



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

**PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO EN  
INSTALACIONES INDUSTRIALES**

**Brandon Daniel Mérida Catalán**

Asesorado por el Ing. José Rafael Argueta Monterroso

Guatemala, octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO EN  
INSTALACIONES INDUSTRIALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**BRANDON DANIEL MÉRIDA CATALÁN**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ RAFAEL ARGUETA MONTERROSO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdoba
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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:

### **PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 29 de abril de 2 016.

**Brandon Daniel Mérida Catalán**

Guatemala 19 de septiembre de 2016

Ingeniero

Gustavo Benigno Orozco Godínez

Coordinador del Área de Potencia

Escuela de Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería

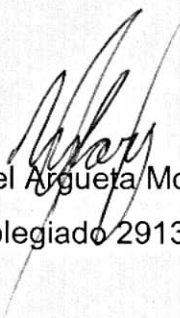
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Orozco:

Por este medio tengo a bien informarle que he realizado la revisión técnica del Trabajo de Graduación titulado "**PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**" desarrollado por el estudiante Brandon Daniel Mérida Catalán, carnet número 2011-14268; por lo cual considero que el trabajo de graduación cumple con el alcance y los objetivos definidos para su desarrollo, habiéndolo encontrado satisfactorio en su contenido y resultados, sometiendo a su consideración la aprobación del mismo, siendo responsables del contenido técnico el estudiante y el suscrito, en calidad de asesor.

Sin otro particular,

Atentamente,

  
Ing. José Rafael Argueta Monterroso  
No. Colegiado 2913

José Rafael Argueta Monterroso  
INGENIERO ELECTRICISTA  
Colegiado No. 2913



Ref. EIME 61. 2016.

Guatemala, 27 de SEPTIEMBRE 2016.

Señor Director  
Ing. Francisco Javier González López  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES;** del  
estudiante **Brandon Daniel Mérida Catalán,** que cumple con los  
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
D Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. **Gustavo Benigno Orozco Godínez**  
Coordinador Área Potencia



sro



REF. EIME 61. 2016.

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; **BRANDON DANIEL MÉRIDA CATALÁN** titulado: **PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES,** procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 13 DE OCTUBRE 2016.

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

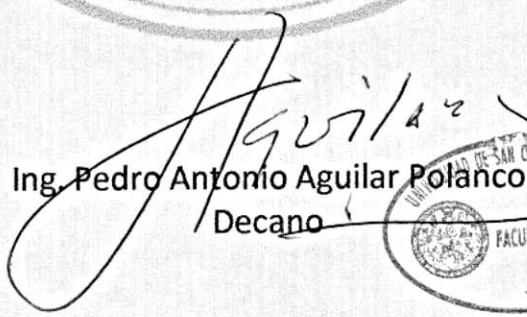


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 534.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE UNA GUÍA PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES**, presentado por el estudiante universitario: **Brandon Daniel Mérida Catalán**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, octubre de 2016

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme la vida, la oportunidad y la dicha de cumplir una meta más de mi vida.
- Mis padres** María Elvira Catalán y Milton Heriberto Mérida por su apoyo, confianza y especialmente por su amor incondicional.
- Mis hermanos** Edson Smailly Mérida, Génesis Milena Mérida y Kimberly Arlene Mérida por brindarme siempre la ayuda que necesitaba y su cariño.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Mi madre**

A quien amo mucho, por ser una persona que siempre ha estado a mi lado apoyándome, aconsejándome y dándome ánimos para seguir superándome.

### **Mis hermanos**

Por ser las personas que más me comprenden, brindándome amistad, consejos y cariño.

### **Mis amigos**

José Villatoro y Luis Vela con los cuales compartí desvelos, proyectos, decepciones y alegrías en toda mi vida universitaria. Además, por brindarme su apoyo y amistad sin esperar algo a cambio.

### **Mi asesor**

Por el tiempo, consejos, enseñanzas y apoyo que me brindó en la elaboración de este trabajo de graduación.

### **La Facultad de Ingeniería**

Por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria dentro de sus aulas.

**Comisión Nacional de  
Energía Eléctrica**

Por darme la oportunidad de ingresar al campo profesional y ser ese instrumento de aprendizaje y desarrollo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Instalaciones eléctricas.....	1
1.1.1. Por su uso.....	1
1.1.2. Forma en la que se instalan.....	2
1.2. Características de las instalaciones eléctricas industriales .....	2
1.3. Componentes de una instalación eléctrica industrial .....	3
1.3.1. Conductores .....	3
1.3.2. Tubería .....	3
1.3.3. Protecciones.....	3
1.3.4. Tableros eléctricos.....	4
1.3.5. Transformadores .....	4
1.3.6. Cargas .....	4
1.3.7. Centro de control de motores (MCC).....	5
1.4. Diagrama eléctrico.....	5
1.5. Simbología utilizada en instalaciones industriales .....	5
1.6. Arco eléctrico y las causas que lo originan.....	7
1.7. Riesgo de un arco eléctrico en instalaciones industriales .....	8
1.7.1. Efectos del arco eléctrico.....	9

	1.7.1.1.	La temperatura .....	9
	1.7.1.2.	La explosión .....	10
	1.7.1.3.	Descarga eléctrica.....	11
1.8.		Fronteras de protección .....	11
1.9.		Seguridad en las instalaciones eléctricas industriales .....	13
	1.9.1.	El sistema de puesta a tierra .....	13
	1.9.2.	Protecciones eléctricas.....	14
	1.9.3.	Distancias de seguridad .....	14
	1.9.4.	Señalización.....	15
	1.9.5.	Equipo de protección personal .....	16
1.10.		Normas.....	21
	1.10.1.	Norma IEEE-1584-2002 .....	21
		1.10.1.1. Método de cálculo de la norma IEEE ...	21
	1.10.2.	Norma NFPA-70E .....	27
		1.10.2.1. Método de cálculo de la norma NFPA.....	28
2.		INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO .....	31
2.1.		<i>Software</i> para análisis de estudios de arco eléctrico .....	31
	2.1.1.	ETAP .....	32
	2.1.2.	EasyPower .....	32
	2.1.3.	SKM .....	33
	2.1.4.	NEPLAN.....	34
2.2.		Comandos y aspectos básicos del <i>software</i> .....	35
	2.2.1.	La interfaz de usuario.....	35
		2.2.1.1. Barra de opción de menú y barra de herramientas .....	41
		2.2.1.2. Área de trabajo.....	42

	2.2.1.3.	Paleta de símbolos .....	42
2.2.2.		Modo de análisis.....	43
	2.2.2.1.	Flujo de carga.....	44
	2.2.2.2.	Cortocircuito.....	45
	2.2.2.3.	Armónicos.....	47
	2.2.2.4.	Coordinación de dispositivos de protección .....	47
2.3.		Metodología para determinar la energía incidente .....	48
2.4.		Procedimiento para el estudio de riesgo de arco eléctrico .....	49
	2.4.1.	Identificación de los puntos o equipos con riesgo de arco eléctrico .....	49
	2.4.2.	Recopilación de datos del sistema .....	51
	2.4.3.	Elaboración del diagrama unifilar del sistema a analizar .....	53
	2.4.4.	Estudio de cortocircuito .....	53
	2.4.5.	Estimación de la corriente del arco eléctrico esperada.....	54
	2.4.6.	Estimación de la duración del arco eléctrico.....	56
	2.4.7.	Estimación de la energía incidente .....	58
	2.4.8.	Determinación de la categoría de riesgo del arco eléctrico .....	58
	2.4.9.	Determinación de la distancia de protección contra el arco eléctrico.....	59
	2.4.10.	Documentación de la evaluación de riesgo por el arco eléctrico .....	59
2.5.		Metodología para el estudio del arco eléctrico en instalaciones industriales.....	61

