalación industrial cuenta con dos transformadores de potencia tipo *pad mounted* de 1 500 kVA 13,2kV/480V y 1 000 kVA 13,2 kV/480 V respectivamente marca Siemens, identificados con la etiqueta TA1 y TA2.

Estos son alimentados por medio de una celda de media tensión marca Square D con fusibles de 65 y 45 amperios. Ambos transformadores alimentan los buses 1 y 2, en 480 V, los cuales distribuyen toda la carga de la planta de producción. El bus 14 está alimentado tanto del bus 1 como del bus 2, debido a que dicha carga es de suma importancia en el proceso productivo.

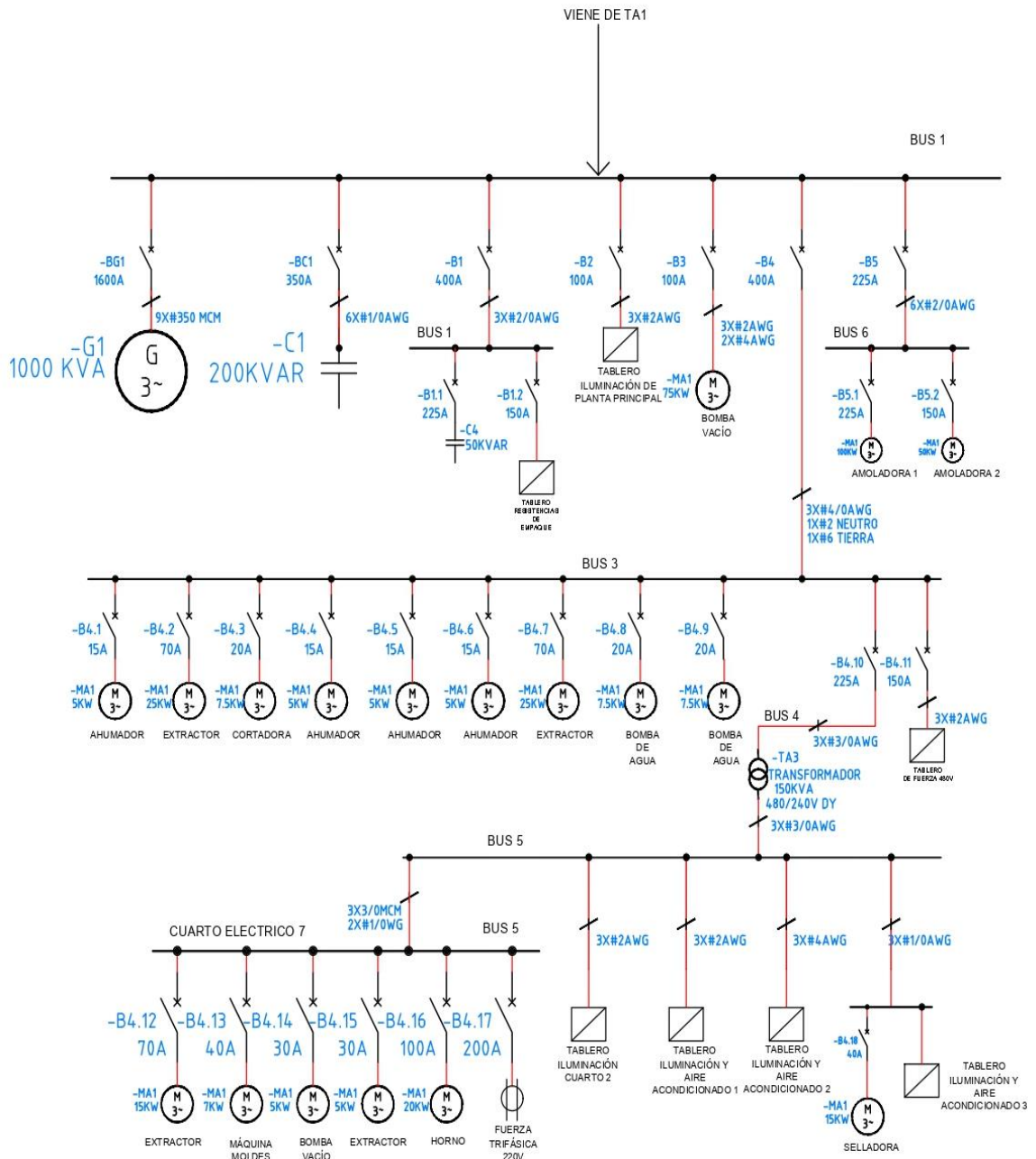
La carga total instalada en 62 motores de inducción corresponde a 1 675 HP (aproximadamente 1 250 kW). Se cuenta con dos generadores trifásicos de emergencia, de 1 000 kVA cada uno. Los bancos de capacitores principales, uno en cada bus principal, son de 250 kVAR y 200 kVAR respectivamente. El resto de cargas corresponde a iluminación o fuerza.

Figura 36. Diagrama unifilar-acometida principal



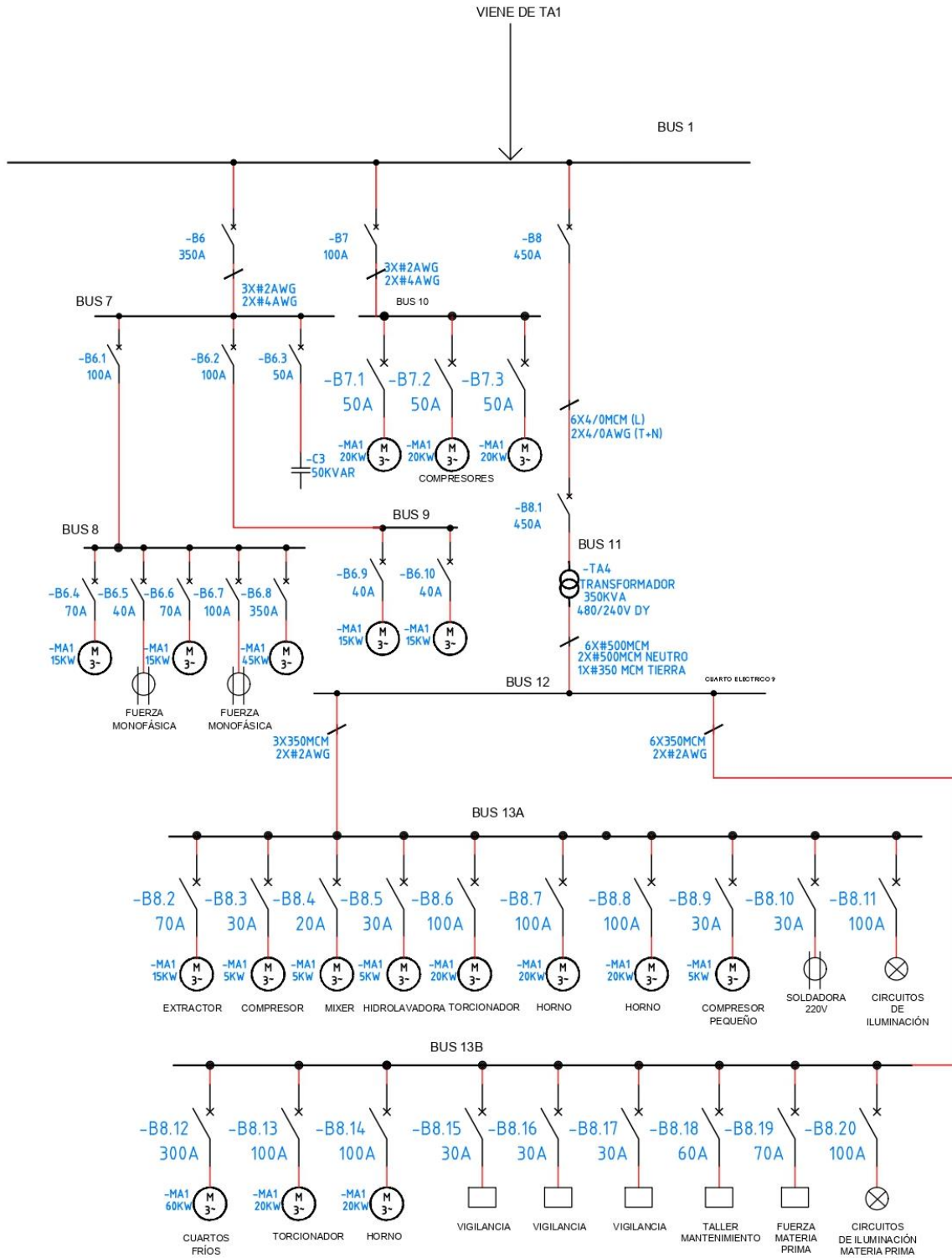
Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

Figura 37. Diagrama unifilar-bus 1 parte 1



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

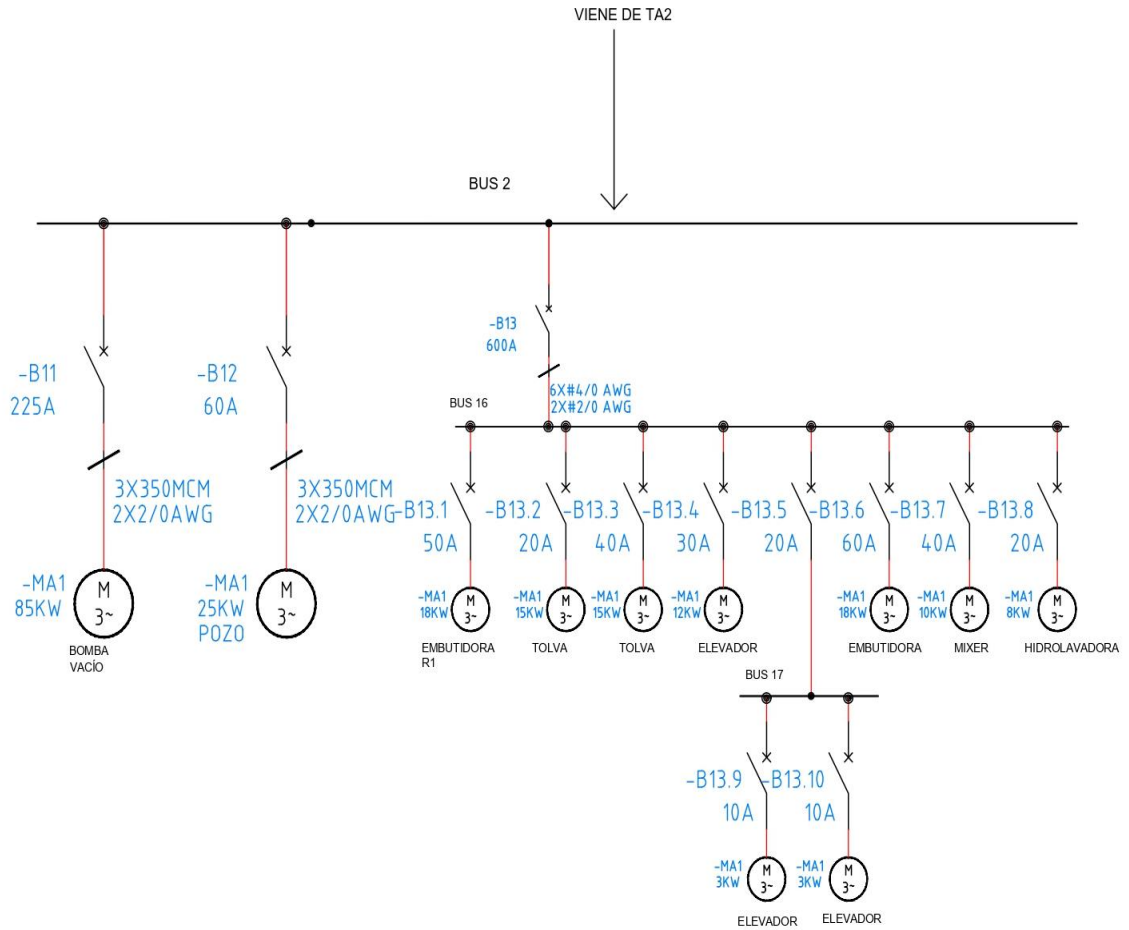
Figura 38. Diagrama unifilar-bus 1 parte dos



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

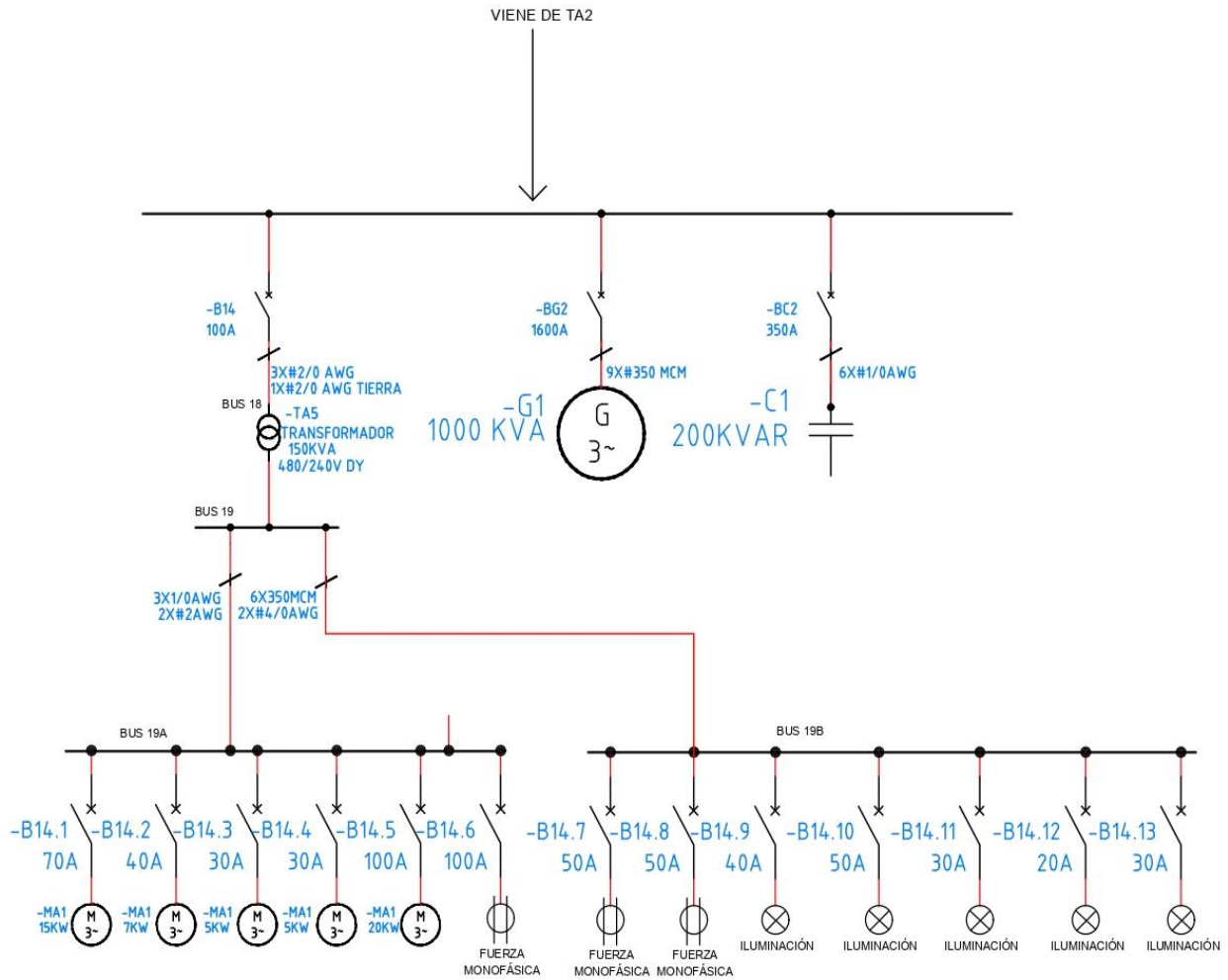


Figura 39. Diagrama unifilar-bus 2 parte 1



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

Figura 40. Diagrama unifilar-bus 2 parte dos



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

### 3.3.2. Cálculo de reactancias transitorias de la red

El siguiente paso para estudiar el diagrama unifilar es el cálculo de reactancias transitorias equivalentes de cada elemento que aporta al cortocircuito. El objetivo de esta simplificación es analizar las corrientes de falla que cada elemento aporta para conformar así el estudio de cortocircuito. Para la reducción y futuros cálculos se tomará la potencia de cortocircuito de la acometida principal, utilizando los siguientes valores base:

$$P_{cc \text{ de red}} = 1\,000\text{MVA} \quad V_{base} = 0,48\text{kV} \quad S_{base} = 1\,500\text{ kVA} \quad (3-7)$$

Cálculo de corriente base

$$I_{base} = \frac{kVA \text{ base}}{V \text{ base} * \sqrt{3}} = \frac{1\,500}{0,48 * \sqrt{3}} = 1\,804,21\text{ A} \quad (3-8)$$

Cálculo de reactancia de cortocircuito

Sustituyendo en la ecuación 3-3:

$$X_{cc \text{ p.u.}} = \frac{kVA \text{ base}}{kVA \text{ cc}} = \frac{1\,500}{1\,000 * 10^3} = j0,0015\text{pu} \quad (3-9)$$

Cálculo de reactancia de transformador TA1 de 1 500 kVA

La impedancia de acuerdo a la placa del transformador es de 5,2 %.

Sustituyendo en la ecuación 3-1 para cambio de base:

$$X_{TA1 p.u.} = j0,052 \left( \frac{1\ 500}{1\ 500} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j0,052 \quad (3-10)$$

Cálculo de reactancia de transformador TA2 de 1000 kVA

La impedancia de acuerdo a la placa del transformador es de 6 %. Sustituyendo en la ecuación 3-1 para cambio de base:

$$X_{TA2 p.u.} = j0,06 \left( \frac{1\ 500}{1\ 000} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j0,09 \quad (3-11)$$

Cálculo de reactancia de los generadores de 1 000 kVA

La impedancia transitoria de acuerdo con la placa del generador es de 14 %.

Sustituyendo en la ecuación 3-1 para cambio de base:

$$X_{TA2 p.u.} = j0,14 \left( \frac{1\ 500}{1\ 000} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j0,21 \quad (3-12)$$

Cálculo de reactancia de los generadores de 1 000 kVA

La impedancia transitoria de acuerdo a la placa del generador es de 14%.

Sustituyendo en la ecuación 3-1 para cambio de base:

$$X_{GEN p.u.} = j0,14 \left( \frac{1\ 500}{1\ 000} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j0,21 \quad (3-13)$$

Cálculo de reactancia de los motores instalados

Los motores de inducción instalados en la industria tienen distintas potencias y capacidades. De acuerdo al artículo ANSI/IEEE Std 141-1993, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, se considera:

- Para todos los motores de inducción mayores a 50 HP, X=0,2p.u.
- Para todos los motores de inducción menores a 50 HP, X=0,28p.u.

Como ejemplo del cálculo, se calcula la reactancia de un motor de 100HP.

$$P_{base,100HP} = \frac{Potencia (kw)}{Eficiencia * f.p.} = \frac{100 * 0,7457}{0,91 * 0,82} = 99,93kw \quad (3-14)$$

$$X_{100hp,p.u.} = j0,2 \left( \frac{1500}{99,93} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j3,002 \quad (3-15)$$

Siguiendo el procedimiento anteriormente mostrado, se han calculado las reactancias transitorias de todos los motores de inducción involucrados; sus valores pueden observarse en la tabla X. Para el cálculo efectuado se ha asumido una eficiencia del 91 % y un factor de potencia del 82 % para todos los casos.

Tabla X. **Cálculo de reactancias p.u. de todos los motores de inducción**

Voltaje de operación (kV)	Potencia (HP)	Potencia base	X transitoria	X transitoria p.u.
BUS 1				
0,48	100	99,93	0,2	<b>3,002</b>
BUS 3				
0,48	6	6,00	0,28	<b>70,047</b>

Continuación tabla X.

0,48	33	32,98	0,28	<b>12,736</b>
0,48	10	9,99	0,28	<b>42,028</b>
0,48	6	6,00	0,28	<b>70,047</b>
0,48	6	6,00	0,28	<b>70,047</b>
0,48	6	6,00	0,28	<b>70,047</b>
0,48	33	32,98	0,28	<b>12,736</b>
0,48	10	9,99	0,28	<b>42,028</b>
0,48	10	9,99	0,28	<b>42,028</b>
<b>BUS 5</b>				
0,24	20	19,99	0,28	<b>5,254</b>
0,24	10	9,99	0,28	<b>10,507</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	25	24,98	0,28	<b>4,203</b>
0,24	20	19,99	0,28	<b>5,254</b>
<b>BUS 6</b>				
0,48	130	129,91	0,2	<b>2,309</b>
0,48	65	64,96	0,2	<b>4,618</b>
<b>BUS 8</b>				
0,48	20	19,99	0,28	<b>21,014</b>
0,48	20	19,99	0,28	<b>21,014</b>
0,48	60	59,96	0,2	<b>5,003</b>
0,48	20	19,99	0,28	<b>21,014</b>
0,48	20	19,99	0,28	<b>21,014</b>
<b>BUS 10</b>				
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
<b>BUS 13</b>				
0,24	20	19,99	0,28	<b>5,254</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	25	24,98	0,28	<b>4,203</b>
0,24	25	24,98	0,28	<b>4,203</b>

Continuación tabla X.

0,24	25	24,98	0,28	<b>4,203</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	80	79,95	0,2	<b>0,938</b>
0,24	25	24,98	0,28	<b>4,203</b>
0,24	25	24,98	0,28	<b>4,203</b>
<b>BUS 14</b>				
0,48	135	134,91	0,2	<b>2,224</b>
0,48	53	52,96	0,2	<b>5,664</b>
0,48	26	25,98	0,28	<b>16,165</b>
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
0,48	16	15,99	0,28	<b>26,268</b>
0,48	26	25,98	0,28	<b>16,165</b>
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
<b>BUS 2</b>				
0,48	113	112,92	0,2	<b>2,657</b>
0,48	33	32,98	0,28	<b>12,736</b>
<b>BUS 16</b>				
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
0,48	20	19,99	0,28	<b>21,014</b>
0,48	20	19,99	0,28	<b>21,014</b>
0,48	16	15,99	0,28	<b>26,268</b>
0,48	25	24,98	0,28	<b>16,811</b>
0,48	13	12,99	0,28	<b>32,329</b>
0,48	10	9,99	0,28	<b>42,028</b>
0,48	5	5,00	0,28	<b>84,056</b>
0,48	5	5,00	0,28	<b>84,056</b>
<b>BUS 19</b>				
0,24	20	19,99	0,28	<b>5,254</b>
0,24	10	9,99	0,28	<b>10,507</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	6	6,00	0,28	<b>17,512</b>
0,24	26	25,98	0,28	<b>4,041</b>

Fuente: elaboración propia.

Cálculo de reactancia de transformador TA3 de 150 kVA

La impedancia de acuerdo a la placa del transformador es de 5,5 %.

$$X_{TA3 p.u.} = j0,055 \left( \frac{1500}{150} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j0,55 \quad (3-15)$$

Cálculo de reactancia de transformador TA4 de 350 kVA

La impedancia de acuerdo a la placa del transformador es de 6 %.

$$X_{TA4 p.u.} = j0,06 \left( \frac{1500}{350} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j0,2571 \quad (3-16)$$

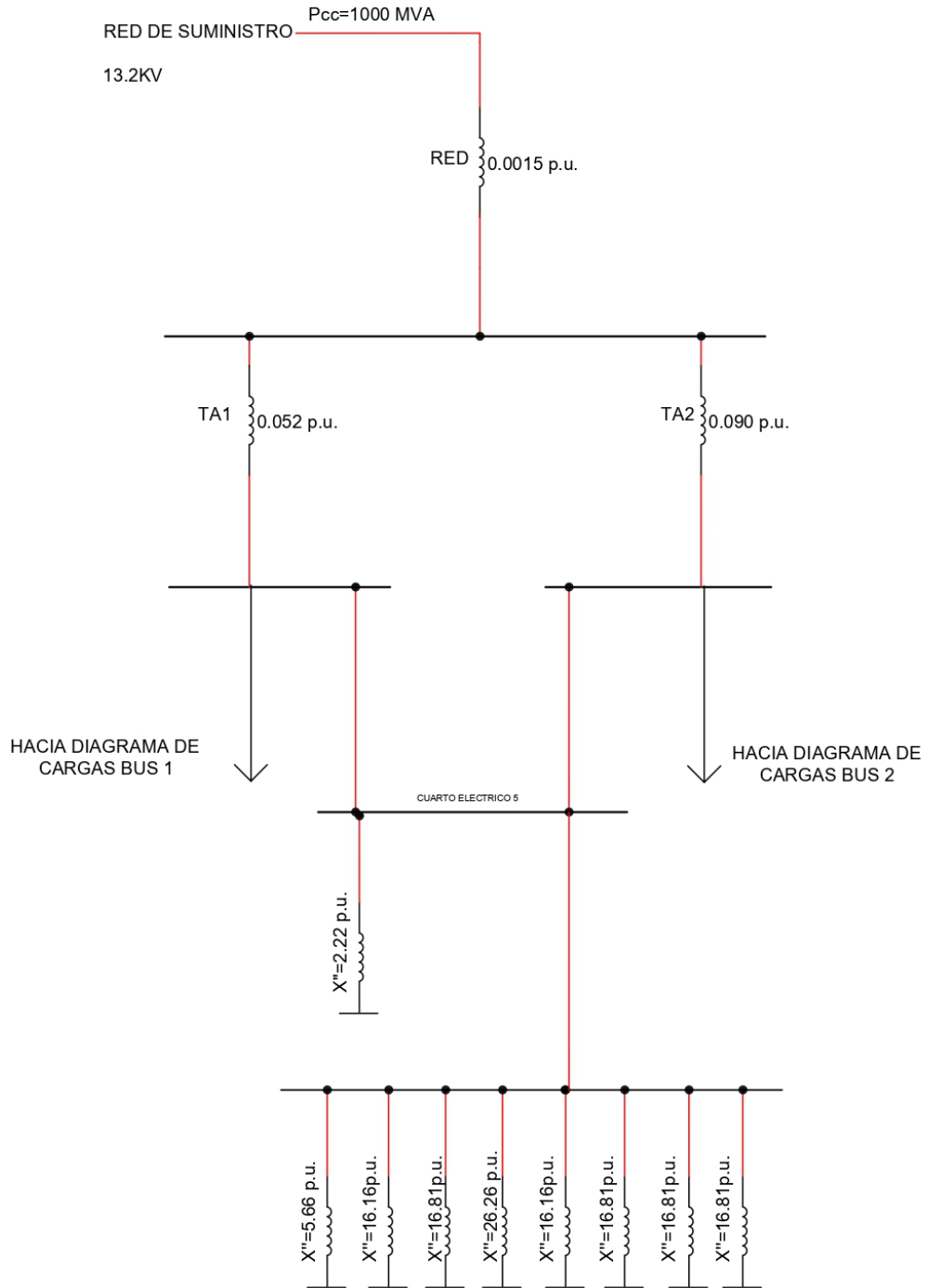
Cálculo de reactancia de transformador TA5 de 150 kVA

La impedancia de acuerdo a la placa del transformador es de 5,2 %.

$$X_{TA5 p.u.} = j0,052 \left( \frac{1500}{150} \right) \left( \frac{0,48}{0,48} \right)^2 = j0,52 \quad (3-17)$$

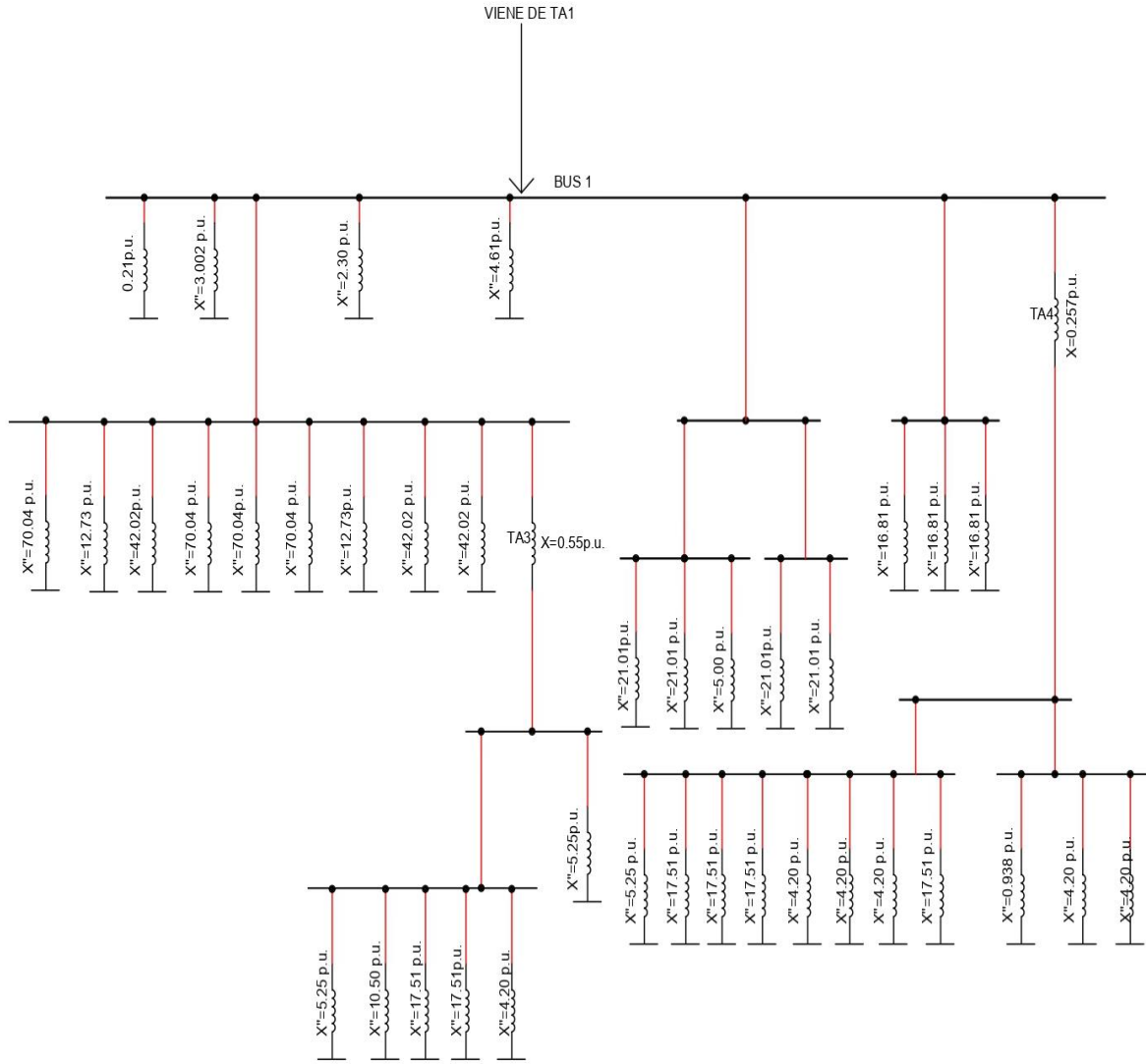


Figura 41. Diagrama de reactancias acometida principal



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

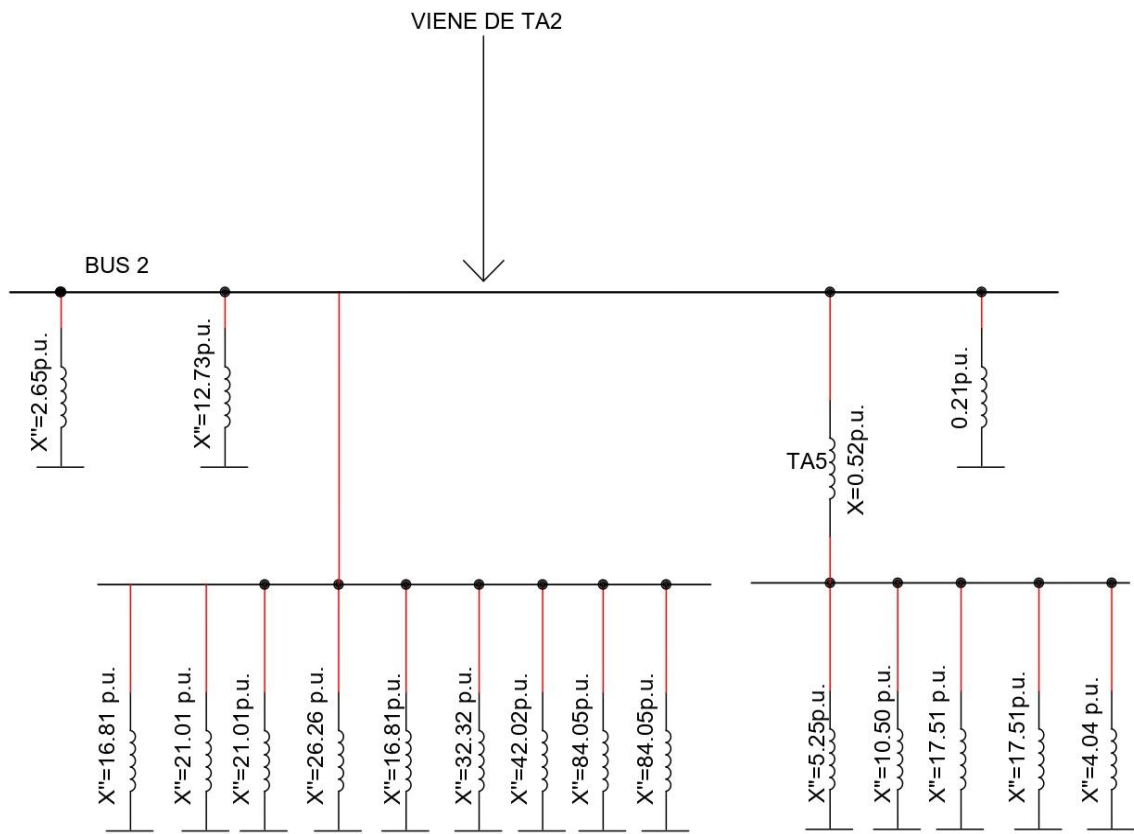
Figura 42. Diagrama de reactancias bus 1



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

Las figuras 41, 42 y 43 muestran el diagrama de reactancias formado por las cargas del diagrama unifilar, de acuerdo a los cálculos anteriormente realizados.

Figura 43. **Diagrama de reactancias bus 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

### 3.3.3. Simplificación de la red de reactancias

Las figuras de la 42 a la 44 muestran el diagrama de reactancias completo de la red eléctrica industrial; se han recopilado todos los valores transitorios calculados de transformadores, generadores y motores de inducción.

Para realizar cálculos en esta red es necesario realizar varias reducciones sencillas, acudiendo a la teoría básica de circuitos.

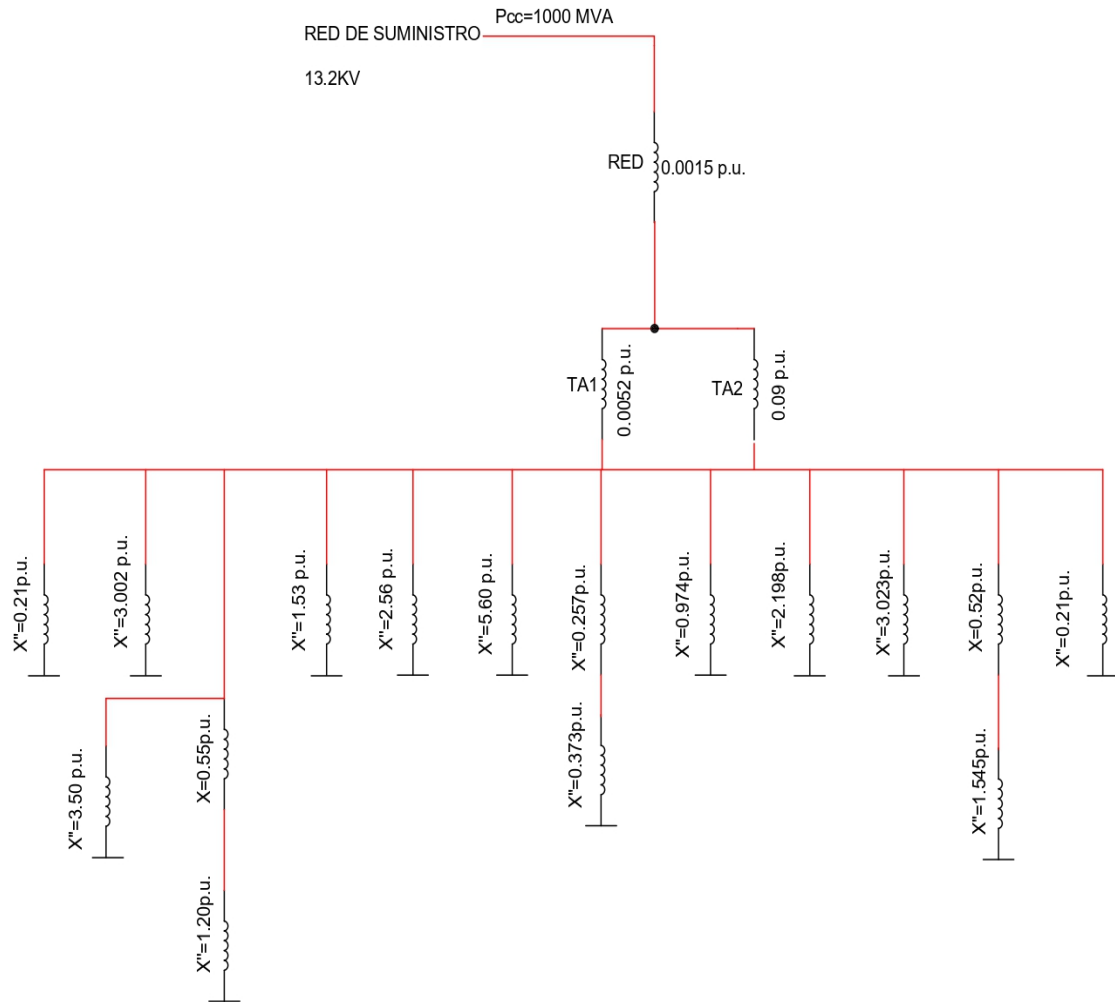
Impedancia equivalente: varias impedancias en serie:

$$Z_{Eq,N} = \sum_1^N Z_i \quad (3-18)$$

Impedancia equivalente: varias impedancias en paralelo:

$$\frac{1}{Z_{Eq,N}} = \sum_1^N \frac{1}{Z_i} \quad (3-19)$$

Figura 44. Simplificación 1 de reactancias



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

La primera simplificación se ha efectuado, correspondiente al paralelo de cada uno de los buses secundarios. A partir del diagrama reducido de la figura 44, se guiará al lector en la simplificación final.

Simplificación de la red del bus 1

$$\frac{1}{Z_{Eq\ bus\ 1}} = \frac{1}{j0,21} + \frac{1}{j3,002} + \frac{1}{j3,5} + \frac{1}{j1,76} + \frac{1}{j1,53} + \frac{1}{j2,56} + \frac{1}{j5,60} + \frac{1}{j0,63} \quad (3-20)$$

$$Z_{Eq\ bus\ 1} = j0,1142 \quad (3-21)$$

Simplificación de la red del bus 2

$$\frac{1}{Z_{Eq\ bus\ 2}} = \frac{1}{j2,198} + \frac{1}{j3,023} + \frac{1}{j2,065} + \frac{1}{j0,21} \quad (3-22)$$

$$Z_{Eq\ bus\ 1} = j0,166 \quad (3-23)$$

Se ha realizado la simplificación a una red muy simple, como la de la figura 45. Este circuito equivalente muestra todos los elementos necesarios para determinar las corrientes de cortocircuito, dado por los valores de reactancias transitorias.