3.	ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES .....	63
3.1.	Conceptos básicos del estudio de cortocircuito .....	63
3.1.1.	Fuentes de cortocircuito .....	64
3.1.1.1.	Generadores y motores síncronos .....	64
3.1.1.2.	Motores de inducción .....	65
3.1.1.3.	El sistema de suministro.....	65
3.1.2.	Reactancias de las máquinas rotatorias.....	65
3.1.2.1.	Reactancia subtransitoria ( $X_d''$ ).....	66
3.1.2.2.	Reactancia transitoria ( $X_d'$ ).....	66
3.1.2.3.	Reactancia síncrona ( $X_s$ ) .....	66
3.1.3.	Tipos de falla .....	66
3.1.4.	Desarrollo de estudios de cortocircuito en <i>software</i> .....	68
3.2.	Conceptos básicos para el estudio de coordinación de protecciones.....	77
3.2.1.	Dispositivos de protección.....	78
3.2.1.1.	Fusibles .....	78
3.2.1.2.	Interruptores .....	79
3.2.1.2.1.	Interruptores en aire .....	80
3.2.1.2.2.	Interruptores en caja moldeada .....	80
3.2.1.3.	Combinación interruptor-fusible.....	81
3.2.1.4.	Relevadores .....	81
3.2.1.4.1.	Relevadores de sobrecorriente .....	81
3.2.1.4.2.	Relevadores diferenciales .....	83

3.2.2.	Ejemplo de coordinación de protecciones en <i>software</i> .....	83
4.	ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO.....	89
4.1.	Procedimiento para el estudio del arco eléctrico .....	89
4.2.	Desarrollo y análisis del cálculo de arco eléctrico .....	101
4.3.	Aplicación de los resultados .....	105
	CONCLUSIONES .....	109
	RECOMENDACIONES .....	111
	BIBLIOGRAFÍA .....	113
	APÉNDICES .....	115





# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Arco eléctrico .....	7
2.	Tipo de quemaduras .....	9
3.	Explosión por arco eléctrico .....	10
4.	Fronteras de aproximación.....	12
5.	Sistema de puesta a tierra .....	13
6.	Categoría de la ropa de protección .....	20
7.	Logotipo del <i>software</i> ETAP .....	32
8.	Logotipo del <i>software EasyPower</i> .....	33
9.	Logotipo del <i>software</i> SKM .....	33
10.	Logotipo del <i>software</i> NEPLAN.....	34
11.	Pantalla de inicio del <i>software</i> NEPLAN.....	36
12.	Parámetros del nuevo proyecto .....	37
13.	Abrir proyecto.....	38
14.	Ejemplos .....	39
15.	Tutoriales .....	40
16.	Interfaz de usuario.....	41
17.	Barra de opción de menú y barra de herramientas .....	42
18.	Paletas de símbolos.....	43
19.	Modo de análisis .....	44
20.	Parámetros del análisis de flujo de carga.....	45
21.	Parámetros del modo cortocircuito.....	46
22.	Parámetros del modo armónicos .....	47
23.	Opciones de cortocircuito.....	48

24.	Metodología para el estudio del arco eléctrico.....	62
25.	Tipos de fallas.....	67
26.	Diagrama unifilar de ejemplo de cortocircuito .....	68
27.	Identificación de nodos en cortocircuito .....	73
28.	Barra de herramientas análisis eléctrico .....	74
29.	Resultados del análisis de cortocircuito, en diagrama unifilar.....	74
30.	Barra de herramientas análisis eléctrico .....	75
31.	Resultados de cortocircuito.....	76
32.	Interruptor en aire .....	80
33.	Curvas de relevador con retraso de tiempo .....	82
34.	Funcionamiento del relevador diferencial .....	83
35.	Diagrama de ejemplo de coordinación.....	84
36.	Curva tiempo-corriente de motor .....	85
37.	Curva tiempo-corriente del cable .....	86
38.	Curva tiempo-corriente de interruptor .....	87
39.	Coordinación de la protección de motor .....	88
40.	Identificación de nodos con riesgo de arco eléctrico.....	89
41.	Diagrama unifilar instalación eléctrica industrial .....	92
42.	Selección de los nodos en cortocircuito.....	93
43.	Dispositivos de protección .....	95
44.	Nodos de 4.16 kV bajo falla .....	96
45.	Parámetros de arco eléctrico para nodos de 4.16 kV .....	97
46.	Habilitar cálculos del arco eléctrico.....	98
47.	Habilitar resultados del arco eléctrico .....	98
48.	Selección de resultados del arco eléctrico.....	99
49.	Etiqueta identificadora de riesgo de arco eléctrico.....	106
50.	Imprimir etiquetas de riesgo de arco eléctrico .....	107
51.	Etiquetas de riesgo de arco eléctrico .....	108

## TABLAS

I.	Símbolos eléctricos .....	6
II.	Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano.....	11
III.	Fronteras de aproximación a partes energizadas para protección contra electrocución en sistemas de corriente alterna .....	15
IV.	Normas para equipo de protección .....	17
V.	Categoría del equipo de protección personal ante el riesgo de arco eléctrico para corriente alterna.....	18
VI.	Características de la ropa de protección .....	20
VII.	Factores para equipamiento y clases de voltaje .....	22
VIII.	Distancias típicas de trabajo .....	25
IX.	Ecuaciones para calcular energía incidente y frontera de protección según tipo y capacidad del interruptor.....	27
X.	Fragmento de tabla, identificación de riesgo de arco eléctrico.....	50
XI.	Tiempos recomendados por la norma IEEE-1584-2002 para la operación de interruptores .....	57
XII.	Datos de equivalente de red .....	69
XIII.	Datos de nodos .....	69
XIV.	Datos de transformadores de dos devanados.....	70
XV.	Datos de motores.....	71
XVI.	Datos de generador.....	72
XVII.	Datos de transformador de 3 devanados .....	72
XVIII.	Resultados del análisis de cortocircuito .....	77
XIX.	Datos de equivalentes de red.....	90
XX.	Datos de nodos .....	91
XXI.	Datos de transformadores de dos devanados.....	91
XXII.	Resultados del estudio de cortocircuito.....	94
XXIII.	Resultados de arco eléctrico nodos de 4.16 kV .....	100

XXIV.	Resultados de arco eléctrico nodos de 0.48 kV .....	101
XXV.	Comparación de resultados de corriente de arco eléctrico .....	102
XXVI.	Comparación de resultados de energía incidente.....	103
XXVII.	Comparación de resultados de la distancia límite de protección de arco eléctrico .....	105

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b><math>I_{k''}</math></b>	Ángulo de corriente de cortocircuito inicial
<b>DC</b>	Corriente directa
<b>EPP</b>	Equipo de protección personal
<b><math>I_b</math></b>	Corriente de interrupción
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b><math>I_k</math></b>	Corriente de cortocircuito de estado estable
<b><math>I_{k''}</math></b>	Corriente de cortocircuito inicial
<b><math>I_p</math></b>	Corriente pico cortocircuito
<b>KA</b>	Kiloamperios
<b>KV</b>	Kilovoltios
<b>MCC</b>	Centro de control de motores
<b>MVA</b>	Megavoltio-ampere
<b>NEC</b>	Código eléctrico nacional
<b>NFPA</b>	Asociación Nacional de Protección Contra el Fuego
<b>V</b>	Voltios
<b><math>X_s</math></b>	Reactancia síncrona
<b><math>X_d'</math></b>	Reactancia transitoria
<b><math>X_d''</math></b>	Reactancia subtransitoria



## GLOSARIO

<b>Cortocircuito</b>	Aumento brusco de intensidad en la corriente eléctrica de una instalación por la unión directa de dos o más conductores.
<b>Diagrama unifilar</b>	Simplificación de un sistema eléctrico, representado por medio de una línea y de símbolos normalizados, para equipos asociados a una subestación.
<b>NEPLAN</b>	<i>Software</i> de simulación, modelación y análisis de sistemas eléctricos.
<b>Sobretensión</b>	Variación repentina de voltaje con relación a un nivel establecido y que afecta a los sistemas eléctricos de potencia.
<b>Tensión</b>	Voltaje o diferencia de potencial efectiva, entre dos conductores o entre un conductor y tierra.
<b>Valor por unidad (pu)</b>	Es la razón del valor de una magnitud al valor base expresado como un decimal.