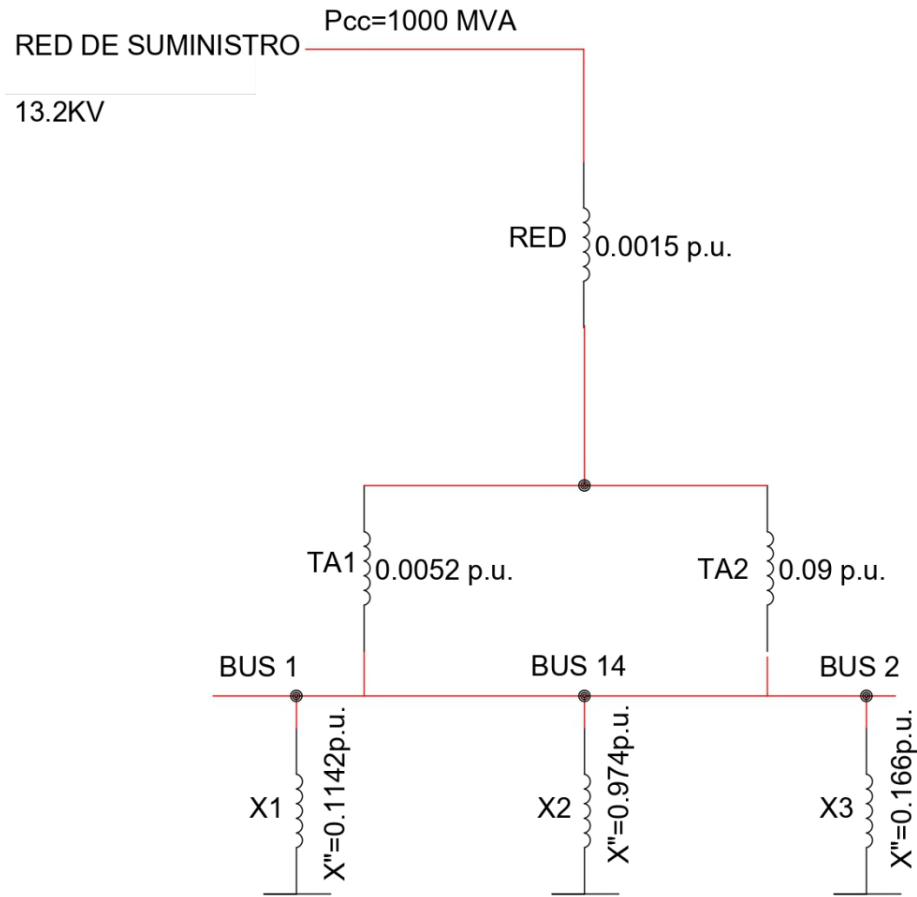
### 3.3.4. Cálculo de corrientes de cortocircuito

El voltaje en el bus 1, bus 14, bus 2 y el nodo superior a los transformadores es conocido, por trabajar la simplificación en valores por unidad, este voltaje es igual a 1,00 p.u.

Por lo tanto, las corrientes en cada reactancia se pueden calcular con una simple caída de tensión, de la siguiente manera:

$$I_{RED} p.u. = \frac{1}{X_{RED}} = \frac{1}{j0,0015} = -j666,67 p.u. \quad (3-24)$$

Figura 45. **Diagrama de reactancias simplificado**



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

Al multiplicarlo por la corriente base, calculada en 3-8:

$$I_{RED} = -j666,67 p.u. * 1804,21A = -j1 202,80kA \text{ referido a } 480V \quad (3-25)$$

Y por lo tanto, los demás resultados, son de la siguiente forma:

$$I_{TA1} = \frac{1}{j0,0052} * 1804,21A = 34,70kA \quad (3-26)$$

$$I_{TA2} = \frac{1}{j0,09} * 1804,21A = 20,05kA \quad (3-27)$$

$$I_{X1} = \frac{1}{j0,1142} * 1804,21A = 15,79kA \quad (3-28)$$

$$I_{X2} = \frac{1}{j0,0974} * 1804,21A = 1,85kA \quad (3-29)$$

$$I_{X3} = \frac{1}{j0,1657} * 1804,21A = 10,88kA \quad (3-30)$$

Los resultados finales del cálculo de cortocircuito pueden apreciarse en la tabla XI y en la figura 46. Estos valores de corriente son aquellos que se crearían al existir un cortocircuito trifásico.

Tabla XI. **Resultados de corriente de cortocircuito referido a 480 V**

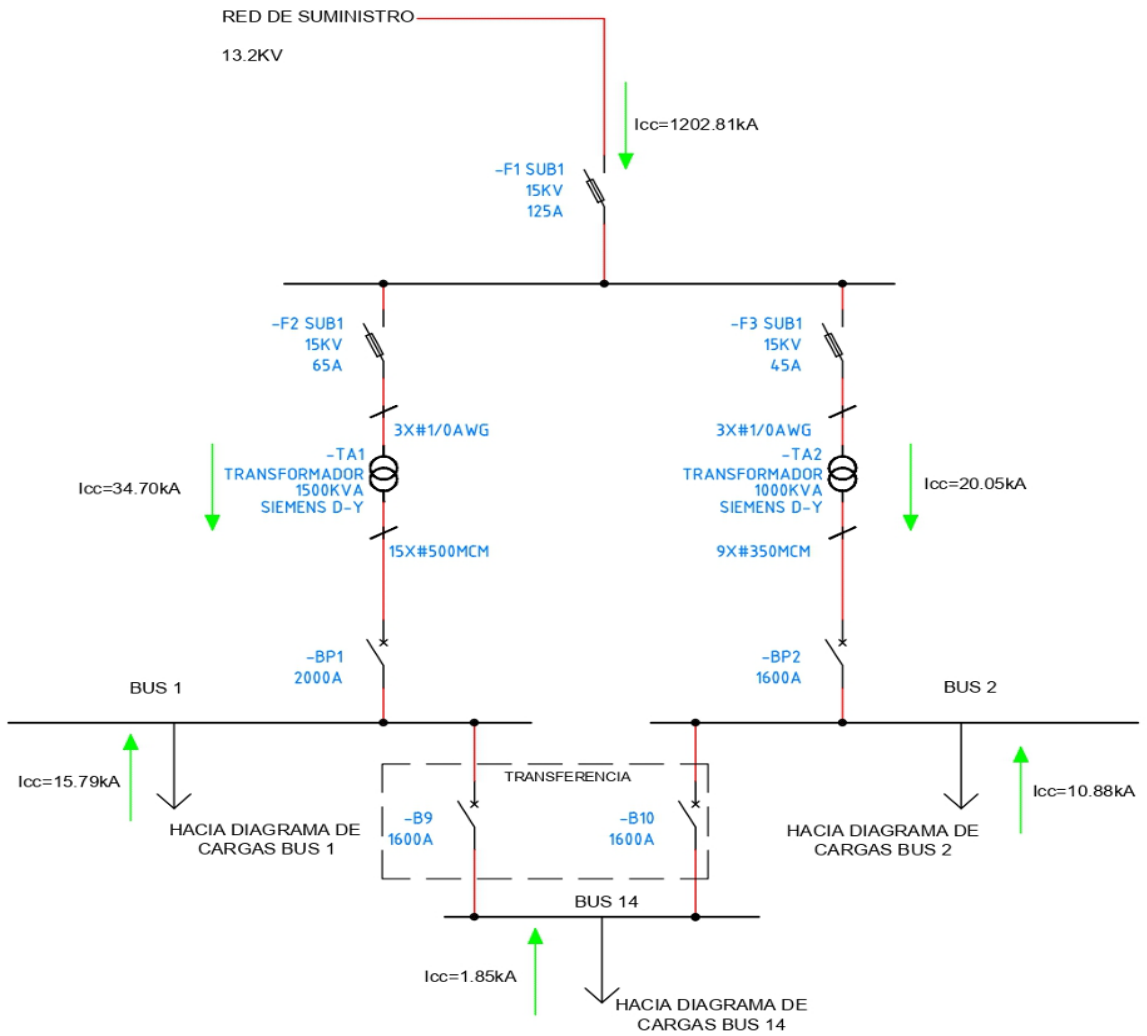
Descripción	X''	I <sub>cc</sub>	
<i>Red externa</i>	0,00150	<b>1 202,81</b>	<u>kA</u>
<i>Transformador 1</i>	0,05200	<b>34,70</b>	<u>kA</u>
<i>Transformador 2</i>	0,09000	<b>20,05</b>	<u>kA</u>
<i>Bus 1</i>	0,11426	<b>15,79</b>	<u>kA</u>
<i>Bus 14</i>	0,97468	<b>1,85</b>	<u>kA</u>
<i>Bus 2</i>	0,16579	<b>10,88</b>	<u>kA</u>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel (versión 16.59).

La importancia del estudio de cortocircuito reside en la capacidad de falla de cada punto de la red eléctrica, es por ello que es vital en la evaluación de una nueva instalación eléctrica, pues es la base para la selección de protecciones eléctricas, el diseño completo de la red y el estudio de arco eléctrico.



Figura 46. **Análisis de cortocircito-corrientes de falla**



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.



## 4. CÁLCULO DE ARCO ELÉCTRICO

### 4.1. Estudio de cortocircuito utilizando Easy Power

Los cálculos de cortocircuito del capítulo 3 muestran los buses principales, sin embargo, para obtener las corrientes de circuito en cada bus se ha utilizado la herramienta Easy Power, la cual ofrece el análisis de cortocircuito al crear el diagrama unifilar completo dentro del programa. La sección 5.1 muestra el proceso que conlleva realizar un diagrama unifilar en dicha herramienta.

Tabla XII. **Corrientes de falla disponibles por bus**

Bus	Voltaje de operación (kV)	Protección aguas arriba		Bus aguas arriba	Corriente de cortocircuito sólido en bus (kA)
<i>BUS PRINCIPAL</i>	13,2	BL-86	SQD175GXQSD 125E	BUS 1	<b>40,66</b>
<i>BUS 1</i>	0,48	BL-86	Siemens 3WL52 2000A	BUS 1	<b>77,915</b>
<i>BUS 2</i>	0,48	BL-96_A	Siemens 3WL52 1600A	BUS 2	<b>71,068</b>
<i>BUS 3</i>	0,48	BL-90	Siemens CJD6 400A	BUS 1	<b>18,106</b>
<i>BUS 4</i>	0,48	BL-11	Siemens VL250H 180A	BUS 3	<b>16,438</b>
<i>BUS 5</i>	0,24	BL-84	Siemens VL630H 450A	BUS 5	<b>6,517</b>
<i>BUS 6</i>	0,48	BL-91	Siemens FFC 225A	BUS 1	<b>52,669</b>
<i>BUS 7</i>	0,48	BL-92	Siemens CJD6 350A	BUS 1	<b>14,351</b>
<i>BUS 8</i>	0,48	BL-28	Siemens VL150H 100A	BUS 7	<b>14,351</b>
<i>BUS 9</i>	0,48	BL-29	Siemens VL150H 100A	BUS 7	<b>12,576</b>
<i>BUS 10</i>	0,48	BL-93	Siemens ED6 125A	BUS 1	<b>46,27</b>
<i>BUS 11</i>	0,48	BL-94	Siemens VL630H 450A	BUS 1	<b>77,915</b>
<i>BUS 12</i>	0,24	BL-6	Siemens VL630H 450A	BUS 11	<b>15,428</b>
<i>BUS 13</i>	0,24	BL-6	Siemens NXD6 900A	BUS 11	<b>14,32</b>
<i>BUS 14</i>	0,48	BL-95	Siemens 3WL51 1600A	BUS 1	<b>74,221</b>

Continuación tabla XII.

<i>BUS 15</i>	0,48	BL-49	Siemens FFC 225A	BUS 14	<b>74,221</b>
<i>BUS 16</i>	0,48	BL-61	Siemens CMD6 600A	BUS 16	<b>54,918</b>
<i>BUS 17</i>	0,48	BL-69	Siemens VL150H 30A	BUS 16	<b>54,918</b>
<i>BUS 18</i>	0,24	BL-73	Siemens ED6 100A	BUS 2	<b>7,255</b>
<i>BUS 19</i>	0,24	BL-73	Siemens VL630H 450A	BUS 2	<b>7,255</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

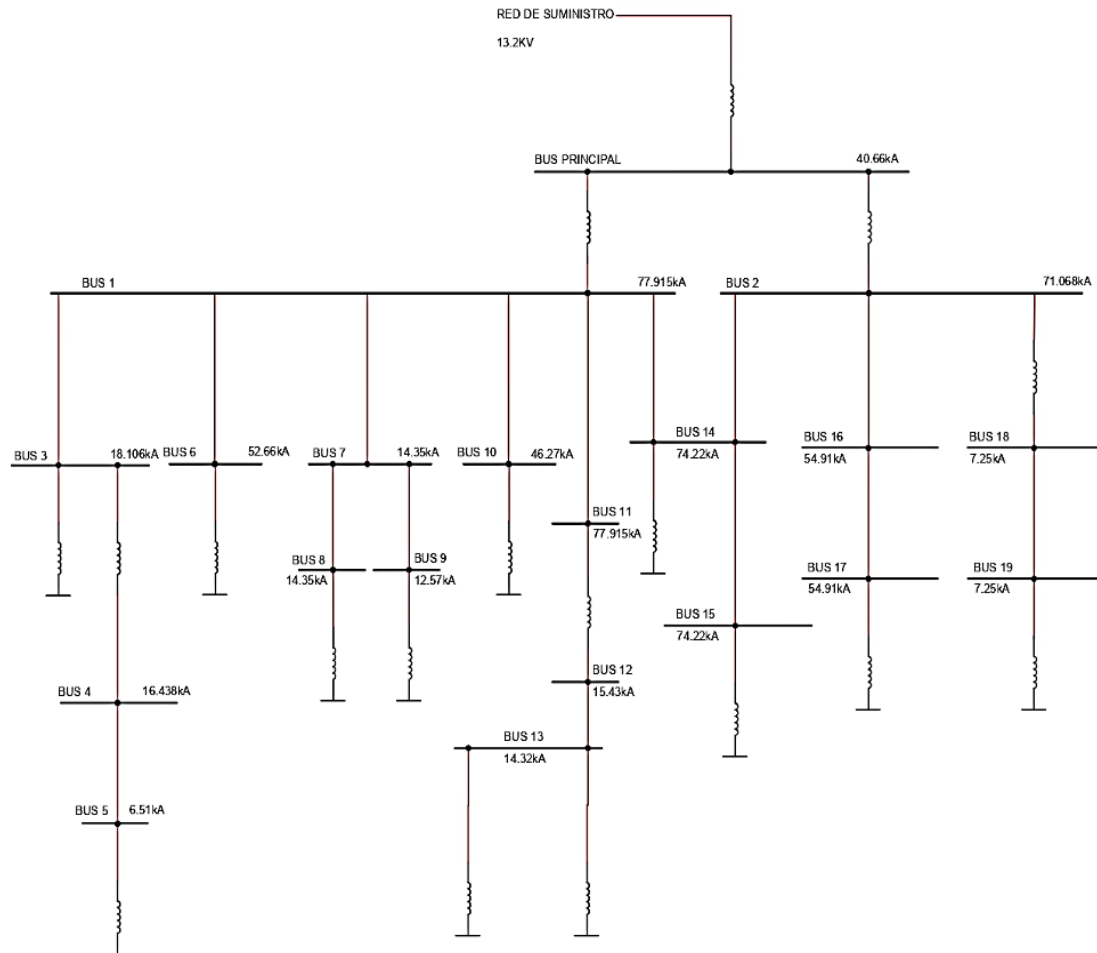
Una vez realizado el diagrama unifilar, se utiliza la herramienta *short circuit* (cortocircuito) y *fault buses* (cortocircuitar buses) para obtener los resultados detallados en la tabla XII. En ella de igual forma se puede apreciar la capacidad y modelo de la protección aguas arriba a cada bus. Estos datos serán de gran utilidad para realizar los cálculos de arco eléctrico.

#### **4.2. Antecedentes**

El diagrama unifilar completo de la instalación, el diagrama de reactancias, los cálculos de cortocircuito, las corrientes finales por bus; todo ello conlleva el procedimiento de preparación para realizar el estudio de arco eléctrico. Con tales antecedentes, los cálculos de arco eléctrico se reducen a determinar 3 conceptos clave: la corriente de arco eléctrico, la energía incidente y la frontera de relámpago de arco.

Medida en amperios, la corriente de arco eléctrico es aquella ocasionada al existir una falla que provoque un arco; aquella corriente que circula en el arco eléctrico. Este parámetro se calculará por medio del método de la IEEE 1584-2018, detallado en las ecuaciones 2-18 y 2-19.

Figura 47. Corrientes de cortocircuito por bus



Fuente: elaboración propia, empleando Electrical AutoCAD 2019.

La energía incidente es la cantidad de energía térmica expuesta en una superficie cualquiera debido a la generación de altas temperaturas por un arco eléctrico. Se calculará por medio de las ecuaciones del ensayo de Doughty Neal (2-15, 2-17) y con el método de la IEEE 1584-2018.

La frontera de relámpago de arco es aquella distancia desde el punto de origen del arco a la cual una persona puede sufrir una quemadura de segundo grado a una energía térmica de  $1,2 \text{ cal/cm}^2$ . De igual forma, este parámetro será calculado con las ecuaciones del Ensayo de Doughty Neal (2-15, 2-17) y con el método de la IEEE 1584-2018.

### **4.3. Cálculos del bus principal**

El bus principal cuenta con un voltaje de operación de 13,2 kV y una corriente de cortocircuito de 40,66kA referida al lado de alto voltaje. La figura 46 muestra una corriente de 1 202,81 kA, esta referida al lado de bajo voltaje, Al referirlo al mismo voltaje, se obtiene:

$$I_{cc_{13,2}} = \frac{480}{13,200} * 1202,806kA = 43,738kA \quad (4-1)$$

Sin embargo, para el cálculo se tomará la corriente obtenida por medio de la herramienta Easy Power, mostrada en la figura 47.

#### **4.3.1. Cálculos con NFPA 70E**

Por ser una barra superior a los 600V, para calcular la energía incidente se utilizará la ecuación 2-13 donde el voltaje está en kV, la corriente en kA, el tiempo en segundos y la distancia en mm.

La protección aguas arriba al bus principal es el fusible de la subestación SQD175GXQSJD 125E, para el cual el tiempo de liberación es de 0,082 segundos.

$$E = \frac{5,12 \times 10^5 \times 13,2kV \times 40,66kA \times 0,082s}{457,2^2} = 107,79 \text{ cal/cm}^2 \quad (4-2)$$

Utilizando la misma expresión, despejando para la distancia en mm, se realiza el cálculo de la frontera de relámpago de arco.

$$D = \sqrt{\frac{5,12 \times 10^5 \times 13,82V \times 40,66kA \times 0,082s}{1,2 \text{ cal/cm}^2}} = 4333,33mm \quad (4-3)$$

Lo cual es equivalente a 170,60 pulgadas.

La corriente de arco eléctrico es igual a la corriente de cortocircuito, dado que el método utilizado, Ralph Lee considera la falla máxima para los cálculos.

### 4.3.2. Cálculos con IEEE 1584-2018

Al tratarse de una barra de 13,2 kV, debe calcularse los parámetros a 600 V, 2 700 V y 14,300 V para luego hacer una interpolación al valor correcto. Para realizar el cálculo se utilizarán la ecuación 2-18 en los voltajes antes mencionados, lo que varía son las constantes k, de acuerdo a la tabla VI. La disposición del bus principal es de electrodos en disposición vertical según la tabla IV; la separación entre estos mismos es de 152 milímetros.