## RESUMEN

Por medio del presente trabajo de investigación se da a conocer el estudio del arco eléctrico en instalaciones industriales y lo relacionado con el riesgo de un arco eléctrico en dichas instalaciones, lo anterior con la finalidad de que se determine la energía incidente en áreas o lugares de trabajo y así garantizar un ambiente laboral más seguro para las personas. En el capítulo I se desarrolla la teoría y las bases necesarias para entender las causas y efectos de un arco eléctrico, el equipo de protección personal; además, se detallan los métodos, ecuaciones y algunas consideraciones de las normas IEEE y NFPA las cuales determinan los parámetros necesarios con referencia al estudio de arco eléctrico.

En el capítulo II se explican los pasos necesarios para la realización de un estudio de arco eléctrico y se describen los posibles *software* a utilizar para analizar dichos estudios. En el capítulo III se describe, entre otras cosas, los conceptos básicos de un análisis de cortocircuito y de coordinación de esquemas de protecciones detallando y describiendo los equipos que son indispensables en toda instalación industrial.

En el capítulo IV se describe la realización de un estudio de arco eléctrico; detallando la obtención de la energía incidente, el límite de protección contra el arco eléctrico, categoría de riesgo y el análisis de los resultados obtenidos. El estudio realizado permite comprender de forma práctica y sencilla la metodología para la realización de estudios de arco eléctrico.



# OBJETIVOS

## General

Elaborar una guía técnica para realizar estudios de arco eléctrico en instalaciones industriales.

## Específicos

1. Analizar las causas que originan arcos eléctricos en instalaciones industriales y sus consecuencias.
2. Determinar los procedimientos y criterios técnicos efectivos para los estudios de arco eléctrico según las normas NFPA 70E y las normas IEEE Std. 1584.
3. Detallar los procedimientos y herramientas del *software* de simulación NEPLAN, para la realización de los estudios de cortocircuito, coordinación de protecciones y de arco eléctrico.
4. Determinar el procedimiento para la validación y evaluación de confiabilidad de los resultados en los estudios de arco eléctrico, con los cuales se garantice la seguridad de las personas y los equipos en instalaciones industriales.



## INTRODUCCIÓN

Hoy en día la energía eléctrica es indispensable para el ser humano. Ayuda con tareas relativamente sencillas en los hogares hasta tareas muy complejas en las industrias; por ende, en las industrias se utilizan equipos y maquinarias muy complejas que tienen instalaciones eléctricas igual de complejas. Para garantizar la seguridad de las instalaciones, de los equipos y de los operadores de la maquinaria, son necesarias las protecciones eléctricas; estas ante una falla inician el proceso de desconexión automática necesario para interrumpir el flujo de energía eléctrica que alimenta la falla.

Un arco eléctrico es un fenómeno que está relacionado con la habilidad, ante una falla, de convertir en conductor a un aislante (generalmente el aire) provocando daños en las instalaciones y lesiones en los operarios. Un estudio de arco eléctrico determina, entre otros parámetros, la energía incidente y las distancias límite de protección ante un arco eléctrico.

Por lo cual un estudio de arco eléctrico se considera de vital importancia para garantizar seguridad en las plantas industriales. Dicho estudio consiste en simular las instalaciones eléctricas industriales a evaluar, realizar un estudio de cortocircuito, un estudio de coordinación de protecciones y por último un estudio de arco eléctrico. Para el análisis de arco eléctrico se utilizará un *software* computacional para la obtención de resultados; además, se evaluará de forma manual el mismo escenario de análisis y se comprobará la diferencia entre ambos resultados.



# 1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se definirán algunos conceptos básicos sobre instalaciones eléctricas industriales, niveles de voltaje en instalaciones eléctricas, diagramas unifilares, arco eléctrico, estudio del arco eléctrico, riesgo de un arco eléctrico y, por último, algunas normativas referentes al estudio del arco eléctrico.

## 1.1. Instalaciones eléctricas

Una instalación eléctrica hace referencia a los elementos y componentes para transportar la energía eléctrica hasta el punto donde se transformará en otro tipo de energía para diversos usos, producir un trabajo, iluminar áreas, producir movimiento, entre otros. Las instalaciones eléctricas se clasifican de la siguiente manera:

### 1.1.1. Por su uso

Dependen del uso que se le va a dar a la instalación:

- Instalaciones domiciliarias: comprenden el nivel de voltaje necesario para alimentar los equipos de una casa: televisión, radio, refrigerador, entre otros.
- Instalaciones industriales: su nivel de voltaje habitualmente es mayor para poder servir cargas de mayor potencia en comparación de las instalaciones domiciliarias.



- Instalaciones comerciales: son una combinación de las instalaciones domiciliarias e industriales; generalmente alimentan edificios, oficinas, comercios, entre otros.

### **1.1.2. Forma en la que se instalan**

Estas instalaciones dependen de la forma en la que se construyen y pueden ser de la siguiente manera:

- Visibles
- Ocultas dentro de techos, paredes, entre otros
- Aéreas
- Subterráneas

### **1.2. Características de las instalaciones eléctricas industriales**

Toda instalación eléctrica debe cumplir con ciertas características para garantizar su uso:

- Seguras
- Confiables
- Eficientes
- Económicas
- Flexibles
- Agradables a la vista
- Simples

### **1.3. Componentes de una instalación eléctrica industrial**

Generalmente son varios los componentes que conforman una instalación eléctrica industrial:

#### **1.3.1. Conductores**

Los conductores son los encargados del transporte de la energía eléctrica y son contruidos de un material conductor (generalmente de cobre o aluminio) y con forro de un material aislante. Los conductores deben de tener una forma y cierta flexibilidad para que sea fácil de maniobrarlos.

#### **1.3.2. Tubería**

La tubería es la encargada de contener y proteger a los conductores de cualquier daño físico que puedan sufrir. Las tuberías pueden ser de diferentes tipos de materiales dependiendo de la instalación a realizar.

#### **1.3.3. Protecciones**

Las funciones principales de las protecciones eléctricas son las de detectar y aislar lo más rápido posible el área afectada del sistema, de tal manera que se minimice el efecto y se mantenga el servicio con normalidad; además de proporcionar al sistema un medio de recierre automático.

Las protecciones más importantes que toda instalación eléctrica debe tener son: protección contra cortocircuitos, protección contra sobrecargas y protección contra electrocución.

#### **1.3.4. Tableros eléctricos**

El tablero es un gabinete que tiene la función principal de reunir en un solo punto todos los medios de protección de los circuitos derivados en la instalación eléctrica. Los tableros eléctricos pueden ser pequeños (instalaciones eléctricas residenciales) o pueden ser muy robustos (instalaciones industriales) dependiendo de la instalación eléctrica. Estos, en la mayoría de veces, son los más propensos a producir un accidente por arco eléctrico a causa del mal dimensionamiento de las protecciones o a su mala coordinación.

#### **1.3.5. Transformadores**

El transformador es una máquina estática con la capacidad de cambiar el voltaje que se le suministre, ya sea aumentado el nivel de tensión (transformadores elevadores) o reduciéndolo (transformadores reductores).