#### 4.3.2.1. Corriente de arco eléctrico

$$I_{Arc.Voc} = 10^{(k1+k2 \lg I_{bf} + k3 \lg G)} (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf} + k10) \quad (4-4)$$

Para 600 V:

$$\begin{aligned}k1 &= -0,04287; k2 = 1,035; k3 = -0,083; k4 = 0; k5 = 0; \\k6 &= -0,000000004783; k7 = 0,000001962; k8 = -0,000229; \\k9 &= 0,003141; k10 = 1,092\end{aligned}$$

$$I_{Arc\_600V} = 10^{(1,441525215)}(0,959936007) = 26,5318kA \quad (4-5)$$

Para 2 700 V:

$$\begin{aligned}k1 &= 0,0065; k2 = 1,001; k3 = -0,024; k4 = -0,00000000001557; \\k5 &= 0,000000004556; k6 = -0,00000004186; k7 = 0,0000008346; \\k8 &= 0,00005482; k9 = -0,003191; k10 = 0,9729\end{aligned}$$

$$I_{Arc\_2700V} = 10^{(1,564912296)}(0,919071357) = 33,749048kA \quad (4-6)$$

Para 14 300 V:

$$\begin{aligned}k1 &= 0,005795; k2 = 1,015; k3 = -0,011; k4 = -0,00000000001557; \\k5 &= 0,000000004556; k6 = -0,00000004186; k7 = 0,0000008346; \\k8 &= 0,00005482; k9 = -0,003191; k10 = 0,9729\end{aligned}$$

$$I_{Arc\_14300V} = 10^{(1,615099605)}(0,919071357) = 37,88339kA \quad (4-7)$$

La corriente de arco eléctrico final, para 13,2kV será la ecuación de acuerdo a la norma para voltajes mayores a 2,7 kV.



$$I_{Arc} = \frac{I_{Arc_{14300V}} - I_{Arc_{2700V}}}{11,6} (V_{OC} - 14,3) + I_{Arc_{14300V}} \quad (4-8)$$

$$I_{Arc} = \frac{37,88339 - 33,749048}{11,6} (13,2 - 14,3) + 37,88339 = 37,491kA \quad (4-9)$$

$$I_{Arc \text{ bus principal}} = 37,491kA$$

#### 4.3.2.2. Energía incidente

La energía incidente debe calcularse para 600 V, 2 700 V y 14 300 V utilizando las ecuaciones 2-20 y 2-21 para cada voltaje. El tiempo de liberación de falla es de 0,082 segundos para el fusible SQD175GXQSJD 125E. Las constantes k varían según la tabla XVII. La energía incidente será calculada a una distancia de 457,2 milímetros o 18 pulgadas.

$$E_{Voc} = \frac{12,522}{50} T \times 10^b \quad (4-10)$$

$$b = k1 + k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc Voc}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + \dots + k11 \lg I_{bf} + k12 \lg D + k13 \lg I_{arc Voc} + \lg \frac{1}{CF} \quad (4-11)$$

Para 600 V:

$$\begin{aligned} k1 &= 0,753364; \quad k2 = 0,566; \quad k3 = 1,752636; \quad k4 = 0; \quad k5 = 0; \\ k6 &= -0,000000004783; \quad k7 = 0,000001962; \quad k8 = -0,000229; \\ k9 &= 0,003141; \quad k10 = 1,092; \quad k11 = 0; \quad k12 = -1,598; \quad k13 = 0,957 \end{aligned}$$

$$E_{600V} = \frac{12,522}{50} (82) \times 10^{0,182796178} = 31,2833 J/cm^2 = 7,471cal/cm^2 \quad (4-12)$$

Para 2 700 V:

$$\begin{aligned}
 k1 &= 2,40021; \quad k2 = 0,165; \quad k3 = 0,354202; \quad k4 = -0,000000000001557; \\
 k5 &= 0,0000000004556; \quad k6 = -0,00000004186; \quad k7 = 0,0000008346; \\
 k8 &= 0,00005482; \quad k9 = -0,003191; \quad k10 = 0,9729; \quad k11 = 0; \\
 k12 &= -1,569; \quad k13 = 0,9778
 \end{aligned}$$

$$E_{2700V} = \frac{12,522}{50} (82) \times 10^{0,292163141} = 40,2421 \text{ J/cm}^2 = 9,6116 \text{ cal/cm}^2 \quad (4-13)$$

Para 14 300 V:

$$\begin{aligned}
 k1 &= 3,825917; \quad k2 = 0,11; \quad k3 = -0,999749; \quad k4 = -0,000000000001557; \\
 k5 &= 0,0000000004556; \quad k6 = -0,00000004186; \quad k7 = 0,0000008346; \\
 k8 &= 0,00005482; \quad k9 = -0,003191; \quad k10 = 0,9729; \quad k11 = 0; \\
 k12 &= -1,568; \quad k13 = 0,99
 \end{aligned}$$

$$E_{14300V} = \frac{12,522}{50} (82) \times 10^{0,335473832} = 44,4622 \text{ J/cm}^2 = 10,619 \text{ cal/cm}^2 \quad (4-14)$$

Conociendo los valores de energía incidente para cada voltaje, se procede a calcular la interpolación para 13,2 kV utilizando la expresión 4-15,

$$E_{inc} = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11,6} (V_{OC} - 14,3) + E_{14300} \quad (4-15)$$

$$E_{inc} = \frac{144,4622 - 40,2421}{11,6} (13,2 - 14,3) + 44,4622 = 44,06 \text{ J/cm}^2 \quad (4-16)$$

$$\mathbf{E_{bus\ principal} = 10,524 \text{ cal/cm}^2}$$

### 4.3.2.3. Frontera de relámpago de arco

De igual forma, la frontera de relámpago de arco debe calcularse para 600V, 2 700 V y 14 300 V para luego realizar la interpolación para 13,2 kV. El tiempo de liberación de falla es de 0,082 segundos para el fusible SQD175GXQSJD 125E. Las constantes k varían, según la tabla XVII al igual que para la energía incidente utilizando las ecuaciones 2-22 y 2-23.

$$AFB_{Voc} = 10^{\frac{c}{-k_{12}}} \quad (4-17)$$

$$c = k_1 + k_2 \lg G + \frac{k_3 I_{Voc}}{k_4 I_{bf}^7 + k_5 I_{bf}^6 + k_6 I_{bf}^5 + k_7 I_{bf}^4 + k_8 I_{bf}^3 + k_9 I_{bf}^2 + k_{10} I_{bf}} + \dots + k_{11} \lg I_{bf} + k_{13} \lg I_{arc} + \lg \frac{1}{CF} - \lg \frac{20}{T} \quad (4-18)$$

Para 600 V:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0,753364; \quad k_2 = 0,566; \quad k_3 = 1,752636; \quad k_4 = 0; \quad k_5 = 0; \\ k_6 &= -0,000000004783; \quad k_7 = 0,000001962; \quad k_8 = -0,000229; \\ k_9 &= 0,003141; \quad k_{10} = 1,092; \quad k_{11} = 0; \quad k_{12} = -1,598; \quad k_{13} = 0,957 \end{aligned}$$

$$AFB_{600V} = 10^{\frac{5,04642978}{-(-1,598)}} = 1438,69 \text{ mm } \acute{o} \text{ 56,64"} \quad (4-19)$$

Para 2 700 V:

$$\begin{aligned} k_1 &= 2,40021; \quad k_2 = 0,165; \quad k_3 = 0,354202; \quad k_4 = -0,0000000000001557; \\ k_5 &= 0,0000000004556; \quad k_6 = -0,00000004186; \quad k_7 = 0,0000008346; \\ k_8 &= 0,00005482; \quad k_9 = -0,003191; \quad k_{10} = 0,9729; \quad k_{11} = 0; \\ k_{12} &= -1,569; \quad k_{13} = 0,9778 \end{aligned}$$

$$AFB_{2700V} = 10^{\frac{5,07865366}{-(-1,569)}} = 1725,33 \text{ mm ó } 67,93'' \quad (4-20)$$

Para 14 300 V:

$$\begin{aligned} k1 &= 3,825917; \quad k2 = 0,11; \quad k3 = -0,999749; \quad k4 = -0,000000000001557; \\ k5 &= 0,0000000004556; \quad k6 = -0,00000004186; \quad k7 = 0,0000008346; \\ k8 &= 0,00005482; \quad k9 = -0,003191; \quad k10 = 0,9729; \quad k11 = 0; \\ k12 &= -1,568; \quad k13 = 0,99 \end{aligned}$$

$$AFB_{14300V} = 10^{\frac{5,119304245}{-(-1,568)}} = 1840,19 \text{ mm ó } 72,45'' \quad (4-21)$$

Conociendo los valores de frontera de relámpago de arco para cada voltaje, se procede a calcular la interpolación de acuerdo a la ecuación 4-22.

$$AFB_{13,2} = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11,6} (V_{OC} - 14,3) + AFB_{14300} \quad (4-22)$$

$$AFB_{13,2} = \frac{1840,19 - 1725,33}{11,6} (13,2 - 14,3) + 1840,19 = 1829,19 \text{ mm ó } 72,02'' \quad (4-23)$$

$$AFB_{bus \text{ principal}} = 72,02''$$

Tabla XIII. **Comparación de cálculos de bus principal**

Descripción	NFPA 70E	IEEE 1584-2018
Corriente de arco eléctrico (kA)	<b>40,66</b>	<b>37,49</b>
Energía incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	<b>107,79</b>	<b>10,52</b>
Frontera de relámpago de arco (pulgadas)	<b>170,60</b>	<b>72,02</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Puede notarse como la Norma NFPA 70E toma el peor caso posible para la falla de arco eléctrico, mientras que los resultados de la IEEE 1584-2018 son más conservadores. Los cálculos más complejos y exactos son los de la IEEE, dado que se han realizado pruebas de laboratorio para confirmar los resultados obtenidos por medio del método.

Al analizar los resultados de la NFPA 70E, el bus principal estaría en un nivel de alto riesgo, por fuera de los valores de los niveles de EPP descritos en la tabla VIII. La energía incidente excede hasta en 60 calorías por centímetro cuadrado al límite superior de los niveles de protección.

Al contrario, los resultados de la IEEE colocan al bus principal en una categoría de protección número 3, y una persona debe estar a 72,02 pulgadas del bus principal para sufrir una quemadura de segundo grado.

De cualquier manera, en ambos casos, es demasiado riesgoso acercarse a menos de 72,02 pulgadas sin protección, por lo que se convierte en el punto con más riesgo de arco eléctrico en toda la instalación eléctrica.

#### **4.4. Cálculos de buses 1, 2 y 14**

Los buses 1, 2 y 14 son los buses principales en 480V de la instalación; sus electrodos están en disposición vertical, según la tabla VIII; la separación entre estos mismos es de 32 milímetros.

El bus 1 tiene una corriente de cortocircuito sólido de 77,915kA, protegido por un interruptor Siemens 3WL52 de 2000A y tiempo de liberación de falla de 0,082 segundos.

La corriente de cortocircuito del bus 2 es de 71,068 kA y está protegido con un interruptor Siemens 3 WL52 de 1600 A con un tiempo de liberación de falla de 0,082 segundos.

De igual forma, el bus 14 cuenta con una corriente de cortocircuito de 74,221 kA, protegido por un interruptor Siemens 3WL51 1 600 A y un tiempo de liberación de falla de 0,082 segundos.

Las ecuaciones 2-15 y 2-17 detallan el método de cálculo para arco eléctrico en cajas de 20 pulgadas para corrientes de falla entre 16 – 50 kA; debido a ello, los buses 1, 2 y 14 no entran en las corrientes del modelo por lo que no se recomienda utilizarlas para calcular la energía incidente o la frontera de arco eléctrico pues los resultados serían muy alejados a la realidad. Como consecuencia, solamente se utilizará el método de la IEEE 1584-2018 para estos tres buses.

#### 4.4.1. Corriente de arco eléctrico

Con la ecuación 4-4 para 600 V:

$$\begin{aligned}k1 &= -0,04287; \quad k2 = 1,035; \quad k3 = -0,083; \quad k4 = 0; \quad k5 = 0; \\k6 &= -0,000000004783; \quad k7 = 0,000001962; \quad k8 = -0,000229; \\k9 &= 0,003141; \quad k10 = 1,092\end{aligned}$$

$$I_{Arc600V} = 10^{(1,790030364)}(0,698287807) = 43,059kA \quad (4-24)$$

Utilizando la ecuación 2-19:

Bus 1

$$I_{arc\ bus\ 1} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{0,48}\right]^2 \times \left[\frac{1}{43,059^2} - \left(\frac{0,6^2 - 0,48^2}{0,6^2 \times 77,915^2}\right)\right]}} = 36,513kA \quad (4-25)$$

$$I_{Arc\ bus\ 1} = 36,513kA$$

Bus 2

$$I_{arc\ bus\ 2} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{0,48}\right]^2 \times \left[\frac{1}{43,059^2} - \left(\frac{0,6^2 - 0,48^2}{0,6^2 \times 71,068^2}\right)\right]}} = 35,481kA \quad (4-26)$$

$$I_{Arc\ bus\ 2} = 35,481kA$$

Bus 14

$$I_{arc\ bus\ 14} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0,6}{0,48}\right]^2 \times \left[\frac{1}{43,059^2} - \left(\frac{0,6^2 - 0,48^2}{0,6^2 \times 74,221^2}\right)\right]}} = 35,973kA \quad (4-27)$$

$$I_{Arc\ bus\ 14} = 35,973kA$$

#### 4.4.2. Energía incidente

Utilizando las ecuaciones 4-10 y 4-11 para 600 V:

$$k1 = 0,753364; \quad k2 = 0,566; \quad k3 = 1,752636; \quad k4 = 0; \quad k5 = 0;$$

$$k6 = -0,000000004783; \quad k7 = 0,000001962; \quad k8 = -0,000229;$$

$$k_9 = 0,003141; \quad k_{10} = 1,092; \quad k_{11} = 0; \quad k_{12} = -1,598; \quad k_{13} = 0,957$$

Bus 1

$$E_{bus\ 1} = \frac{12,522}{50} (82) \times 10^{0,236769624} = 35,42 \text{ J/cm}^2 = 8,460 \text{ cal/cm}^2 \quad (4-28)$$

$$E_{bus\ 1} = 8,460 \text{ cal/cm}^2$$

Bus 2

$$E_{bus\ 2} = \frac{12,522}{50} (82) \times 10^{0,220399194} = 34,1127 \text{ J/cm}^2 = 8,1476 \text{ cal/cm}^2 \quad (4-29)$$

$$E_{bus\ 2} = 8,1476 \text{ cal/cm}^2$$

Bus 14

$$E_{bus\ 14} = \frac{12,522}{50} (82) \times 10^{0,228217879} = 35,732 \text{ J/cm}^2 = 8,2957 \text{ cal/cm}^2 \quad (4-30)$$

$$E_{bus\ 14} = 8,30 \text{ cal/cm}^2$$

#### 4.4.3. Frontera de relámpago de arco

Utilizando las ecuaciones 2-23 y 2-24 para 600 V:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0,753364; \quad k_2 = 0,566; \quad k_3 = 1,752636; \quad k_4 = 0; \quad k_5 = 0; \\ k_6 &= -0,000000004783; \quad k_7 = 0,000001962; \quad k_8 = -0,000229; \\ k_9 &= 0,003141; \quad k_{10} = 1,092; \quad k_{11} = 0; \quad k_{12} = -1,598; \quad k_{13} = 0,957 \end{aligned}$$

Bus 1

$$AFB_{bus\ 1} = 10^{\frac{5,100403223}{-(-1,598)}} = 1555,04 \text{ mm} \text{ ó } 61,22" \quad (4-31)$$

$$AFB_{bus\ 1} = 61,22"$$



Bus 2

$$AFB_{bus\ 2} = 10^{\frac{5,084032793}{-(-1,598)}} = 1518,78mm \text{ ó } 59,794''$$
$$AFB_{bus\ 2} = 59,79'' \quad (4-32)$$

Bus 14

$$AFB_{bus\ 14} = 10^{\frac{5,091851478}{-(-1,598)}} = 1535,99mm \text{ ó } 60,47''$$
$$AFB_{bus\ 14} = 60,47'' \quad (4-33)$$

Los resultados para los buses principales en 480 V muestran que los 3 están entre  $8\text{ cal/cm}^2$  y  $25\text{ cal/cm}^2$ ; lo que corresponde a un nivel de protección número 3. Las distancias a la que una quemadura de segundo grado podría ocurrir son mayores a las 59 pulgadas; las corrientes de arco son menos que la mitad de la corriente total de cortocircuito.

Tabla XIV. **Resultados de arco eléctrico buses 1, 2 y 14**

Descripción	BUS 1	BUS 2	BUS 14
Corriente de arco eléctrico (kA)	36,51	35,48	35,97
Energía incidente (cal/cm <sup>2</sup> )	8,46	8,15	8,30
Frontera de relámpago de arco (pulgadas)	61,22	59,79	60,47

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

#### 4.5. Resultados de arco eléctrico en todos los buses

Como ha podido apreciarse en los incisos 4.3 y 4.4, los cálculos para los parámetros de arco eléctrico son muy mecánicos, por lo que basta realizar una hoja de cálculo para reducir el procedimiento.

Se ha visto que en algunos casos el método de la NFPA 70E no es aplicable, por lo que para el estudio se utilizará el método de la IEEE, pues este es el más adecuado para realizarlo.

Las tablas XV y XVI muestran el resumen de resultados de los parámetros de arco eléctrico para toda la industria procesadora de embutidos. Los cálculos fueron efectuados por el método estadístico IEEE 1584-2018 con el procedimiento utilizado en los cálculos del bus principal, bus 1, bus 2 y bus 14.

La mayor corriente de arco eléctrico está presente en el bus principal, siendo esta de 37,49 kA y, por lo tanto la mayor energía incidente está presente en este bus también, siendo de  $10,52 \text{ cal/cm}^2$ . Esto se deriva en que la distancia de relámpago de arco sea de 72,02 pulgadas. El menor impacto corresponde al bus 5 con  $0,22 \text{ cal/cm}^2$ ; su corriente de arco es de 3,07 kA.

Tabla XV. **Datos por bus utilizados para el cálculo**

Bus	Voltaje de operación (kV)	Corriente de cortocircuito sólido (kA)	Tiempo de arco eléctrico (s)	Separación entre electrodos (mm)
<i>BUS PRINCIPAL</i>	13,2	40,66	0,082	<b>152</b>
<i>BUS 1</i>	0,48	77,915	0,082	<b>32</b>
<i>BUS 2</i>	0,48	71,068	0,082	<b>32</b>
<i>BUS 3</i>	0,48	18,106	0,026	<b>32</b>
<i>BUS 4</i>	0,48	16,438	0,019	<b>32</b>
<i>BUS 5</i>	0,24	6,517	0,03	<b>32</b>
<i>BUS 6</i>	0,48	52,669	0,01	<b>32</b>
<i>BUS 7</i>	0,48	14,351	0,03	<b>32</b>

Continuación tabla XV.

<i>BUS 8</i>	0,48	14,351	0,016	<b>32</b>
<i>BUS 9</i>	0,48	12,576	0,017	<b>32</b>
<i>BUS 10</i>	0,48	46,27	0,011	<b>32</b>
<i>BUS 11</i>	0,48	77,915	0,03	<b>32</b>
<i>BUS 12</i>	0,24	15,428	0,03	<b>32</b>
<i>BUS 13</i>	0,24	14,32	0,03	<b>32</b>
<i>BUS 14</i>	0,48	74,221	0,082	<b>32</b>
<i>BUS 15</i>	0,48	74,221	0,01	<b>32</b>
<i>BUS 16</i>	0,48	54,918	0,015	<b>32</b>
<i>BUS 17</i>	0,48	54,918	0,01	<b>32</b>
<i>BUS 18</i>	0,24	7,255	0,023	<b>32</b>
<i>BUS 19</i>	0,24	7,255	0,023	<b>32</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel (versión 16.59).

Tabla XVI. **Resultados de arco eléctrico en todos los buses**

Bus	Corriente de arco eléctrico (kA)	Energía incidente cal/cm <sup>2</sup>	Frontera de arco eléctrico (µg)
<i>BUS PRINCIPAL</i>	<b>37,49</b>	<b>10,52</b>	<b>72,02</b>
<i>BUS 1</i>	<b>36,51</b>	<b>8,46</b>	<b>61,22</b>
<i>BUS 2</i>	<b>35,48</b>	<b>8,15</b>	<b>59,79</b>
<i>BUS 3</i>	<b>13,55</b>	<b>0,89</b>	<b>14,92</b>
<i>BUS 4</i>	<b>12,33</b>	<b>0,59</b>	<b>11,51</b>
<i>BUS 5</i>	<b>3,07</b>	<b>0,22</b>	<b>6,27</b>
<i>BUS 6</i>	<b>31,42</b>	<b>0,86</b>	<b>14,60</b>
<i>BUS 7</i>	<b>10,76</b>	<b>0,80</b>	<b>14,00</b>

Continuación tabla XVI.

<i>BUS 8</i>	<b>10,76</b>	<b>0,43</b>	<b>9,45</b>
<i>BUS 9</i>	<b>9,42</b>	<b>0,39</b>	<b>8,98</b>
<i>BUS 10</i>	<b>29,28</b>	<b>0,87</b>	<b>14,72</b>
<i>BUS 11</i>	<b>36,51</b>	<b>3,10</b>	<b>32,63</b>
<i>BUS 12</i>	<b>7,61</b>	<b>0,58</b>	<b>11,43</b>
<i>BUS 13</i>	<b>7,06</b>	<b>0,53</b>	<b>10,87</b>
<i>BUS 14</i>	<b>35,97</b>	<b>8,30</b>	<b>60,47</b>
<i>BUS 15</i>	<b>35,97</b>	<b>1,01</b>	<b>16,21</b>
<i>BUS 16</i>	<b>32,07</b>	<b>1,31</b>	<b>19,10</b>
<i>BUS 17</i>	<b>32,07</b>	<b>0,88</b>	<b>14,82</b>
<i>BUS 18</i>	<b>3,45</b>	<b>0,19</b>	<b>5,73</b>
<i>BUS 19</i>	<b>3,45</b>	<b>0,19</b>	<b>5,73</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Una manera de clasificar adecuadamente los riesgos de toda la instalación es mediante las categorías de equipo de protección personal, que además de clasificar el riesgo, permiten conocer el EPP necesario para operar dichos tableros.

Tabla XVII. **Categorías de EPP para arco eléctrico**

Categoría de EPP	Energía incidente	Buses
1	$E \leq 4 \text{ cal/cm}^2$	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19

Continuación tabla XVII.

2	$4 \text{ cal/cm}^2 < E < 8 \text{ cal/cm}^2$	-
3	$8 \text{ cal/cm}^2 < E < 25 \text{ cal/cm}^2$	Bus principal 1, 2, 14
4	$25 \text{ cal/cm}^2 < E < 40 \text{ cal/cm}^2$	-

Fuente: NFPA 70E, tabla 130.7(C)(15)(c) *Equipo de protección personal (EPP)*. p. 41.



## **5. SIMULACIÓN DE ARCO ELÉCTRICO UTILIZANDO EASY POWER**

Las herramientas tecnológicas para ingeniería son de gran utilidad para la simplificación de cálculos y rapidez en crear simulaciones con parámetros reales, sin embargo, deben de ser bien empleadas, conociendo a profundidad el tema de interés para así parametrizar adecuadamente el cálculo a realizar.

Easy Power es un producto especializado en estudios de cortocircuito, arco eléctrico y análisis de fallas. En él puede crearse diagramas unifilares completos o plantear escenarios de falla monofásica, bifásica y trifásica. Además, cuenta con módulos adicionales para cálculos más especializados de potencia, dimensionamiento de protecciones, transformadores, arco eléctrico, cortocircuito, transientes, entre otros.

Referente al estudio de arco eléctrico, el programa permite realizar la simulación y los cálculos de corriente de arco eléctrico, distancias de seguridad, energía incidente, tiempo de arco eléctrico, entre otros; todos ellos de acuerdo con la norma a elección del usuario (IEEE 1584-2018, IEEE 1584-2002, NFPA 70E).

Lo primordial para realizar el estudio de arco eléctrico en esta herramienta es crear el diagrama unifilar completo, incluyendo potencias de motores, eficiencias, reactancias, transformadores y todos los elementos existentes, bien parametrizados de la red; las protecciones eléctricas bien configuradas, elegidas de acuerdo con los modelos existentes físicamente.

Una vez el diagrama unifilar está terminado, el siguiente paso es realizar un estudio de cortocircuito para determinar la corriente de cortocircuito por bus; a partir de ello, la parametrización para el cálculo de cortocircuito. La herramienta ofrece adicionalmente la creación de reportes donde se aprecian los parámetros calculados y etiquetas de seguridad para los equipos de la instalación, de acuerdo con las normas de seguridad eléctrica de la NFPA 70E.

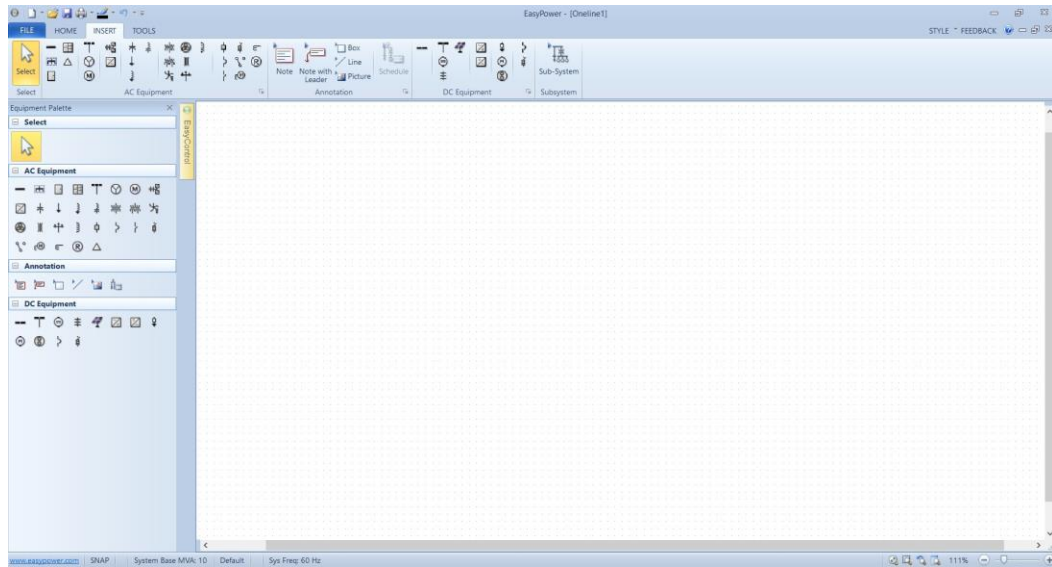
### **5.1. Creación de un diagrama unifilar**

El paso más importante para cualquier análisis dentro de la herramienta es la creación del diagrama unifilar. Easy Power cuenta con dos formas de insertar nuevos elementos dentro del espacio de trabajo. La parte superior del espacio de trabajo muestra las pestañas Home, Insert y Tools.

La primera pestaña muestra opciones de pegar, copiar, desconectar, conectar, diseño, análisis entre otras. La segunda pestaña muestra todos los equipos que pueden insertarse dentro del espacio de trabajo, así como algunas opciones de anotaciones. La tercera pestaña muestra opciones del formato y manejo de la licencia.



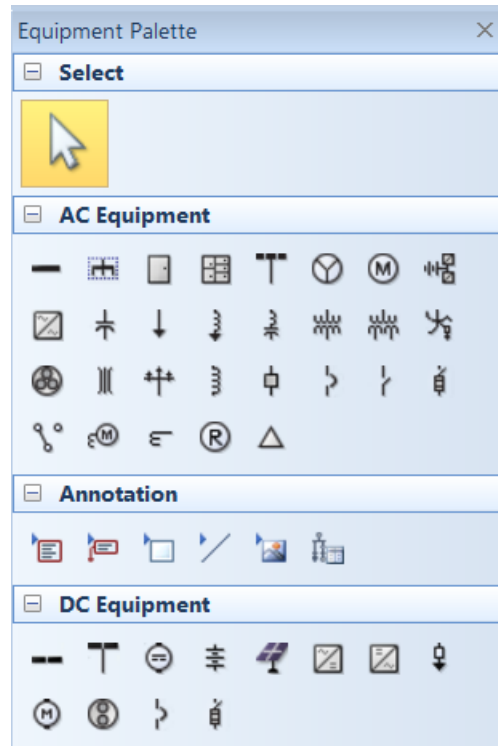
Figura 48. **Espacio de trabajo en Easy Power**



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

Además de la pestaña *insert*, lado izquierdo, se despliega la paleta de equipos, los cuales pueden arrastrarse hacia el área de trabajo. De cualquiera de las dos formas, los equipos pueden ser añadidos.

Figura 49. Paleta de equipos Easy Power












Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

La tabla XVIII muestra los equipos utilizados en el estudio de arco eléctrico. Easy Power trabaja por defecto los símbolos de acuerdo con la Norma ANSI; para seleccionar norma IEC es necesario ir a Tools > Options > One-line Symbols > Base Symbols y seleccionar la norma de preferencia del usuario.

Para insertar un equipo, seleccionar el deseado y arrastrar al área de trabajo. Una vez insertado, una ventana de diálogo se abrirá con todos los parámetros del elemento. En esta ventana puede configurarse el modelo, potencia, factor de potencia, entre otros. Es muy importante configurar los elementos con todos los datos requeridos, pues la variación de los mismos puede resultar en resultados inválidos.

Tabla XVIII. **Listado de equipos utilizados en el estudio de arco eléctrico**

Nombre en inglés	Traducción	Símbolo	Función
<i>Bus</i>	Bus		Emplea la función de tablero principal o secundario
<i>Switchgear</i>	Subestación industrial		Subestación principal en 13,2kV
<i>Utility</i>	Utilidad		Referencia de voltaje y potencia de cortocircuito principal
<i>Generator</i>	Generador		Utilizado en representación de un generador de corriente alterna trifásico
<i>Motor</i>	<i>Motor</i>		Utilizado en representación de un motor de inducción
<i>Capacitor</i>	Capacitor		Banco de capacitores en kVAR
<i>Two Winding Transformer</i>	Transformador de dos devanados		Transformadores de potencia de 13,2kV a 480V
<i>LV breaker</i>	Interruptor de bajo voltaje		Interruptores o <i>breakers</i> de bajo voltaje
<i>Fused Switch</i>	<i>Switch</i> con fusible		Fusibles de subestación industrial de media tensión

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

### 5.1.1. Parámetros necesarios para los buses

Los datos necesarios para configurar un bus son:

- ID o nombre del bus.
- Tipo de bus (panel, *switchgear*, aire libre, entre otros).
- Material (cobre o aluminio).
- Voltaje del bus (kV).

- En la sección *Arc Flash Hazard > Trip times for this bus* seleccionar *TCC times (auto calculated)* para configurar el bus con el cálculo global de arco eléctrico.

El resto de los parámetros deben quedarse por defecto.

Figura 50. Datos de buses y *switchgear*

The screenshot shows the 'Bus Data' configuration window. At the top, there are navigation icons and a 'Collected Data >' link. The main content area is divided into several sections:

- Connection Information:** Includes 'ID Name' (BUS 1), 'Phase' (3-Phase), and 'Base kV (LL)' (0.48). There is a 'Lock Auto-Sizing' checkbox.
- Specifications:** A tabbed interface with 'Switchgear' selected. It includes:
  - Bus Type:** Other (dropdown), AC.
  - Bus Rating:** Mfr, Rating (A), Type, Bracing, and kA Symmetrical (dropdown).
  - Material:** Material (Other dropdown), Mounting (Surface dropdown).
  - Area:** 1, **Zone:** 1, and **Device Code:** (empty field).
  - One-line Graphics:** Line Style (None dropdown) and Show Pad Symbol checkbox.

At the bottom, there are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

### 5.1.2. Parámetros necesarios para la subestación industrial

Los datos necesarios para configurar un bus de *switchgear* son:

- ID o nombre del bus.
- Tipo de bus (panel, *switchgear*, aire libre, entre otros).
- Material (cobre o aluminio).
- Voltaje del bus (kV).
- En la sección *Arc Flash Hazard > Trip times for this bus* seleccionar *TCC times (auto calculated)* para configurar el bus con el cálculo global de arco eléctrico.
- El resto de los parámetros, deben quedarse por defecto.

### **5.1.3. Parámetros necesarios para referencia de voltaje principal**

Los datos necesarios para configurar la referencia de voltaje principal como el elemento *Utility*:

- ID de la red
- Voltaje del bus (kV)
- Unidad de falla seleccionarla a MVA
- Potencia de cortocircuito trifásico y monofásico
- El resto de los parámetros, deben quedarse por defecto

### **5.1.4. Parámetros necesarios para los generadores**

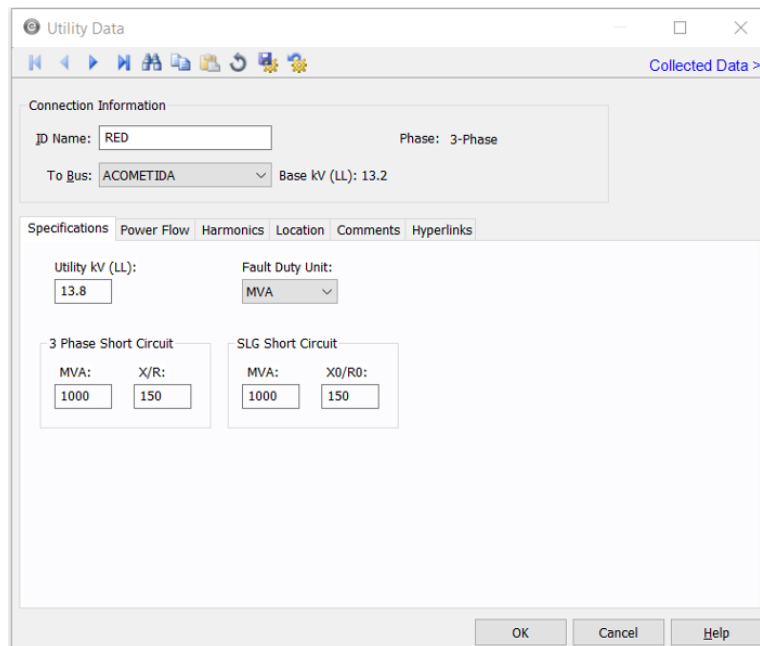
Los datos necesarios para los generadores son:

- Voltaje nominal (kV)
- ID del generador
- Potencia (kVA)
- Tipo de conexión

- Eficiencia
- Factor de potencia
- Impedancia transitoria
- Impedancia subtransitoria

El resto de los parámetros, deben quedarse por defecto.

**Figura 51. Datos de utilidad**



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

### **5.1.5. Parámetros necesarios para los motores**

Los datos necesarios para los motores son:

- Voltaje nominal (kV)
- ID del motor
- Tipo de conexión

- Potencia (HP)
- Eficiencia
- Factor de potencia
- Factor de servicio
- Norma para estudio de cortocircuito (ANSI o IEC)
- RPM

El resto de los parámetros, deben quedarse por defecto.

Figura 52. Datos de generadores

The screenshot shows the 'Generator Data' dialog box with the following fields and values:

- Connection Information:**
  - ID Name: GEN-1
  - To Bus: BUS 1
  - Base kV (LL): 0.48
  - Phase: 3-Phase
  - Conn:  D  Y  YG
- Specifications:**
  - Rated kV (LL): 0.48
  - Rating: 1000 kVA
  - Type: SYN-SPA
  - Power Factor: 0.8
  - Efficiency: 0.95
  - RPM: 3600

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Help.

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

Figura 53. Datos de motores

The screenshot shows the 'Motor Data' window in a software application. The window title is 'Motor Data' and it has standard window controls (minimize, maximize, close). The interface is divided into several sections:

- Connection Information:** ID Name: M-4, Phase: 3-Phase, To Bus: BUS 3, Base kV (LL): 0.48, Conn: D (selected), Y, YG.
- Model:** Individual (selected), Group.
- Specifications:** Unit: U.S., Power Type: NPS, kV: 0.46, HP: 10, Sync RPM: 1800, kVA = 9.99732, FLA: [empty], PF: 0.82, Eff: 0.91, Service Factor: 1.15, Demand Factor: 1, Load Class: Non-essential.
- One-line Graphics:** With Adjustable Frequency Drive (AFD) (unchecked), Type: Induction.

At the bottom of the window are buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

### 5.1.6. Parámetros necesarios para los capacitores

Los datos necesarios para los capacitores son:

- Voltaje nominal (kV)
- ID del banco de capacitores
- Tamaño del banco de capacitores (kVAR)

El resto de los parámetros, deben quedarse por defecto.



Figura 54. Datos de bancos de capacitores

Capacitor Data

Collected Data >

Connection Information

ID Name: CAP-1 Phase: 3-Phase

To Bus: BUS 1 Base kV (LL): 0.48

Specifications Harmonics Location Comments Hyperlinks

Rated kV (LL): 0.48 Rated Size: 200 kVAR

Inrush

Rated FLA x 4

Cycles: 6

OK Cancel Help

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

### 5.1.7. Parámetros necesarios para los transformadores

Los datos necesarios para los transformadores son:

- Voltaje nominal primario (kV)
- Voltaje nominal secundario (kV)
- ID del transformador
- Estándar (IEC o ANSI)
- Tipo (Aceite, seco, entre otros)
- Clase (ONAN, ONAF, entre otros)

- Temperatura
- Tipo de núcleo
- Tipo de conexión primaria y secundaria
- Impedancia %

Figura 55. Datos de transformadores

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

### 5.1.8. Parámetros necesarios para los interruptores

Los datos necesarios para los interruptores son:

- Voltaje nominal (kV)
- Clase (LVPCB, ICCB, MCCB)
- ID del interruptor

- Seleccionar el modelo y marca
- Seleccionar el tipo de disparo
- Corriente de cortocircuito (kA)
- Seleccionar el nivel de disparo termomagnético y el tiempo de liberación

El resto de los parámetros, deben quedarse por defecto.

Figura 56. Datos de interruptores

The screenshot shows the 'LV Breaker Data' configuration window. The 'Connection Information' section includes: ID Name: BL-96, On Bus: BUS 1, Base kV (LL): 0.48, Connection Type: Feeder, and Phase: 3-Phase. The 'Specifications' section shows: Class: LVPCB (selected), Breaker Mfr: Siemens, Breaker Type: 3WL5 [IEC], Breaker Style: 3WL52-20, Standard: IEC, and One-line Graphics: Breaker Only (selected). The 'Trip' section shows: Trip: Solid State Trip, and the 'Solid State Trip' sub-section includes: Mfr: Siemens, Type: ETU 25B [IEC], Style: 3WL5, Frame: 2000, and Plug: 2000.

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

### **5.1.9. Parámetros necesarios para los interruptores con fusibles**

Los datos necesarios para los interruptores con fusible son:

- Voltaje nominal (kV)
- ID del interruptor
- Seleccionar el modelo y marca
- Seleccionar el modelo y capacidad del fusible
- Corriente de cortocircuito (kA)

El resto de los parámetros deben quedarse por defecto.

Figura 57. Datos de interruptores con fusibles

Fused Switch Data

Collected Data >

Connection Information

ID Name: FUSIBLE 1

On Bus: BUS PRINCIPAL

Base kV (LL): 13.2

Connection Type: Bus Tie

Open Closed

Lock Auto-Sizing

Lock Auto-Coordination

Specifications Short Circuit Switch Mtr O/L Harmonics Stability Comments Hyperlinks

Mfr: Square D Type: Type DIN/E Style: 175GXQSJD Find Style

Standard: ANSI

One-line Graphics

Fuse Only Fused Switch Fused Contactor

Plot Phase TCC

Model: DIN/E Parallel Library kV: 15.5 Size: 125E View Notes...