#### **1.3.6. Cargas**

Las cargas son los equipos o los medios finales que utilizan la energía eléctrica para un fin:

- Motores
- Calentadores
- Luminarias
- Estufas
- Freidoras
- Compresores
- Entre otros

### **1.3.7. Centro de control de motores (MCC)**

Los centros de control de motores generalmente se utilizan en instalaciones eléctricas industriales en las cuales se requiera la utilización de una gran cantidad de motores. En estos centros de motores se agrupan, como en los tableros eléctricos, los dispositivos de protección de los motores que se pretenden utilizar para realizar cierta tarea.

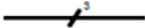











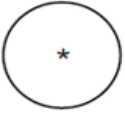

### **1.4. Diagrama eléctrico**

Un diagrama eléctrico es una representación gráfica de los elementos que conforman una instalación eléctrica con simbología que cualquier electricista pueda comprender. Generalmente este diagrama es utilizado para ubicar los componentes de una instalación eléctrica y de esta forma facilitar el estudio de la instalación; además, ante una contingencia poder analizar el problema y la solución más apropiada.

### **1.5. Simbología utilizada en instalaciones industriales**

Los símbolos eléctricos ayudan a representar en el diagrama eléctrico los elementos que componen la instalación eléctrica. A continuación, se presentan los símbolos más utilizados:

Tabla I. **Símbolos eléctricos**

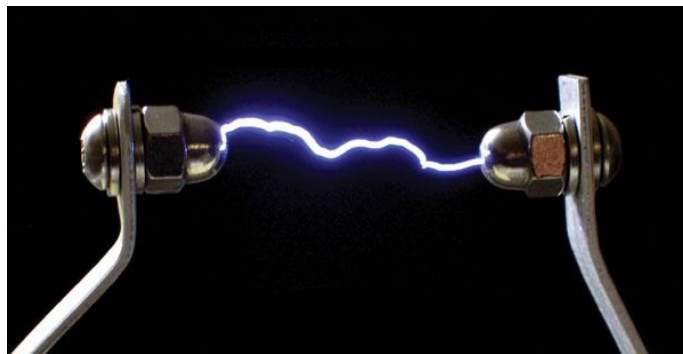
Símbolo	Significado
	Cable
	Tierra símbolo general
	Masa
	Corriente continua
	Corriente alterna
	Lámpara símbolo general
	Interruptor símbolo
	Interruptor bipolar
	Fusible símbolo general
	Fusible interruptor
	Devanado trifásico en triángulo
	Devanado trifásico en estrella
	Máquina  El asterisco, *, es sustituido por una de las literales siguientes:  G: Generador GS: Generador síncrono M: Motor MS: Motor síncrono
	Transformador de dos arrollamientos

Fuente: Norma CEI 617, UNE-EN 60617-2, UNE-EN 60617-3 y UNE-EN 60617-7.

## 1.6. Arco eléctrico y las causas que lo originan

Un arco eléctrico es un fenómeno que genera una cantidad de energía incidente, causado por la ionización de aire (o cualquier medio gaseoso) entre superficies energizadas o una superficie energizada y otra conectada a tierra. Usualmente un arco eléctrico se percibe con un destello de luz (causado por la radiación de la corriente eléctrica en el aire debido a una deficiencia en el aislamiento eléctrico), un intenso calor, sonoras explosiones y vibraciones en las superficies.

Figura 1. Arco eléctrico



Fuente: *Arco eléctrico: consecuencias, normas y protección.*

<https://constructorelectrico.com/arco-electrico-consecuencias-normas-y-proteccion/>. Consulta:

15 de febrero de 2016.

Generalmente las causas que producen un arco eléctrico son las impurezas en las superficies de los aislamientos, el deterioro y corrosión de los aislamientos, contacto con agua (accidentales) o con cualquier parte energizada, fallas en los aislamientos de los equipos, procedimientos inapropiados de trabajo, diseño inadecuado de protecciones eléctricas de los equipos, entre otras. Las partes, que en la mayoría del tiempo forman un arco

eléctrico, son los fusibles e interruptores automáticos de protección y partes u objetos en movimiento cercanas a superficies energizadas.

Cuando se produce un arco eléctrico este genera una fuente de temperatura alta (una temperatura mayor a los 19 000°C), provocando una expansión súbita del aire y evaporizando casi cualquier material. Lo anterior se traduce en una explosión que puede arrojar trozos de material derretido a cierta distancia, además de quemaduras ocasionadas por el arco eléctrico y causar electrocución al personal.

### **1.7. Riesgo de un arco eléctrico en instalaciones industriales**

La cantidad de energía incidente producida por un arco eléctrico es directamente proporcional a la corriente que alimenta el arco eléctrico siendo el nivel de tensión, de las instalaciones, de menor efecto, el causante del arco eléctrico. Por lo anterior es de vital importancia tener una especial precaución en sistemas de baja tensión ya que la mayoría de veces los niveles de corriente de cortocircuito son elevadas.

Es de importancia mencionar que los accidentes de arco eléctrico pueden ser reducidos por medio de programas de seguridad, señalamientos y delimitaciones de áreas de riesgo, así como el uso adecuado del equipo de protección personal entre otros.

Como medida de seguridad toda industria debe tener conocimiento del estado actual de sus instalaciones para evitar el riesgo de ocurrencia de un arco eléctrico. Si no se cuenta con el estudio actual de las instalaciones es importante que se elaboren planes de acción para disminuir el riesgo de un arco eléctrico por medio de vigilancia y mantenimientos.

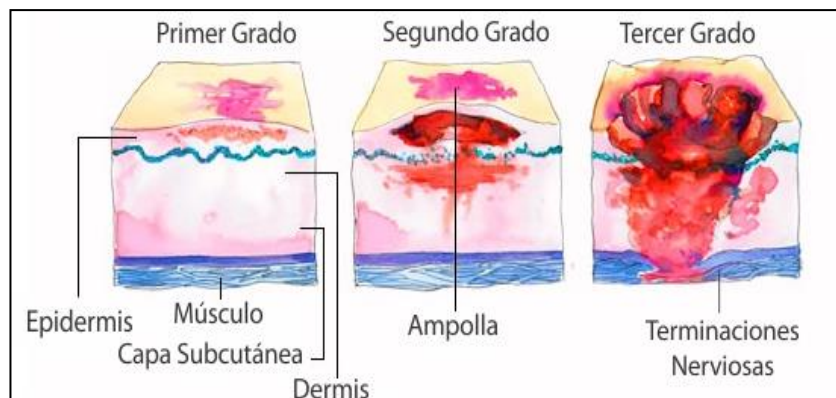
## 1.7.1. Efectos del arco eléctrico

Los accidentes por arco eléctrico pueden ocasionar diferentes lesiones en las personas, entre las más comunes: daños en los nervios, quemaduras en todos los grados, pérdida de la audición, amputación de miembros, ceguera, entre otros. A continuación se describen los efectos que se producen a causa de un arco eléctrico:

### 1.7.1.1. La temperatura

Al producirse un arco eléctrico aumenta la temperatura lo que genera una radiación de calor que puede causar quemaduras graves en las personas, dependiendo de la distancia a la que se encuentre la persona del arco eléctrico. El daño provocado por un arco eléctrico a una persona puede producir quemaduras de primer, segundo, tercer grado o la muerte según la cantidad de calor que reciba del arco eléctrico.

Figura 2. Tipo de quemaduras



Fuente: *Tipos de Quemaduras*. <http://saludcomoencasa.com/?p=907#>. Consulta: 15 de febrero de 2016.