One-line Data Text

Automatic (Based on 'Size')

User Specified Field:

OK Cancel Help

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

## 5.2. Simulación del análisis de cortocircuito

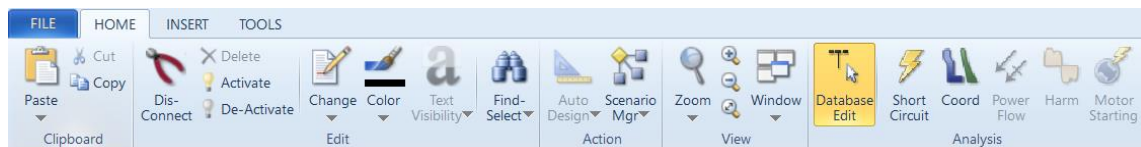
Todos los elementos utilizados para realizar el diagrama unifilar en Easy Power fueron discutidos en el punto anterior; con su utilización y correcta parametrización se obtuvo el resultado de las figuras de la 62 a la 65. Puede compararse con el diagrama unifilar presentado en el capítulo 3; se comprueba así la inclusión de todos los elementos del diagrama original.

Los resultados del análisis de cortocircuito utilizando esta herramienta fueron utilizados en el capítulo 4 como base para el cálculo de arco eléctrico, aprovechando la herramienta para simplificar el estudio de cortocircuito. De igual forma, el cálculo teórico se presentó en el capítulo 3, en el cual se nota el procedimiento completo que conlleva realizarlo sin ayuda de *software*.

Una vez obtenido el diagrama unifilar, para determinar las corrientes de cortocircuito en cada bus se debe seguir los siguientes pasos:

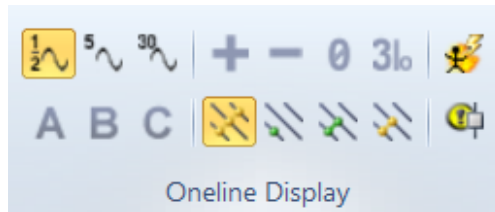
- Realizar una revisión final con el propósito de confirmar que todos los dispositivos están conectados y bien parametrizados; revisar las protecciones eléctricas con detenimiento para asegurarse que los tiempos de liberación de falla son correctos.
- En la pestaña Home, seleccionar *Short circuit*.
- Al seleccionar *Short circuit* aparecerá un nuevo menú. Dentro de él, se encontrará una sección llamada *Online display*. Dicha sección debe estar seleccionada como la figura 59. Al hacer esto, se está seleccionando utilizar la corriente momentánea para el estudio y una falla trifásica.

Figura 58. **Estudio de cortocircuito paso 2**



Fuente: Programa *Easy Power*. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

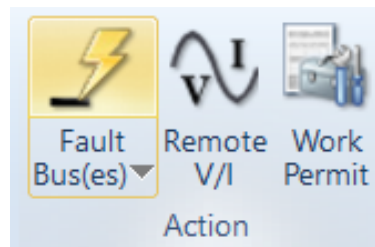
Figura 59. Estudio de cortocircuito paso 3



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

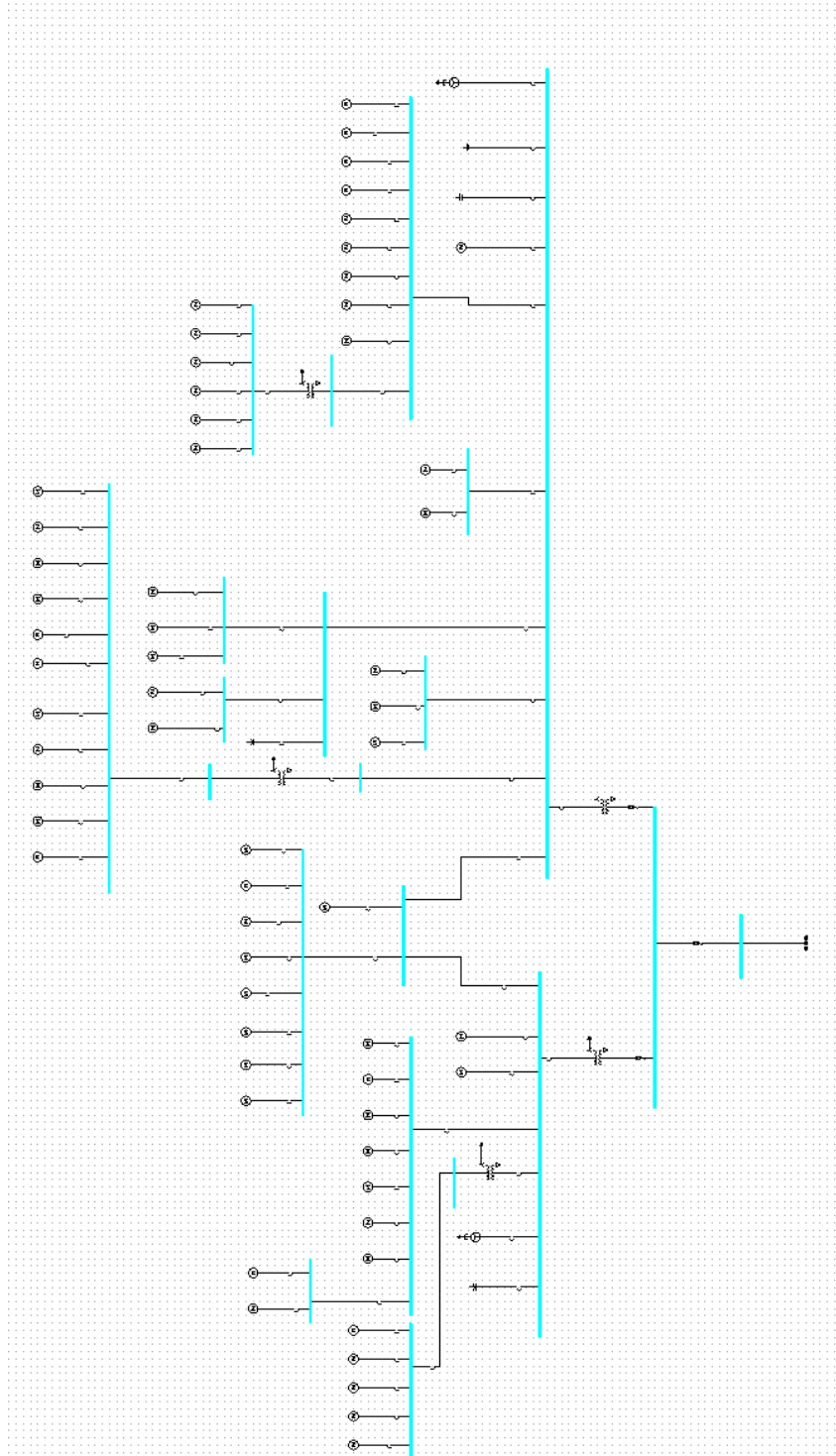
- Por último, en el mismo menú de cortocircuito, seleccionar la opción *fault buses*. Con ello se cortocircuitará todos los buses y se desplegará en pantalla las corrientes de cortocircuito por bus.

Figura 60. Estudio de cortocircuito paso 4



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

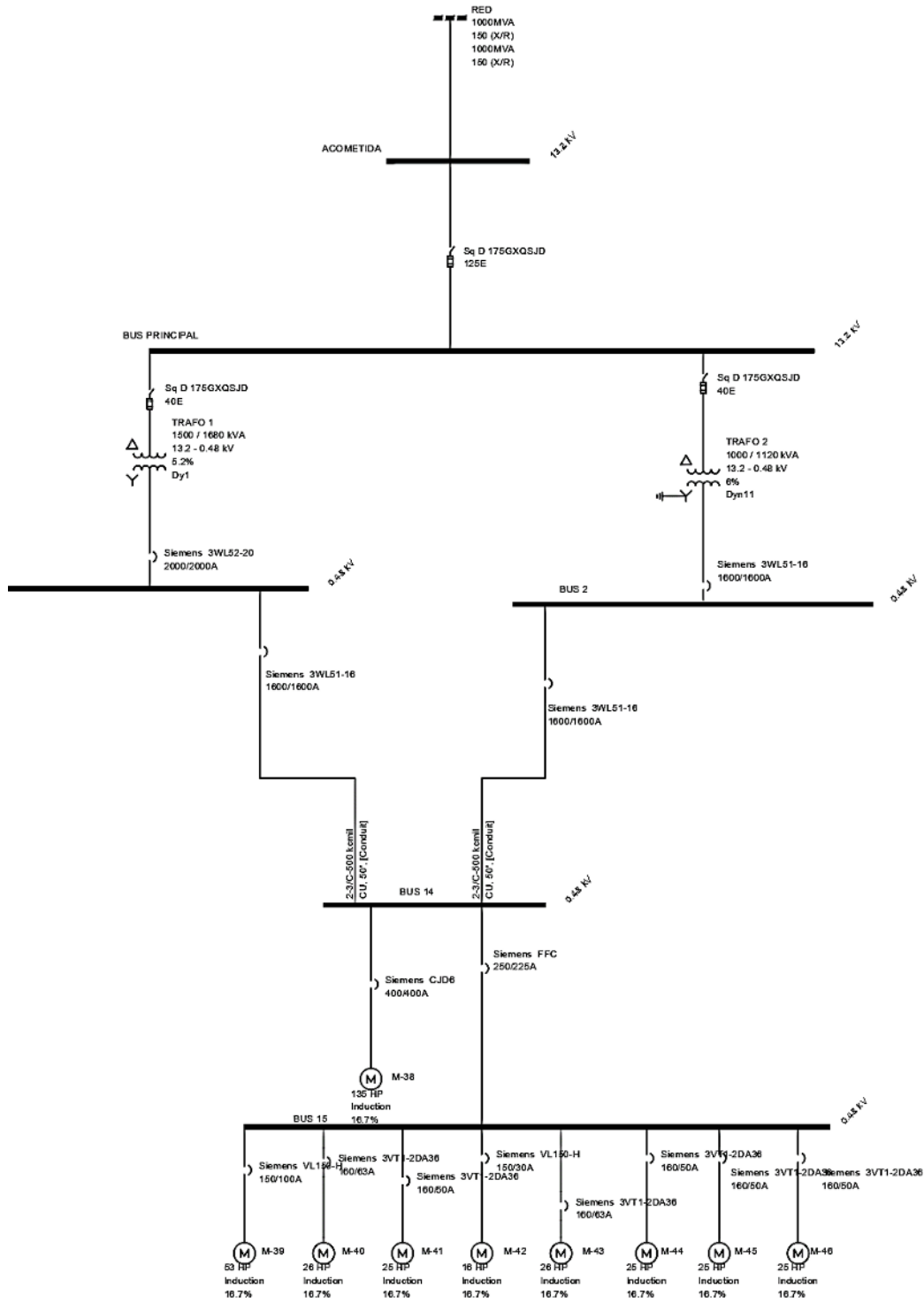
Figura 61. Estudio de cortocircuito



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.



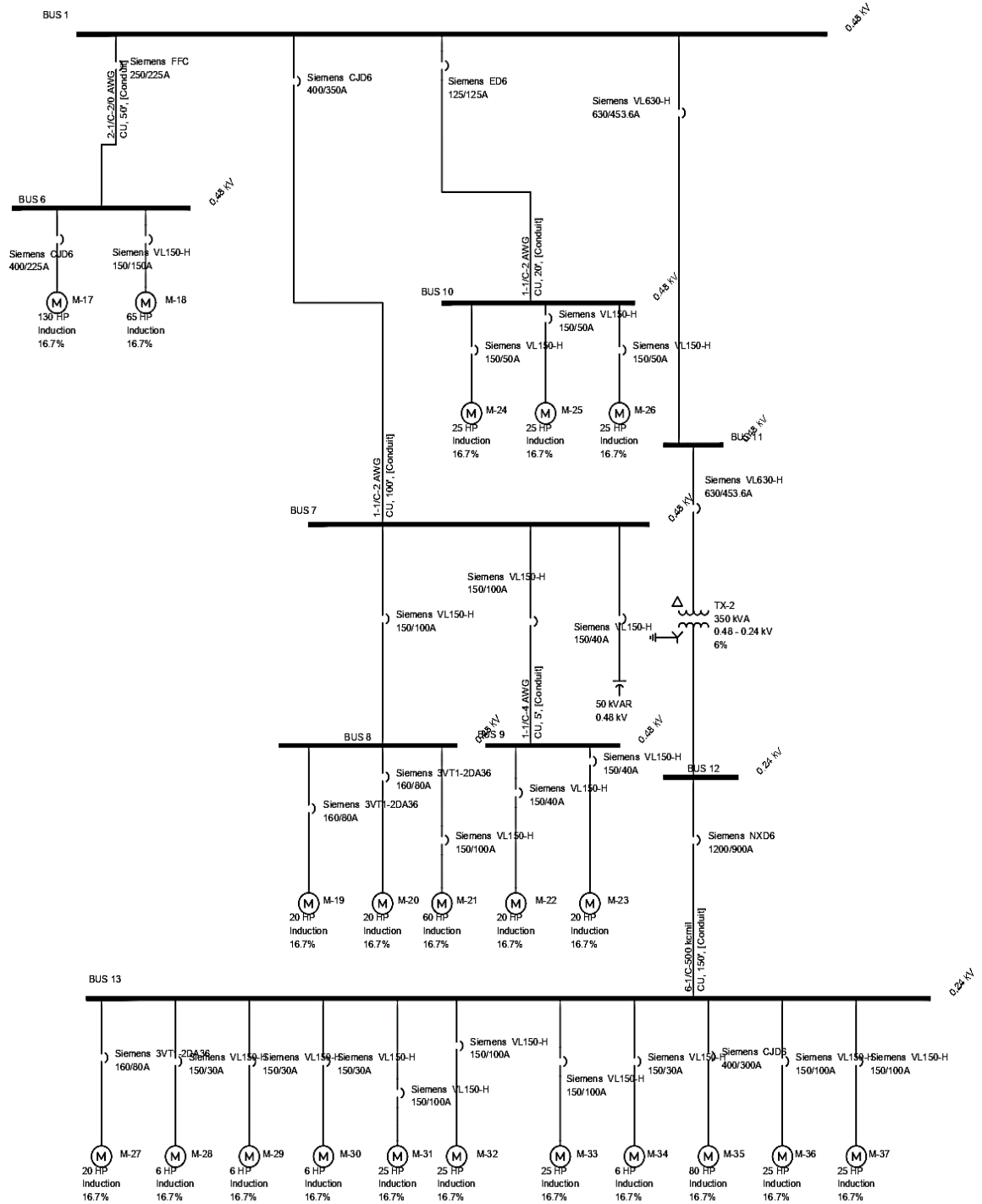
Figura 62. Diagrama unifilar bus 1, 2 y 14



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.



Figura 64. Diagrama unifilar cargas de bus 1-parte 2



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.



### 5.3. Simulación de arco eléctrico

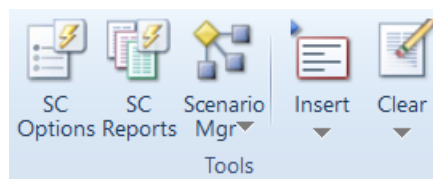
El capítulo 4 mostró que los factores para determinar la energía incidente son el tiempo de liberación de falla, la corriente de arco eléctrico, la corriente de cortocircuito, la distancia entre conductores, el tipo de panel eléctrico y el voltaje nominal. Todos dichos elementos ahora están presentes en el programa Easy Power, por lo que es posible realizar el cálculo de los parámetros de arco eléctrico mediante el programa.

#### 5.3.1. Selección de los parámetros a utilizar para el cálculo

Parametrizar el cálculo es muy importante, pues de ello depende los resultados que se obtendrán. Para seleccionar los parámetros a utilizar en el cálculo debe seguirse el siguiente procedimiento.

- En el menú superior del espacio de trabajo, en la sección *Tools* seleccionar *SC Options*.

Figura 66. Selección de parámetros arco eléctrico paso 1



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

- A continuación, se desplegará una ventana de opciones de cálculo para cortocircuito. En esta ventana se pueden configurar distintos parámetros como el tipo de falla, el método de cálculo, las opciones de display, el arco eléctrico, entre otros. Se seleccionará la opción *Arc Flash Hazard*.

Figura 67. Selección de parámetros arco eléctrico paso 2

Short Circuit Options

Control

Text Output

One-line Output

Arc Flash Hazard

Customize Arc Flash control settings.

Standard: IEEE 1584-2018

Worst-Case Arc Flash Hazards Output: Both (Incl & Excl Main)

Max Times (sec)

< 0.25 kV: 20    0.25 to 1 kV: 20    > 1 kV: 20

Create Report

Arc Flash Spreadsheet

Arc Flash Threshold

Calculate Arc Flash Using: Momentary

Display Incident Energy in: cal/cm2

Display Working Distance in: Inches

Working Distances (Below) Apply to: Enclosed

kV	Threshold Incident En (cal/cm2)	Default Working Distances (Inches)			
0.1 - 0.3	4	18	24	36	
0.1 - 0.3 (Switchgear)	4	18	24	36	
0.3 - 0.75	4	18	24	36	
0.3 - 0.75 (Switchgear)	4	18	24	36	
0.75 - 5	8	18	24	36	
5 - 15	8	18	24	36	
15 - 36	8	31	36	48	
36 - 46	25	33	39	48	
46 - 72.5	25	39	48	64	

Advanced...

Default    OK    Cancel    Apply    Help

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

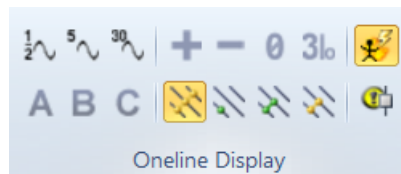
En esta pestaña puede seleccionarse el estándar con el cual quiere realizarse el cálculo, así como la opción de incluir o no incluir el efecto del tablero principal en el estudio. Se puede seleccionar el tipo de corriente de cortocircuito a utilizar en el cálculo, ya sea de medio ciclo, cinco ciclos o treinta ciclos. Existe una cuarta opción, la integrada, lo cual combina todas las corrientes de cortocircuito. Para el estudio realizado, se utilizarán las siguientes configuraciones:

- Estándar: IEEE 1584-2018
- Calcular arco eléctrico utilizando: medio ciclo (Momentary)
- Unidades de energía incidente: cal/cm<sup>2</sup>
- Unidades de distancia de trabajo: pulgadas

Resultado (*output*): incluir y excluir el principal

- Con el estudio parametrizado, en la sección *Online display* se encuentra el ícono de arco eléctrico, el cual debe ser seleccionado, y a continuación oprimir *Fault Buses*.

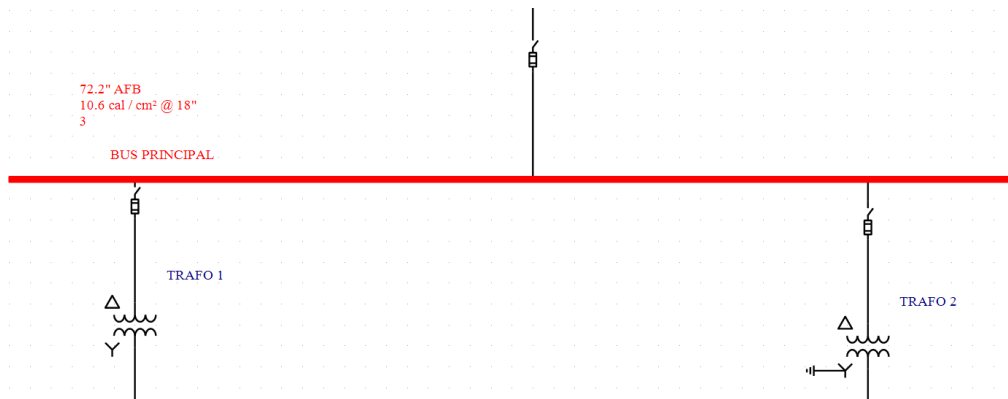
Figura 68. Selección de parámetros arco eléctrico paso 3



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

En cada bus aparecerá un texto con un color representativo al riesgo por arco. Dicho texto indica tres cosas: la energía incidente, la frontera de arco eléctrico y el nivel de EPP del bus. Como la figura 69 muestra, cada bus deberá contar con estos resultados.

Figura 69. Simulación de arco eléctrico en Easy Power

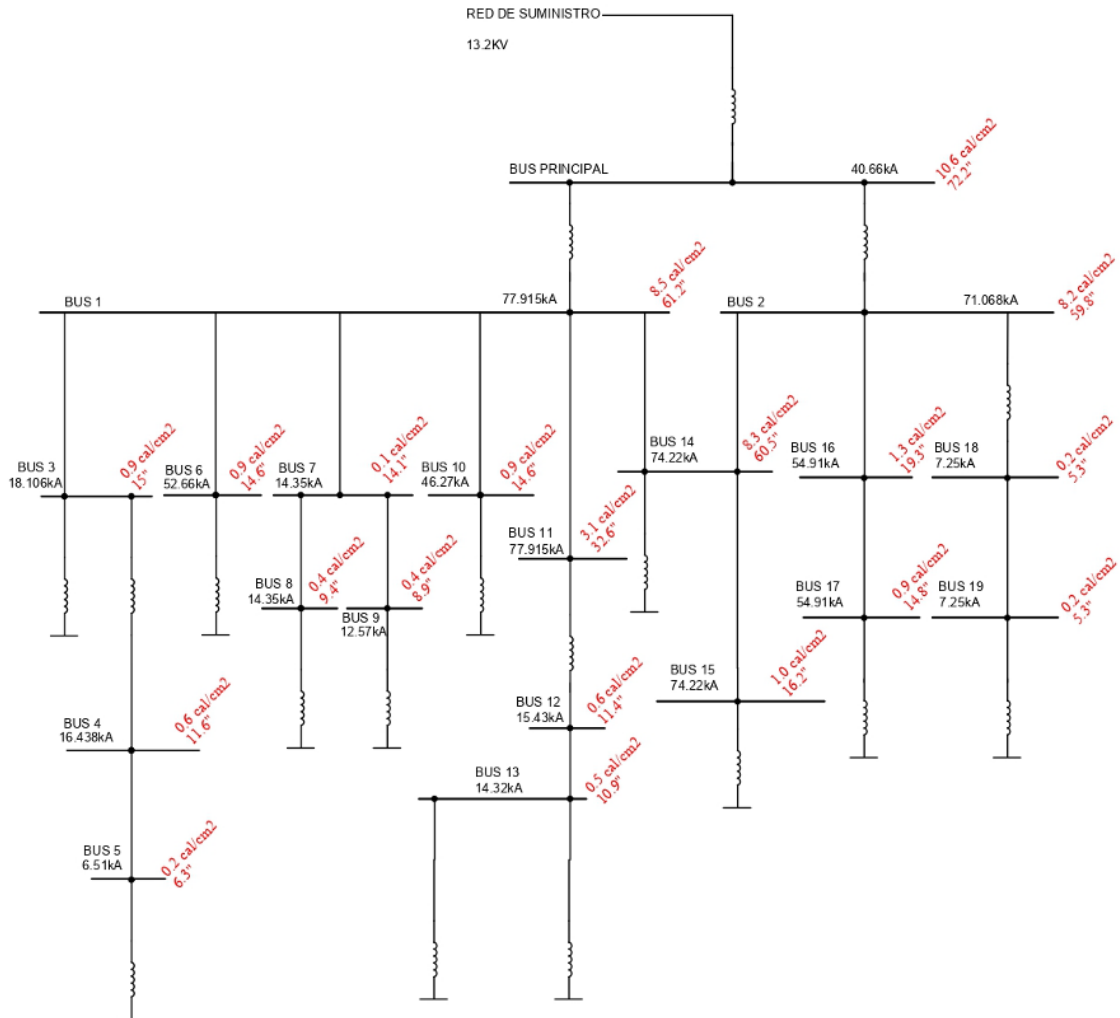


Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

Se ha realizado un diagrama final de resultados de arco eléctrico obtenidos con Easy Power. Cada bus describe los resultados del cálculo realizado. En la siguiente sección se compararán los resultados simulados y los presentados en el capítulo 4.



Figura 70. Simulación de arco eléctrico en Easy Power



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Captura tomada el 13 de enero 2022.

### 5.3.2. Generación de resultados de arco eléctrico

Al exportar los resultados a una hoja de cálculo, utilizando la función *Arrange for Arc Flash*, se pueden ordenar los resultados en una comparación muy interesante.

Tabla XIX. **Comparativa de cálculos manuales y utilizando Easy Power**

Bus	Cálculo manual			Cálculo con Easy Power			Desviación estándar de energía incidente manual versus Easy Power
	Corriente de arco eléctrico (kA)	Energía incidente cal/cm <sup>2</sup>	Frontera de arco eléctrico (plg)	Corriente de arco eléctrico (kA)	Energía incidente cal/cm <sup>2</sup>	Frontera de arco eléctrico (plg)	
<i>BUS PRINCIPAL</i>	<b>37,49</b>	<b>10,52</b>	<b>72,02</b>	<b>37,03</b>	<b>10,60</b>	<b>72,20</b>	5,66 %
<i>BUS 1</i>	<b>36,51</b>	<b>8,46</b>	<b>61,22</b>	<b>36,51</b>	<b>8,50</b>	<b>61,20</b>	2,78 %
<i>BUS 2</i>	<b>35,48</b>	<b>8,15</b>	<b>59,79</b>	<b>35,48</b>	<b>8,20</b>	<b>59,80</b>	3,70 %
<i>BUS 3</i>	<b>13,55</b>	<b>0,89</b>	<b>14,92</b>	<b>13,55</b>	<b>0,90</b>	<b>15,00</b>	0,97 %
<i>BUS 4</i>	<b>12,33</b>	<b>0,59</b>	<b>11,51</b>	<b>12,33</b>	<b>0,60</b>	<b>11,60</b>	1,03 %
<i>BUS 5</i>	<b>3,07</b>	<b>0,22</b>	<b>6,27</b>	<b>3,07</b>	<b>0,20</b>	<b>6,30</b>	1,56 %
<i>BUS 6</i>	<b>31,42</b>	<b>0,86</b>	<b>14,60</b>	<b>31,42</b>	<b>0,90</b>	<b>14,60</b>	3,13 %
<i>BUS 7</i>	<b>10,76</b>	<b>0,80</b>	<b>14,00</b>	<b>10,76</b>	<b>0,80</b>	<b>14,10</b>	0,03 %
<i>BUS 8</i>	<b>10,76</b>	<b>0,43</b>	<b>9,45</b>	<b>10,76</b>	<b>0,40</b>	<b>9,40</b>	1,90 %
<i>BUS 9</i>	<b>9,42</b>	<b>0,39</b>	<b>8,98</b>	<b>9,42</b>	<b>0,40</b>	<b>8,90</b>	0,46 %
<i>BUS 10</i>	<b>29,28</b>	<b>0,87</b>	<b>14,72</b>	<b>29,28</b>	<b>0,90</b>	<b>14,60</b>	2,32 %
<i>BUS 11</i>	<b>36,51</b>	<b>3,10</b>	<b>32,63</b>	<b>36,51</b>	<b>3,10</b>	<b>32,60</b>	0,33 %
<i>BUS 12</i>	<b>7,61</b>	<b>0,58</b>	<b>11,43</b>	<b>7,61</b>	<b>0,60</b>	<b>11,40</b>	1,49 %
<i>BUS 13</i>	<b>7,06</b>	<b>0,53</b>	<b>10,87</b>	<b>7,06</b>	<b>0,50</b>	<b>10,90</b>	2,45 %
<i>BUS 14</i>	<b>35,97</b>	<b>8,30</b>	<b>60,47</b>	<b>35,97</b>	<b>8,30</b>	<b>60,50</b>	0,30 %
<i>BUS 15</i>	<b>35,97</b>	<b>1,01</b>	<b>16,21</b>	<b>35,97</b>	<b>1,00</b>	<b>16,20</b>	0,83 %
<i>BUS 16</i>	<b>32,07</b>	<b>1,31</b>	<b>19,10</b>	<b>32,07</b>	<b>1,30</b>	<b>19,30</b>	1,06 %
<i>BUS 17</i>	<b>32,07</b>	<b>0,88</b>	<b>14,82</b>	<b>32,07</b>	<b>0,90</b>	<b>14,80</b>	1,65 %
<i>BUS 18</i>	<b>3,45</b>	<b>0,19</b>	<b>5,73</b>	<b>3,45</b>	<b>0,20</b>	<b>5,80</b>	0,54 %
<i>BUS 19</i>	<b>3,45</b>	<b>0,19</b>	<b>5,73</b>	<b>3,45</b>	<b>0,20</b>	<b>5,80</b>	0,54 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 5.3.3. Generación de etiquetas para cada elemento de la instalación

El último paso para terminar la simulación del estudio de arco eléctrico en Easy Power es la generación de etiquetas de seguridad para cada bus de la instalación. Luego de utilizar *Arrange for Arc Flash*, una barra de opciones se

despliega en la parte superior de la pantalla: en la sección *Action* debe seleccionarse el ícono llamado Label que traducido es etiqueta.

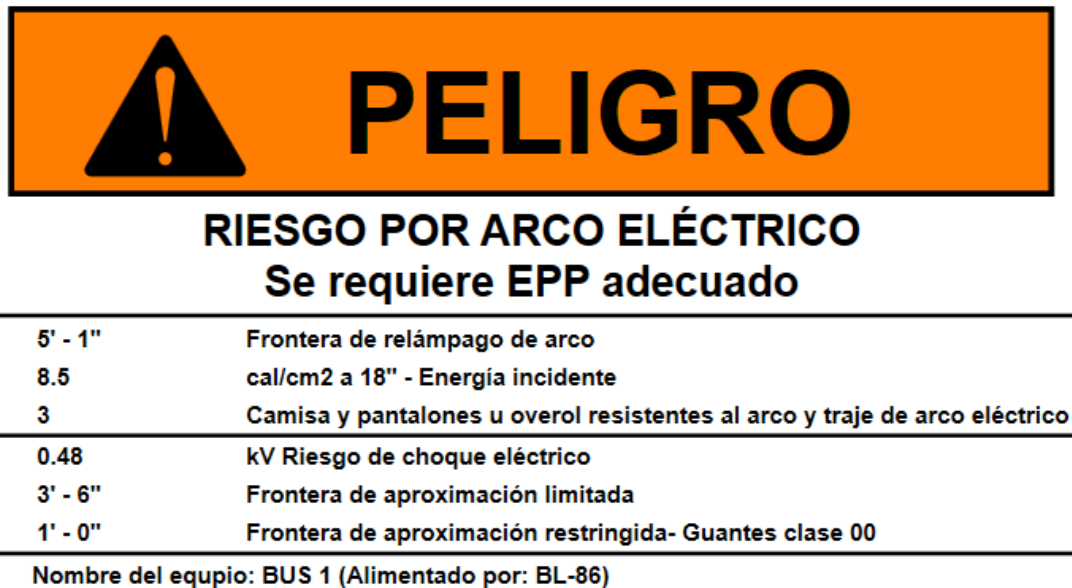
El producto como tal trae varias plantillas de etiquetas, con distintos diseños, incluso el usuario puede diseñar su propia etiqueta. Lo importante de acuerdo con la norma NFPA 70E es que para el arco eléctrico la etiqueta debe contener información valiosa como la energía incidente, el equipo de protección personal recomendado, el nombre del bus, una advertencia de peligro y la causa del mismo, la frontera de arco eléctrico, la frontera de aproximación limitada, la frontera de aproximación restringida, el voltaje de un posible choque eléctrico, entre otras.

Para el estudio de arco eléctrico realizado en esta investigación se diseñó dentro de Easy Power una etiqueta que cumple los elementos recién descritos y se cambió el idioma a español, tomando en cuenta que el principal idioma de la industria es el español.

La etiqueta cuenta con las siguientes características:

- Dimensionales de energía incidente: cal/cm<sup>2</sup>
- Dimensionales de distancias en pies y pulgadas
- Voltaje en kV
- Dimensiones de la etiqueta: 4"x6"

Figura 71. Etiqueta de señalización de arco eléctrico generada con Easy Power



Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

#### 5.4. Aspectos generales de señalizaciones de seguridad

El artículo 130.5(H) de la norma NFPA 70E establece que todos los tableros, gabinetes y celdas eléctricas deben de estar señalizados con una etiqueta que contenga la siguiente información:

- Voltaje del sistema
- Frontera de relámpago de arco
- Energía incidente
- Resistencia al arco del EPP
- Nivel de EPP

De igual forma, se especifica que si la instalación tiene cambios en algún momento, por lo que la etiqueta se vuelve imprecisa, esta debe re diseñarse y volver a instalarla. Easy Power provee una etiqueta que cumple con estos requerimientos de la NFPA, con los aspectos señalados en las normas ANSI Z535.

La industria, por todos los tipos de energía con los que cuenta, requiere el diseño de señalizaciones de seguridad para guiar al personal hacia conductas seguras y evitar accidentes. En muchas ocasiones se fabrican sin una guía orientada, sin embargo, el estándar ANSI Z535 provee una fuente de información relacionados con el diseño, aplicación y uso de las mismas.

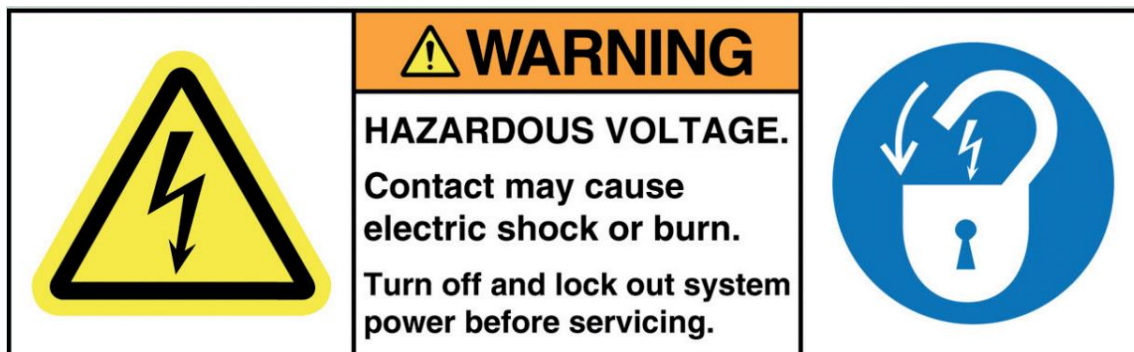
ANSI Z535 es un paquete de 6 publicaciones; cada una de ellas se especializa en diferentes temas de señalizaciones de seguridad.

- ANSI Z535.1 Safety Colors: establece las definiciones técnicas, estándares y tolerancias de color de las señalizaciones.
- ANSI Z535.2 Environmental Facility and Safety Signs: regula los requerimientos para el diseño, aplicación y uso de señalizaciones de seguridad.
- ANSI Z535.3 Criteria for Safety Symbols: provee criterios para el diseño y uso de símbolos indicadores de riesgos en las señalizaciones.
- ANSI Z535.4 Product Safety Signs and Labels: establece el proceso de diseño, aplicación, uso y posicionamiento de etiquetas de seguridad en una gran cantidad de productos.
- ANSI Z535.5 Safety Tags and Barricade Tapes: especifica etiquetas y barricadas, las cuales son utilizadas en peligros temporales, removidas una vez el peligro es eliminado. Especialmente las industrias que siguen

las recomendaciones de NFPA 70E con respecto al sistema de bloqueo y etiquetado encontrarán esta norma muy útil.

- ANSI Z535.6 Product Safety Information in Product Manuals, Instructions, and Other Collateral Materials: su intención es actualizar a los productores para la creación de adecuados mensajes de seguridad.

Figura 72. **Etiqueta de señalización conforme a ANSI Z535.4**



Fuente: ANSI Z535.6. *Document Library. Communicator Autumn 2008.*

[https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/communicator\\_article\\_p14-16.pdf](https://www.nema.org/docs/default-source/standards-document-library/communicator_article_p14-16.pdf). Consulta: 7 de enero 2022.

## 5.5. Etiquetas por bus

El resultado final del estudio de arco eléctrico se resume en reunir todos los parámetros calculados en una etiqueta de señalización por arco eléctrico en cada uno de los tableros estudiados. Esta etiqueta debe estar en lugar visible, preferiblemente en la puerta del gabinete o tablero, y a partir de ellas crear un programa de seguridad eléctrica para el seguimiento del cumplimiento de las normas de seguridad de arco eléctrico.

### 5.5.1. Etiquetas de señalización de arco eléctrico

El bus principal, bus 1, bus 2 y bus 14 son ahora los puntos de mayor riesgo de arco eléctrico en categoría de EPP 3, mientras que el resto de buses cuentan con nivel de EPP 1. En las secciones anteriores se detalla más acerca de los niveles de EPP. Cada una de las etiquetas debe de estar visiblemente en el ingreso a dichos tableros, cuartos eléctricos, puertas; la idea es etiquetar claramente las áreas. El equipo de mantenimiento eléctrico de la industria procesadora de embutidos debe ser guiado en la interpretación correcta de los parámetros de arco eléctrico, con más importancia en la energía incidente y la frontera de arco eléctrico.

Figura 73. Etiqueta de bus principal



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

5' - 1"	Frontera de relámpago de arco
8.5	cal/cm <sup>2</sup> a 18" - Energía incidente
3	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco y traje de arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 1 (Alimentado por: BL-86)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 74. Etiqueta de bus 1



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

---

5' - 1"	Frontera de relámpago de arco
8.5	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
3	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco y traje de arco eléctrico

---

0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

---

Nombre del equipo: BUS 1 (Alimentado por: BL-86)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 75. Etiqueta de bus 2



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

---

5' - 0"	Frontera de relámpago de arco
8.2	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
3	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco y traje de arco eléctrico

---

0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

---

Nombre del equipo: BUS 2 (Alimentado por: BL-96\_A)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.



Figura 76. Etiqueta de bus 14



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

5' - 0"	Frontera de relámpago de arco
8.3	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
3	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco y traje de arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00
Nombre del equipo: BUS 14 (Alimentado por: BL-47)	

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 77. Etiqueta de bus 3



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

1' - 3"	Frontera de relámpago de arco
0.9	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00
Nombre del equipo: BUS 3 (Alimentado por: BL-90)	

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 78. Etiqueta de bus 4



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

---

1' - 0"	Frontera de relámpago de arco
0.6	cal/cm <sup>2</sup> a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico

---

0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

---

Nombre del equipo: BUS 4 (Alimentado por: BL-11)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 79. Etiqueta de bus 5



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

---

0' - 6"	Frontera de relámpago de arco
0.2	cal/cm <sup>2</sup> a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico

---


0.24	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

---

Nombre del equipo: BUS 5 (Alimentado por: BL-84)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 80. Etiqueta de bus 6



**PELIGRO**


**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

1' - 3"	Frontera de relámpago de arco
0.9	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 6 (Alimentado por: BL-91)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 81. Etiqueta de bus 7



**PELIGRO**

**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

1' - 2"	Frontera de relámpago de arco
0.8	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 7 (Alimentado por: BL-92)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 82. Etiqueta de bus 8



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

0' - 9"	Frontera de relámpago de arco
0.4	cal/cm <sup>2</sup> a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 8 (Alimentado por: BL-28)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 83. Etiqueta de bus 9




**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

0' - 9"	Frontera de relámpago de arco
0.4	cal/cm <sup>2</sup> a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 9 (Alimentado por: BL-29)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 84. Etiqueta de bus 10



**PELIGRO**


**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

1' - 3"	Frontera de relámpago de arco
0.9	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 10 (Alimentado por: BL-93)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 85. Etiqueta de bus 11



**PELIGRO**

**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

2' - 9"	Frontera de relámpago de arco
3.1	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 11 (Alimentado por: BL-94)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 86. Etiqueta de bus 12



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

0' - 11"	Frontera de relámpago de arco
0.6	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.24	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 12 (Alimentado por: BL-6)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 87. Etiqueta de bus 13




**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

0' - 11"	Frontera de relámpago de arco
0.5	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.24	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 13 (Alimentado por: BL-6)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 88. Etiqueta de bus 15



# PELIGRO

RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO  
Se requiere EPP adecuado

---

<b>1' - 4"</b>	<b>Frontera de relámpago de arco</b>
<b>1.0</b>	<b>cal/cm2 a 18" - Energía incidente</b>
<b>1</b>	<b>Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico</b>

---

<b>0.48</b>	<b>kV Riesgo de choque eléctrico</b>
<b>3' - 6"</b>	<b>Frontera de aproximación limitada</b>
<b>1' - 0"</b>	<b>Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00</b>

---

**Nombre del equipo: BUS 15 (Alimentado por: BL-49)**

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 89. Etiqueta de bus 16



# PELIGRO

RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO  
Se requiere EPP adecuado

---

<b>1' - 7"</b>	<b>Frontera de relámpago de arco</b>
<b>1.3</b>	<b>cal/cm2 a 18" - Energía incidente</b>
<b>1</b>	<b>Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico</b>

---

<b>0.48</b>	<b>kV Riesgo de choque eléctrico</b>
<b>3' - 6"</b>	<b>Frontera de aproximación limitada</b>
<b>1' - 0"</b>	<b>Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00</b>

---

**Nombre del equipo: BUS 16 (Alimentado por: BL-61)**

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 90. Etiqueta de bus 17



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

---

1' - 3"	Frontera de relámpago de arco
0.9	cal/cm <sup>2</sup> a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico

---

0.48	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

---

Nombre del equipo: BUS 17 (Alimentado por: BL-69)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.