### 1.7.1.2. La explosión

La descarga precipitada de energía, provoca que el aire se caliente en un período muy corto de tiempo lo cual causa una onda de presión alta. El aumento brusco de presión y el aumento del volumen de los materiales causan una explosión en el aire. Esta explosión puede devastar todo lo que este a su alcance, provocar un gran estruendo y arrojar partículas a altas velocidades.

Figura 3. **Explosión por arco eléctrico**



Fuente: *Peligros eléctricos*. <https://constructorelectrico.com/peligros-electricos/>. Consulta: 15 de febrero de 2016.

La explosión puede causar desmembramiento, quemaduras y daños en la audición, ya que esta puede arrojar objetos, producir altas temperaturas y alcanzar niveles de ruido superiores a los 140 dB.

### 1.7.1.3. Descarga eléctrica

La descarga eléctrica es la circulación de corriente eléctrica sobre el cuerpo humano, sus efectos, dependen de la magnitud de corriente y de las condiciones físicas de la persona. A continuación se presenta una tabla que describe el efecto físico causado a la persona dependiendo de la corriente que le atraviesa:

Tabla II. **Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano**

<b>Corriente eléctrica</b>	<b>Fenómeno físico</b>
< 1mA	Ninguno
1 mA	Umbral de sensación, sensación de hormigueo
2-10 mA	Sensación de dolor
10-20 mA	Nivel de parálisis de brazos
20-50 mA	Parálisis respiratoria
50-100 mA	Nivel de fibrilación (0.5%)
100-200 mA	Nivel de fibrilación (99.5%)
>200 mA	Quemadura de tejidos

Fuente: *NFPA 70E series*. <http://www.mi-wea.org/docs/Arc%20Flash%20-%20Reside.pdf>.

Consulta: 17 de mayo de 2016.

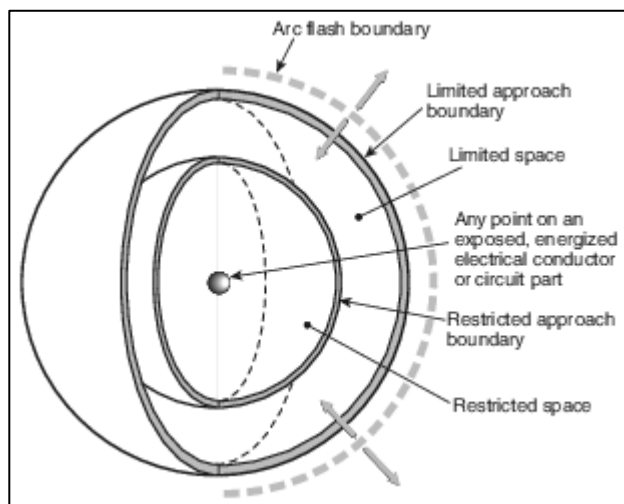
## 1.8. Fronteras de protección

La norma NFPA 70E define 4 fronteras de protección con el fin de determinar parámetros de seguridad eléctrica en las áreas de trabajo tomando en cuenta la energía incidente y los equipos de protección personal.

La frontera de protección a la descarga de arco es la distancia desde los equipos energizados hasta donde una persona puede estar expuesta a una

descarga de arco eléctrico y producirle quemaduras de segundo grado. La frontera de aproximación limitada es la distancia desde los equipos energizados hasta una distancia en la cual una persona no calificada no debe exponerse ni cruzar.

Figura 4. **Fronteras de aproximación**



Fuente: *NFPA. Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition. p 61.*

La frontera de aproximación restringida, es la distancia desde los equipos energizados hasta una distancia la cual solo las personas calificadas pueden cruzar y están expuestas a recibir una descarga por arco eléctrico. La frontera de aproximación prohibida es considerada como una zona donde se estuviera en contacto directo con las partes energizadas.

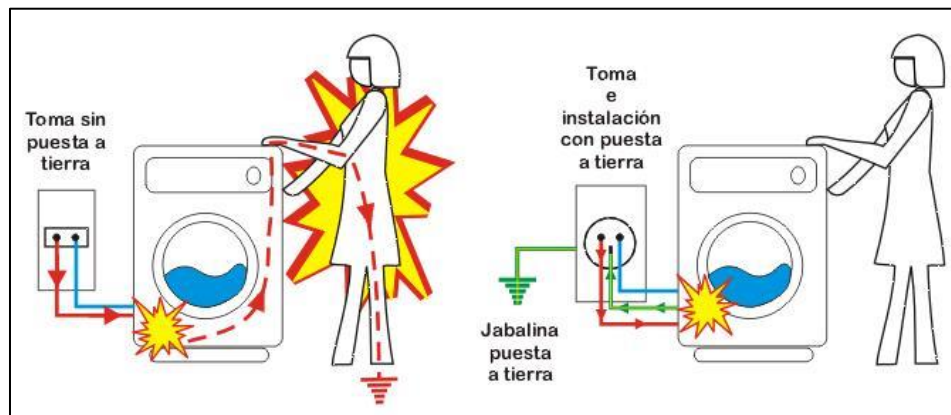
## 1.9. Seguridad en las instalaciones eléctricas industriales

Los accidentes por arco eléctrico generalmente son causados por deficiencias en las instalaciones eléctricas y no por procedimientos incorrectos de los operarios o por falta de equipo de protección. Por esta razón, los principales componentes a evaluar en las instalaciones, son los siguientes:

### 1.9.1. El sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra es la conexión eléctrica de las partes de una instalación (o de los equipos) y uno o varios electrodos enterrados en el suelo con el fin de que no exista diferencia de potencial. De igual forma, estas conexiones permitirán el paso de las corrientes originadas por descargas atmosféricas y drenarlas hacia el terreno.

Figura 5. Sistema de puesta a tierra



Fuente: *Sistema de puesta a tierra*. <http://colmenarezjl.blogspot.com/2012/06/sistema-de-puesta-tierra-spat.html>. Consulta: 16 febrero de 2016.

### **1.9.2. Protecciones eléctricas**

Los efectos que producen las fallas eléctricas dependen de la magnitud de la falla y de su duración; por esa razón es importante la implementación de sistemas de protección adecuados y con los ajustes necesarios para garantizar la detección de cualquier anomalía en el sistema y la protección de los equipos y las personas.

Por lo anterior es indispensable realizar los ajustes necesarios en las protecciones eléctricas realizando los estudios de cortocircuito y el estudio de coordinación de esquemas de protección.

### **1.9.3. Distancias de seguridad**

La distancia de seguridad se define como la distancia mínima entre un punto energizado y la parte más próxima del cuerpo de la persona. Esta distancia es para prevenir riesgos de electrocución cuando se realizan trabajos en la proximidad de partes no aisladas en las instalaciones eléctricas.

La norma NFPA 70E establece que ninguna persona calificada deberá aproximarse o tomar algún objeto cerca de las partes de los equipos energizados que operen a 50 voltios o más; a excepción que la persona se encuentra debidamente aislada, con el equipo de protección necesario sin sobrepasar la frontera de aproximación prohibida o si la parte energizada que opera a 50 voltios o más se encuentra debidamente aislada.

En la tabla siguiente observamos las fronteras de aproximación a las partes energizadas según la NFPA 70E:

Tabla III. **Fronteras de aproximación a partes energizadas para protección contra electrocución en sistemas de corriente alterna**

(1)	(2)	(3)	(4)
	Frontera de aprox. limitada		
Rango de tensión nominal del sistema, fase a fase	Conductor móvil expuesto	Parte de circuito fija expuesta	Frontera de aproximación restringida, incluyendo suma de movimiento inadvertido
< 50 V	No especificada	No especificada	No especificada
50 V-150 V	3.0 m	1.0 m	Evitar contacto
151 V- 750 V	3.0 m	1.0 m	0.3 m
751 V -15 kV	3.0 m	1.5 m	0.7 m
15.1 kV-36 kV	3.0 m	1.8 m	0.8 m
36.1 kV-46 kV	3.0 m	2.5 m	0.8 m
46.1 kV-72.5 kV	3.0 m	2.5 m	1.0 m
72.6 kV-121 kV	3.3 m	2.5 m	1.0 m
138 kV-145 kV	3.4 m	3.0 m	1.2 m
161 kV-169 kV	3.6 m	3.6 m	1.3 m
230 kV-242 kV	4.0 m	4.0 m	1.7 m
345 kV-362 kV	4.7 m	4.7 m	2.8 m
500 kV-550 kV	5.8 m	5.8 m	3.6 m
765 kV-800 kV	7.2 m	7.2 m	4.9 m

Fuente: *NFPA. Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition.* p 26.

#### 1.9.4. Señalización

El principal objetivo de la señalización es transmitir mensajes de prevención, prohibición o información en forma clara, precisa y de fácil entendimiento para todos, en una zona en la que se ejecutan trabajos eléctricos o en zonas de operación de máquinas, equipos o instalaciones que entrañen un peligro potencial.

Las partes energizadas deben de estar dispuestas de tal manera que garanticen una protección contra contacto accidental, confinándolas en gabinetes o en recintos apropiados, de tal forma que solo tenga acceso a ellas el personal calificado. Además, debe estar señalizado e identificado el equipo energizado que representa un riesgo eléctrico.

#### **1.9.5. Equipo de protección personal**

Los equipos de protección personal actúan como barrera frente a los peligros que tiene el trabajador, al verse afectado por un choque eléctrico, al arco eléctrico y a explosiones.

La norma NFPA 70E determina que todos los empleados que trabajan en áreas propensas a peligros eléctricos deberán utilizar el equipo necesario para las partes del cuerpo que se deben de proteger y según el trabajo a realizar. Además, describe las partes que deben de protegerse: cabeza, cara, cuello, mentón, ojos, cuerpo, manos, brazos, pies y piernas; todos los equipos de protección deben contar con la categoría adecuada según el trabajo específico a realizar; siguiendo la normativa correspondiente de cada equipo de protección según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla IV. **Normas para equipo de protección**

<b>Tema</b>	<b>Título del documento</b>	<b>Número del documento</b>
Clasificación prenda de vestir contra arco	Especificación de rendimiento estándar para materiales textiles de la vestimenta que deben utilizar los trabajadores electricistas expuestos a arcos momentáneos y a peligros térmicos relacionados	ASTM F1506
	Guía estándar para el cuidado y mantenimiento de la ropa resistente al fuego, energía térmica y descarga de arco	ASTM F1449
	Guía estándar para cuidado y mantenimiento de la flama en el hogar y ropa resistente al arco	ASTM F2757
Delantales aislantes	Especificación de delantales estándar para el aislamiento eléctrico	ASTM F2677
Protección general para ojos y cara	Protección ocupacional y educativa, práctica para los ojos y cara	ANSI Z87.1
Clasificación de equipos para la cara contra arco	Método de prueba para determinar la clasificación de arco y especificaciones estándar para protectores en ojos o faciales	ASTM F2178
Protección contra caídas	Especificación estándar de equipamiento personal contra caídas	ASTM F887
Especificaciones calzado dieléctrico	Especificación estándar para calzado dieléctrico	ASTM F1117
Método de prueba calzado dieléctrico	Método de prueba estándar para determinar la rigidez dieléctrica del calzado dieléctrico	ASTM F1116
Método de prueba estándar para calzado	Método de prueba estándar para la protección de los pies	ASTM F2412
Guantes protectores de cuero	Especificación estándar para protectores de cuero para guantes y manoplas aislantes	ASTM F696
Guantes aislantes de goma	Especificación estándar para guantes de goma aislante	ASTM D120
Cuidados de servicios - guantes y mangas	Especificación estándar para el cuidado permanente de guantes y mangas aislantes	ASTM F496
Protección para la cabeza - cascos	Requisitos para cascos de protección para trabajadores industriales	ANSI Z89.1
Ropa impermeable - clasificación de arco	Especificación estándar para arco y ropa impermeable resistente a la llama	ASTM F1891



Continuación tabla IV.

Inspección visual - productos de protección de caucho	Guía estándar para la inspección visual de los equipos de protección eléctrica de goma	ASTM F1236
Aislamiento de mangas	Especificaciones estándar para mangas aislantes de goma	ASTM D1051

Fuente: NFPA. *Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition.* p 34.

Para determinar la categoría del equipo de protección a utilizar ante el riesgo de ocurrencia de un arco eléctrico, se establece la siguiente tabla según la norma:

Tabla V. **Categoría del equipo de protección personal ante el riesgo de arco eléctrico para corriente alterna**

Equipo	Categoría de EPP	Límite de arco eléctrico
Panel de distribución u otro equipo con tensión nominal de 240 voltios y menos  Parámetros: máxima corriente de cortocircuito de 25 kA, tiempo máximo de limpiamiento de falla de 0.03 seg (2 ciclos), distancia de trabajo 455 mm (18 in)	1	485 mm (19 in)
Panel de distribución u otro equipo con tensión nominal mayor de 240 voltios y hasta 600 voltios  Parámetros: máxima corriente de cortocircuito de 25 kA, tiempo máximo de limpiamiento de falla de 0.03 seg (2 ciclos), distancia de trabajo de 455 mm (18 in)	2	900 mm (3 ft)
Centros de control de motores clase 600-v (MCCs)  Parámetros: máxima corriente de cortocircuito de 65 kA, tiempo máximo de limpiamiento de falla de 0.03 seg (2 ciclos), distancia de trabajo de 455 mm (18 in.)	2	1.5 m (3 ft)

Continuación tabla V.

Centros de control de motores clase 600-v (MCCs)  Parámetros: máxima corriente de cortocircuito de 42 kA, tiempo máximo de limpiamiento de falla de 0.33 seg (20 ciclos), distancia de trabajo de 455 mm (18 in.)	4	4.3 m (14 ft)
Conmutadores de clase 600 v (con interruptores de potencia o swiches fusionados) y cajas de distribución de clase 600 v  Parámetros: un máximo de 35 kA de corriente de cortocircuito; máximo tiempo de limpiamiento de 0.5 segundos (30 ciclos); distancia de trabajo de 455 mm (18 in)	4	6 m (20 ft)
Otra clase de equipos de 600 v  Parámetros: un máximo de 65 kA de corriente de cortocircuito; tiempo máximo de despeje de falla de 0.03 segundos (2 ciclos) distancia de trabajo de 455 mm (18 in)	2	1.5 m (5 ft)
NEMA E2, arrancador de motor, 2.3 kV hasta 7.2 kV  Parámetros: un máximo de 35 kA de corriente de cortocircuito; máximo tiempo de limpiamiento de 0.24 segundos (15 ciclos); distancia de trabajo de 910 mm (36 in)	4	12 m (40 ft)
Conmutadores de metal revestido, 1kV hasta 15 kV  Parámetros: un máximo de 35 kA de corriente de cortocircuito; máximo tiempo de limpiamiento de 0.24 segundos (15 ciclos); distancia de trabajo de 910 mm (36 in)	4	12 m (40 ft)
Conmutadores resistentes al arco, tipo 1 o 2 y conmutadores de interrupción revestidos de metal  Parámetros: un máximo de 35 kA de corriente de cortocircuito; máximo tiempo de limpiamiento de 0.24 segundos (15 ciclos); distancia de trabajo de 910 mm (36 in)	N/A (puertas cerradas)	N/A (puertas cerradas)
	4 (puertas abiertas)	12 m (40 ft)

Fuente: NFPA. *Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition.* p 38.