Figura 91. Etiqueta de bus 18



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

---

0' - 5"	Frontera de relámpago de arco
0.2	cal/cm <sup>2</sup> a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico

---

0.24	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

---

Nombre del equipo: BUS 18 (Alimentado por: BL-73)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.



Figura 92. Etiqueta de bus 19



**RIESGO POR ARCO ELÉCTRICO**  
**Se requiere EPP adecuado**

0' - 5"	Frontera de relámpago de arco
0.2	cal/cm2 a 18" - Energía incidente
1	Camisa y pantalones u overol resistentes al arco eléctrico
0.24	kV Riesgo de choque eléctrico
3' - 6"	Frontera de aproximación limitada
1' - 0"	Frontera de aproximación restringida- Guantes clase 00

Nombre del equipo: BUS 19 (Alimentado por: BL-73)

Fuente: Programa Easy Power. Licencia L2-66529-9G. Generado el 13 de enero 2022.



## **6. PROYECCIÓN ECONÓMICA**

Como todo proyecto de ingeniería, los costos son de carácter fundamental para su aprobación y elaboración. A diferencia de otro tipo de proyectos eléctricos, como iluminación, potencia, instalación de motores, entre otros; un estudio de arco eléctrico no es físicamente apreciable. Por tal razón, a pesar de ser uno de los estudios más importantes, generalmente las compañías industriales no lo contratan o es dejado en segundo plano. Uno de los objetivos principales de esta investigación es informar al lector acerca del procedimiento del estudio, por lo que los aspectos económicos se presentarán en este capítulo.

### **6.1. Descripción técnica del estudio de arco eléctrico**

El trabajo requerido para realizar el estudio se divide en trabajo de campo y análisis de ingeniería.

#### **6.1.1. Trabajo en campo**

Todo lo relacionado a la elaboración del proyecto físicamente entra en categoría de trabajo en campo; la exploración inicial de la instalación, la realización del diagrama unifilar, la corroboración en campo de parámetros de los equipos de la instalación y la instalación de etiquetas de seguridad.

Exploración inicial de la instalación: en la fase inicial del proyecto es necesario conocer a fondo la instalación eléctrica.

Conocer el proceso productivo es de suma importancia, pues al estudiar la instalación eléctrica se sabrá a qué tipo de maquinaria corresponde cada elemento y facilita el proceso de análisis.

Esta actividad de exploración es indispensable realizarla junto con el equipo de mantenimiento de la industria, quienes aportan la más valiosa información debido a su gran experiencia dentro de la misma instalación. Se considera que la exploración inicial de la instalación puede completarse en un día de trabajo porque no es necesario hacer un levantamiento de equipos todavía.

Elaboración de un diagrama unifilar: la base de cualquier estudio eléctrico es el diagrama unifilar completo de la instalación. Mientras tal diagrama sea más exacto, mejores serán los estudios a efectuar con base en él. Esta no es una tarea sencilla, a menos que en fases de construcción de la industria se hayan realizado (lo que es ideal).

En muchas ocasiones las industrias no cuentan con planos eléctricos y el crecimiento se da sin alguna planificación, lo que hace el levantamiento una actividad pesada. De igual forma que la exploración inicial, es indispensable contar con personal de mantenimiento o electricistas conocedores de la instalación para guiar la exploración minuciosa con el fin de conocer completamente la instalación. Los primeros elementos a incluir en el diagrama son:

- Número de acometidas eléctricas principales y su voltaje.
- Número de transformadores principales, sus potencias, impedancias, tipo y relación de transformación.
- Número de tableros principales, sus voltajes nominales y capacidades de barras.

- Número de tableros secundarios, sus voltajes nominales y capacidades de barras.
- Cantidad de generadores, tipo, voltaje, potencia.
- Bancos de capacitores.
- Fuentes de energía renovable.
- Cantidad de motores, tipos, voltaje, conexiones, potencia.
- Topología de la red (forma de conexión).
- Calibre de conductores y distancias.

Al tener todos estos datos, se puede comenzar a realizar el diagrama e ir confirmando datos como marca de los equipos, distancias, impedancias, conexiones, entre otros. Se considera que al ser el aspecto más pesado en la elaboración del estudio puede realizarse entre 3 y 5 días de trabajo.

Corroboración de parámetros de equipos: al finalizar el diagrama unifilar, regularmente, se tienen varias incógnitas que solo surgen al trabajar el diagrama. Por ello es necesario confirmar todo el diagrama en la instalación y anotar los datos que se hayan omitido inicialmente. Dependiendo de la cantidad de datos a confirmar, esta tarea puede durar de 1 a 2 días de trabajo. Luego de esta tarea, el proyecto se trasladará a los cálculos, los cuales no es necesario estar en campo para su realización.

Instalación de etiquetas de arco eléctrico: al contar con los resultados finales del estudio se procede a ir a cada uno de los tableros analizados y señalarlos para concluir el estudio. Regularmente se señalizan las distancias de seguridad, que son, las fronteras de aproximación limitada, restringida y de arco eléctrico, todas estas marcadas en el suelo. Dicha actividad puede llevar unos 3 días de trabajo.

### **6.1.2. Análisis de ingeniería**

El grueso del estudio es la realización de cálculos y simulaciones con *software*. Si los cálculos son realizados manualmente, el estudio se convierte en un sin fin de cálculos muy extensos, por lo que se recomienda utilizar *software* o alguna hoja de cálculo para avanzar en el proceso de ingeniería. Entre las actividades de este apartado se encuentran:

- Realización del estudio de cortocircuito.
- Ajuste de las protecciones eléctricas a los parámetros actuales de la instalación.
- Realización del estudio de arco eléctrico.
- Generación de planos para resultados de arco eléctrico.
- Diseño de etiquetas de seguridad.
- Elaboración de un informe final de resultados.
- El estudio, contando con ayuda de *software*, puede demorarse de 3 a 4 días.
- La elaboración de planos puede demorar hasta 2 días.

### **6.2. Costos técnico-financieros**

Se ha proyectado el aspecto técnico-financiero para la realización del proyecto, en el cual se ha tomado en cuenta el tiempo de ingeniería necesario, así como los materiales para la señalización de arco eléctrico en campo; siendo un total de inversión de Q 34 480,00. La factibilidad del proyecto es buena, dado que por una inversión relativamente pequeña se realiza un estudio completo para evitar posibles accidentes y quemaduras por arco eléctrico, con lo cual se evita, incluso la posibilidad de muerte dentro de la instalación eléctrica de la industria

procesadora de embutidos. A continuación, en la tabla XX, se muestra el desglose.

Tabla XX. **Costos de ingeniería**

Actividad	Tiempo de realización en días laborales	Costo proyectado
1. Inspección eléctrica de planta industrial	2	GTQ 2 400,00
2. Revisión de datos obtenidos y ordenamiento	1	GTQ 1 200,00
3. Realización de diagrama unifilar del sistema eléctrico	3	GTQ 3 600,00
4. Estudio de cortocircuito utilizando Easy Power	2	GTQ 2 400,00
5. Estudio de arco eléctrico utilizando Easy Power	1	GTQ 1 200,00
6. Análisis de resultados y revisión de la simulación		
7. Diseño de etiquetas de seguridad	1	GTQ 1 200,00
8. Generación de planos eléctricos	1	GTQ 1 200,00
9. Generación de reporte final	1	GTQ 1 200,00
10. Etiquetado de áreas y tableros en campo	2	GTQ 2 400,00
11. Señalización de distancias de seguridad en campo		
Total	14	GTQ 16 800,00

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel .

Tabla XXI. **Costos de *software* y materiales**

Cantidad	Unidad de medida	Material	Costo unitario	Costo total proyectado
1	Unidad	Licenciamiento de Easy Power	GTQ 10 000,00	GTQ 10 000,00
3	Metro cuadrado	Etiquetas de señalización color rojo	GTQ 600,00	GTQ 1 800,00
3	Metro cuadrado	Etiquetas de señalización color amarillo	GTQ 600,00	GTQ 1 800,00
3	Metro cuadrado	Etiquetas de señalización color naranja	GTQ 600,00	GTQ 1 800,00
40	Unidad	Etiqueta de arco eléctrico de 15X10 cm	GTQ 2,00	GTQ 80,00
1	Galón	Pintura epóxica	GTQ 1 200,00	GTQ 1 200,00
1	Unidad	Accesorios de instalación	GTQ 1,000,00	GTQ 1 000,00
				<b>GTQ 17 680,00</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXII. **Resumen de costos totales para la elaboración del proyecto**

Resumen de costos	Monto
Costos de ingeniería	GTQ 16 800,00
Costo de <i>software</i> y materiales	GTQ 17 680,00
<b>Costo total</b>	<b>GTQ 34 480,00</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel (versión 16.59).



## CONCLUSIONES

1. La IEEE y NFPA han generado modelos matemáticos para calcular la incidencia del arco eléctrico en la industria, siendo este un fenómeno crítico en los sistemas de energía. Se ha creado una guía práctica para realizar estudios de arco eléctrico utilizando el programa Easy Power.
2. El arco eléctrico está ligado directamente con la capacidad de cortocircuito de la instalación y la protección, ante él depende de una coordinación de protecciones bien ajustada. El capítulo 4 desarrolla un ejemplo claro de aplicación del cálculo de arco eléctrico. los resultados se detallan en la tabla XVI.
3. El arco eléctrico se puede medir mediante su corriente eléctrica y la energía calórica producida por él mismo. La frontera de arco eléctrico es aquella distancia a la que una persona puede sufrir una quemadura de segundo grado. El método de la NFPA 70E tiene algunas limitaciones para el cálculo, como puede observarse en la tabla XIII, capítulo 4, mientras que el de la IEEE 1584-2018 es más preciso y con pocas limitaciones, tal como se muestra en la tabla XIV, capítulo 4.
4. La industria procesadora de embutidos cuenta con 16 buses con energía incidente menor a  $4 \text{ cal/cm}^2$ , en los cuales el EPP debe ser nivel 1, de acuerdo con la sección 2.4.1.1; cuatro buses con energía incidente entre 8 y  $25 \text{ cal/cm}^2$ , en los cuales el equipo de protección personal debe ser nivel 3, de acuerdo con la sección 2.4.1.3.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar una revisión del estudio de cortocircuito y del arco eléctrico periódica, debido a que todo estudio de arco eléctrico queda sujeto a cambios por crecimiento o modificaciones a la instalación, por lo que en cada ocasión que la topología de la red cambia.
2. Proporcionar a los trabajadores de vestimenta adecuada resistente al arco eléctrico para trabajar en las instalaciones eléctricas. El artículo 231 del Acuerdo Gubernativo 229-2014 (y reforma 33-2016) establece que, los equipos de protección personal son necesarios para resguardar la vida de los trabajadores, por lo que el arco eléctrico representa un riesgo alto en los sistemas de energía.
3. Crear un programa de seguridad eléctrica de acuerdo a la NFPA 70E, así como una cultura de trabajo seguro, capacitando al personal con respecto al riesgo por arco eléctrico. En Guatemala, el arco eléctrico no está legislado actualmente, sin embargo, es obligatorio adoptar medidas de SSO en el lugar de trabajo, de acuerdo al Acuerdo Gubernativo 229-2014 artículo 4 (y reforma 33-2016).
4. Buscar constantemente los nuevos estudios y métodos mejorados de cálculo, por las organizaciones descritas en esta investigación o cualquier otra que genere discusión en el tema; los estudios e investigaciones acerca del tema de arco eléctrico siguen generándose mundialmente.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. *Subestación con aislamiento en SF6*. [en línea]. <[www.industrialsolutions.mx.abb.com](http://www.industrialsolutions.mx.abb.com)>. [Consulta: 5 de mayo de 2021].
2. AMMERMAN, Ravel F.; GAMMON, Tammy; SEN, Pankaj K.; NELSON, John P. *DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations*. IEEE Transactions on industry applications 2010, vol. 46, no. 5, p. 1810-1819. 10 p.
3. \_\_\_\_\_. *Comparative study of arc modeling and arc flash incident energy*. Ensayo de IEEE No. PCIC. 2008. 12 p.
4. ArcWear, *A division of Kinectrics*. Blog. IEC 61482-1-1. Edition 2.0 Published. [en línea]. <<https://www.arcwear.com/blog/iec-61482-1-1-edition-2-0-published/>>. [Consulta: 5 de mayo de 2021].
5. ASTM INTERNATIONAL. *Standard Performance Specification for Flame Resistant and Electric Arc Rated Protective Clothing Worn by Workers Exposed to Flames and Electric Arcs (ASTM F1506-20a)*. EE.UU.: West Conshohocken, PA, 2020. 9 p.
6. BRATU Neagu; CAMPERO Eduardo. *Instalaciones eléctricas conceptos básicos y diseño*. 2a. ed. México: Alfaomega, 1995. 270 p.

7. CHAPMAN J, Stephen *Máquinas eléctricas*. 5a ed. Iztapalapa, México: McGraw-Hill, 2005. 502 p.
8. Driescher y Wittjohann, S.A. Productos. *Subestaciones compactas*. [en línea]. <[www.driwisa.com](http://www.driwisa.com)>. [Consulta: 5 de mayo de 2021].
9. DOUGHTY, Richard L.; NEAL, Thomas E.; FLOYD, H. Landis. *Predicting incident energy to better manage the electric arc hazard on 600V power distribution systems*. Ensayo de IEEE No. PCIC-98-36. 13. 1998.
10. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 5a.ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 2003. 757 p.
11. IEEE Industry Applications Society. *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. Std 1584-2018*. New York: Park Avenue NY, 10016-5997 USA. 139 p.
12. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60529, *Degrees of protection provided by enclosures 2001*. 3, rue de Varembe Geneva, Switzerland, 2001. 91 p.
13. KUNDINGER, Mathew. *ANSI Z535.6 and product safety*. NEMA Communicator Autumn, 2008. 3 p.
14. La Capital, Argentina. *Subestación transformadora*. [en línea]. <[www.lacapital.com.ar](http://www.lacapital.com.ar)>. [Consulta: 8 de abril de 2021].

15. LEE, Ralph H. *The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns*. IEEE Transactions on industry applications Canada: 1982, vol. IA-18, no. 3, p. 246-251. 6 p.
16. Mechanical Engineering. *Difference Between contactor and relay*. [en línea]. <[www.mectips.com](http://www.mectips.com)>. [Consulta: 10 de junio de 2021].
17. Ministerio de Trabajo, Guatemala. *Acuerdo Gubernativo número 229-2014 (23 de julio, 2014)*. [en línea]. <<https://dgps-sso.mintrabajo.gob.gt/files/REGLAMENTO.pdf>>. [Consulta: 5 de enero de 2022].
18. NASCO. *ASTM-F1959-test-apartus. Arc Standards*. [en línea]. <[www.nascoinc.com](http://www.nascoinc.com)>. [Consulta: 20 de agosto de 2021].
19. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). *Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo NFPA 70E (2018)*. Quincy, Massachusetts, USA: 2017. 109 p.
20. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *National Electric Code, NFPA 70*. Quincy, Massachusetts, USA: 2019. 1 349 p.
21. RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel. *Máquinas síncronas: Cortocircuitos*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. [en línea]. <<https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Cortos%20sincronas.pdf>>. [Consulta: 10 de septiembre de 2021].

22. Siemens Industry Mall. *Aparatos de protección, maniobra, medida y vigilancia SENTRON*. [en línea]. <[www.mall.industry.siemens.com](http://www.mall.industry.siemens.com)>. [Consulta: 17 de mayo de 2021].



# APÉNDICES

## Apéndice 1. Diseño de memoria de cálculo para cálculos de arco eléctrico

CALCULO CASO MENOR A 600V	Gap (mm)	Corriente cc (kA)	V operación (kV)	Distancia arco (mm)	Factor CF	TIEMPO DE ARCO (ms)
	32	8	0.24	457.2	1	23

### 1. Cálculo de corriente de arco a 600V

TABLA DE CONSTANTES	Factor K	1	2	3	4	5	6	7
	VCB	-0.04287	1.035	-0.083	0	0	-4.78E-09	1.96E-06
						8	9	10
						-0.0002	0.003141	1.092

$$I_{Arc_{600}} = 10^{(k1+k2 \lg I_{bf} + k3 \lg C)} (k4 I_{bf}^6 + k5 I_{bf}^5 + k6 I_{bf}^4 + k7 I_{bf}^3 + k8 I_{bf}^2 + k9 I_{bf} + k10)$$

$$I_{Arc\_600} = 6.45143 \text{ kA}$$

### 2. Cálculo de corriente de arco a voltaje de operación menor a 600V

$$I_{arc} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{0.6}{V_{oc}}\right)^2 \times \left(\frac{1}{I_{arc_{600}}}\right)^2 - \left(\frac{0.6^2 - V_{arc}^2}{0.6^2 \times I_{bf}^2}\right)}}$$

$$I_{Arco} = 3.83107 \text{ kA}$$

### 3. Cálculo energía incidente

$$E_{\leq 600} = \frac{12.522}{50} T \times 10^b$$

$$b = k1 + k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc_{600}}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + \dots + k11 \lg I_{bf} + k12 \lg D + k13 \lg I_{arc} + \lg \frac{1}{CF}$$

TABLA DE CONSTANTES	k	1	2	3	4	5	6	7
	VCB	0.753364	0.566	1.752636	0	0	-4.78E-09	1.96E-06
						8	9	10
						-0.000229	0.003141	1.092
							11	12
							0	-1.598
								13
								0.957

Factor b	-0.80647153
E	0.89941473 J/CM2
Conversion	0.238846
E	0.21482161 cal/cm2

$$E_{incidente} = 0.2148216 \text{ cal/cm2} \quad E < 600V$$

### 4. Cálculo de distancia de seguridad AFB

$$AFB_{\leq 600} = 10^{-\frac{c}{k12}}$$

$$c = k1 + k2 \lg G + \frac{k3 I_{arc_{600}}}{k4 I_{bf}^7 + k5 I_{bf}^6 + k6 I_{bf}^5 + k7 I_{bf}^4 + k8 I_{bf}^3 + k9 I_{bf}^2 + k10 I_{bf}} + \dots + k11 \lg I_{bf} + k13 \lg I_{arc} + \lg \frac{1}{CF} - \lg \frac{20}{T}$$

Factor C	3.505076
AFB	156.1041 mm
AFB	6.14583 pulgadas

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