Además, la norma NFPA 70E establece los equipos mínimos dependiendo de la categoría de peligro/riesgo y la energía incidente máxima los cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla VI. **Características de la ropa de protección**

Nivel de Riesgo	Descripción de la ropa	Energía incidente máxima (cal/cm <sup>2</sup> )
0	Materiales no fundentes, inflamables (p.e., algodón no tratado, lana, rayón o seda, o combinaciones de estos materiales) con un peso de la tela mínima de 4.5 oz/yd <sup>2</sup>	N/A
1	Camisa RLL y pantalones RLL u overol RLL	4
2	Ropa interior de algodón - pantaloncillos corto y de manga corta, más camisa RLL y pantalones RLL	8
3	Ropa interior de algodón más camisa RLL y pantalones RLL mas overol o ropa interior de algodón más dos overoles RLL	25
4	Ropa interior de algodón más camisa RLL y pantalones RLL más vestido de arco multicapas	40

Fuente: *NFPA. Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2013. p 40.*

Figura 6. **Categoría de la ropa de protección**



Fuente: *Riesgo eléctrico. <http://unce.org.mx/www/wp-content/uploads/2015/12/CURSORIESGOELECTRICO.pdf>. Consulta: 17 de mayo de 2016.*

## **1.10. Normas**

### **1.10.1. Norma IEEE-1584-2002**

Esta norma establece cálculos para la determinación de la distancia de riesgo de arco eléctrico y la energía incidente en la que las personas pueden estar en riesgo en los lugares de trabajo.

Lo complejo y detallado de la metodología de análisis de arco eléctrico de esta norma la hace la más adecuada para realizar dichos estudios, pero a su vez se necesita mucha información del sistema, un *software* especializado o una amplia experiencia en este tema para evaluar la metodología de forma eficiente.

#### **1.10.1.1. Método de cálculo de la norma IEEE**

La metodología de la norma IEEE 1584 determina ecuaciones básicas para el cálculo de energía incidente y el límite de arco eléctrico; el modelo es aplicable para sistemas con los siguientes parámetros:

- Voltaje entre 0.208 kV a 15 kV, trifásico
- Frecuencias 50 Hz a 60 Hz
- Corriente de falla 700 A a 106 000 A
- Distancia entre conductores 13 mm a 152 mm

Primero deberá ser encontrada la corriente de arco eléctrico trifásico mediante las siguientes ecuaciones:

- En dicha norma se establece la ecuación de corriente de arco eléctrico, recomendada para sistemas por debajo de 1kV, la cual se muestra a continuación:

$$\lg I_a = K + 0.6621 \lg I_{bf} + 0.0966V + 0.000526G + 0.5588V(\lg I_{bf}) - 0.00304G(\lg I_{bf})$$

Donde:

$\lg$  = logaritmo de base 10.

$I_a$  = corriente de arco (kA).

$K$  = es -0.153 para configuraciones abiertas y -0.097 para configuraciones cerradas o tipo caja.

$I_{bf}$  = corriente de falla de cortocircuito trifásica (simétrica RMS) (kA).

$V$  = voltaje del sistema (kV).

$G$  = distancia entre conductores (mm).

Tabla VII. Factores para equipamiento y clases de voltaje

Voltaje del sistema (kV)	Tipo de equipo	Típica separación entre conductores (mm)	Factor de distancia x
0.208-1	Aire libre	10-40	2.0000
	Conmutadores	32	1.4730
	MCCs y paneles	25	1.6410
	Cables	13	2.0000
>1-5	Aire libre	102	2.0000
	Conmutadores	13-102	0.9730
	Cables	13	2.0000
>5-15	Aire libre	13-153	2.0000
	Conmutadores	153	0.9730
	Cables	13	2.0000

Fuente: NFPA. Standard for Electrical Safety in the Workplace, 2015 Edition. p 67.

- Además en dicha norma determinan la ecuación de corriente de arco eléctrico recomendada para sistemas iguales o mayores a 1 kV, la cual es una ecuación más simplificada en comparación a la de sistemas por debajo de 1 kV. A continuación se describe la ecuación para sistemas mayores a 1 kV:

$$lgI_a = 0.00402 + 0.983lgI_{bf}$$

Donde:

$lg$  = logaritmo de base 10

$I_a$  = corriente de arco (kA)

$I_{bf}$  = corriente de falla de cortocircuito trifásica (simétrica RMS) (kA)

Previo a la determinación de la energía incidente total, según la norma NFPA 70E, se evalúa una ecuación con datos normalizados según fundamentos, para lo cual se utilizará un tiempo de duración del arco de 0,2 segundos y una distancia, desde el posible arco hasta el punto donde se encuentra la persona, de 610 mm.

La norma determina una ecuación empírica para calcular la energía incidente normalizada, con los valores descritos anteriormente, la cual será de vital ayuda para determinar la energía incidente, con los parámetros específicos, en cada análisis. La ecuación descrita en la norma es la siguiente:

$$lgE_n = k_1 + k_2 + 1.081lgI_a + 0.0011G$$

Donde:

$I_g$  = logaritmo de base 10.

$E_n$  = energía incidente para un tiempo y distancia normalizado ( $J/cm^2$ ).

$I_a$  = corriente de arco (kA).

$k_1$  = es -0.792 para configuraciones abiertas y -0.555 para configuraciones cerradas o tipo caja.

$K_2$  = es 0 para sistemas eléctricos sin conexión a tierra o con resistencia a tierra alta, -0.113 para sistemas aterrizados.

$G$  = distancia entre conductores (mm).

Con base en el resultado anterior, de la energía normalizada, se procede a encontrar la energía incidente según los parámetros y requerimientos. Para encontrar la energía incidente, la ecuación descrita en la norma es la siguiente:

$$E = 4.18C_f E_n (t/0.2) \left( 610^x / D^x \right)$$

Donde:

$E$  = energía incidente ( $J/cm^2$ ).

$C_f$  = factor de cálculo.

= 1.0 para tensiones por encima de 1 kV.

= 1.5 para tensiones iguales o por debajo de 1 kV.

$E_n$  = energía incidente para un tiempo y distancia normalizado ( $J/cm^2$ ).

$t$  = tiempo de duración del arco (segundos).

$D$  = distancia desde el punto posible donde ocurre el arco hasta la persona (distancia de trabajo) (mm). Ver Tabla VIII para distancias típicas de trabajo.

$X$  = exponente de la distancia. Ver Tabla VII.

Tabla VIII. **Distancias típicas de trabajo**

Clase de equipo	Típica distancia de trabajo (mm)
15-kV conmutadores	910
5-kV conmutadores	91
Conmutadores bajo voltaje	610
MCCs de bajo voltaje y paneles	455
Cables	455
Otros	Se determina en campo

Fuente: *NFPA. Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition.* p 68.

Para tensiones mayores a 15 kV se puede considerar que la corriente de falla de cortocircuito es igual a la corriente de falla de arco y por lo cual se deriva la siguiente ecuación teórica:

$$E = 2.142 * 10^6 V I_{bf} \left( \frac{t}{D^2} \right)$$

Donde:

E = energía incidente (J/cm<sup>2</sup>)

V = voltaje del sistema (kV)

I<sub>bf</sub> = corriente de falla de cortocircuito trifásica (simétrica RMS) (kA)

t = tiempo de duración del arco (segundos)

D = distancia del arco eléctrico a la persona (distancia de trabajo) (mm)

G = distancia entre conductores (mm)



Para determinar la frontera de protección contra el arco eléctrico (distancia probable de recibir quemadura de segundo grado, la piel recibe 5.0 J/cm<sup>2</sup>) se establece dos ecuaciones las cuales se observan a continuación:

- Ecuación empírica:

$$D_b = \left[ 4.184 C_f E_n (t/0.2) \left( 610^x / E_B \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

- Ecuación teórica

$$D_b = \sqrt{2.142 * 10^6 V I_{bf} \left( \frac{t}{E_B} \right)}$$

Donde:

$D_b$  = distancia desde el punto de arco hasta la frontera de protección contra el arco eléctrico (mm).

$C_f$  = factor de cálculo.

= 1.0 para tensiones por encima de 1 kV.

= 1.5 para tensiones iguales o por debajo de 1 kV.

$E_n$  = energía incidente para un tiempo y distancia normalizado (J/cm<sup>2</sup>).

$t$  = tiempo de duración del arco (segundos).

$X$  = exponente de la distancia. Ver Tabla VII.

$E_B$  = energía incidente en la frontera de protección (J/cm<sup>2</sup>).

$V$  = voltaje del sistema (kV).

$I_{bf}$  = corriente de falla de cortocircuito trifásica (kA).

En la tabla siguiente se muestran las ecuaciones para determinar la energía incidente y la frontera de protección de arco eléctrico, dependiendo de

algunos interruptores típicos, considerando solo la corriente de falla trifásica de cortocircuito.

Tabla IX. **Ecuaciones para calcular energía incidente y frontera de protección según tipo y capacidad del interruptor**

Rango (A)	Tipo de breaker	Tipo de disparo	480 V e inferior	
			Energía Incidente (J/cm <sup>2</sup> )	Límite de arco eléctrico (mm)
100-400	MCCB	TM o M	0.189 lbf + 0.548	9.16 lbf + 194
600-1200	MCCB	TM o M	0.223 lbf + 1.590	8.45 lbf + 364
600-1200	MCCB	E, LI	0.377 lbf + 1.360	12.50 lbf + 428
1600-6000	MCCB o ICCB	TM o E, LI	0.448 lbf + 3.000	11.10 lbf + 696
800-6300	LVPCB	E, LI	0.636 lbf + 3.670	14.50 lbf + 786
800-6300	LVPCB	E, LS	4.560 lbf + 27.23	47.20 lbf + 2660

Fuente: NFPA. *Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition.* p 70.

### 1.10.2. Norma NFPA-70E

La Asociación Nacional de Protección Contra el Fuego, NFPA por sus siglas en inglés, es una organización de los Estados Unidos que establece estándares de seguridad eléctrica y contra el fuego en lugares de trabajo; específicamente la norma NFPA 70E es una norma sobre los requisitos de seguridad eléctrica en los lugares de trabajo de los empleados. Esta norma establece un método para definir la distancia de seguridad contra el arco eléctrico, una serie de zonas y fronteras de protección relativas a la seguridad eléctrica; además, una metodología para determinar la energía incidente en la zona de trabajo. Lo conveniente del método de cálculo establecido por esta norma es que este requiere menos tiempo y es más adecuado cuando no se dispone de mucha información de los parámetros del sistema a evaluar.

### 1.10.2.1. Método de cálculo de la norma NFPA

El primer paso de esta metodología es calcular la distancia de la frontera de protección contra el arco eléctrico lo cual requiere determinar la corriente de cortocircuito de una falla trifásica sólida en los terminales del transformador mediante las ecuaciones de *Ralph Lee*, las cuales son las siguientes:

$$I_{sc} = \{[MVA\ Base * 10^6]/[1.732 * V]\} * \{100 + \%Z\}$$

Para calcular un valor típico para la potencia máxima en un arco trifásico se utiliza la siguiente ecuación descrita en la norma NFPA 70E:

$$P = [\text{máx. pot. de falla, en } MVA_{bf}] * 0.707^2$$

$$P = 1.732 * V * I_{sc} * 10^{-6} * 0.707^2$$

Donde:

$I_{sc}$  = corriente de falla de cortocircuito (A)

V = voltaje del sistema (V)

%Z = se basa en los MVA del transformador

Si se necesita determinar la distancia límite de protección contra el arco eléctrico, la norma establece una solución mediante la siguiente ecuación:

$$D_c = [2.65 * MVA_{bf} * t]^{1/2}$$

$$D_c = [53 * MVA * t]^{1/2}$$

Donde:

$D_c$  = distancia en pies, entre la persona y la fuente de arco, para una quemadura curable (en el caso en que la temperatura de la piel se mantenga a menos de 80°C).

$MVA_{bf}$  = MVA de falla sólida en el punto de análisis.

MVA = MVA nominal del transformador. Para transformadores menores a 0,75 MVA, multiplicar por 1,25 los MVA del transformador.

t = tiempo de exposición al arco (s).

Para determinar la energía incidente en sistemas de 600 voltios o menores se puede utilizar la metodología de *Doughty Neal*, aplicable para los sistemas con los siguientes parámetros:

- La posible corriente máxima de cortocircuito trifásica en los equipos.
- El tiempo de liberación de la falla a la máxima corriente de cortocircuito.
- La distancia desde la fuente de arco eléctrico hasta el área donde se va a realizar el trabajo.

A partir de los parámetros anteriores, para determinar la energía incidente de un arco eléctrico al aire libre, se determina la siguiente ecuación:

$$E_{MA} = 5271D_A^{-1.9593}t_A[0,0016F^2 - 0,0076F + 0,8938]$$

Donde:

$E_{MA}$  = máxima energía incidente del arco al aire libre (cal/cm<sup>2</sup>).

$D_A$  = distancia a los electrodos de arco (pulgadas), (para distancias de 18 pulgadas y mayores).

$t_A$  = duración del arco (s).

$F$  = corriente de falla de cortocircuito trifásica (kA) (para un rango de 16 kA a 50 kA).

Por último la norma establece la ecuación para determinar la energía incidente del arco eléctrico en una caja cúbica, la cual es aplicable a arcos producidos dentro de equipos de maniobra, centros de controles de motores, entre otros equipos que se encuentren en un medio cerrado. La ecuación es la siguiente:

$$E_{MB} = 1038.7D_B^{-1.4738}t_A[0.00093F^2 - 0.3453F + 5.9675]$$

Donde:

$E_{MB}$  = máxima energía incidente de arco en una caja cúbica de 20 pulgadas (cal/cm<sup>2</sup>).

$D_B$  = distancia a los electrodos de arco (pulgadas), (para distancias de 18 pulgadas y mayores).

$t_A$  = duración del arco (s).

$F$  = corriente de falla de cortocircuito trifásica (kA) (para un rango de 16 kA a 50 kA).

## 2. INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE PARA ESTUDIOS DE ARCO ELÉCTRICO

En el siguiente capítulo se explicará sobre el *software* con el cual se proponen analizar los estudios de arco eléctrico, determinando comandos básicos, interface y la metodología para determinar la energía incidente, entre otros temas relacionados con el *software*. Por último, en este capítulo se explican los pasos necesarios para realizar un estudio de arco eléctrico.

### 2.1. *Software* para análisis de estudios de arco eléctrico

En la actualidad la operación y el análisis de instalaciones eléctricas industriales es cada vez más complejo, lo cual exige el uso de herramientas de simulación para facilitar su modelación y así lograr un mejor entendimiento. Lo anterior conlleva a la realización de hojas de cálculo muy complejas y extensas para los análisis de flujo de carga, cortocircuito, coordinación de protecciones y riesgo de arco eléctrico; se puede utilizar la metodología anterior, de hojas de cálculo o el uso específico de *softwares* de computadora. El *software* de computadora es la mejor elección ya que este simplifica la modelación de las ecuaciones y otros aspectos que hacen complicado el análisis. Estos *softwares* también tienen desventajas, una de las más destacables es su costo de adquisición y el tiempo que hay que invertir para aprender a utilizarlo.

En el mercado eléctrico el criterio para definir el *software* para análisis de riesgo de arco eléctrico, depende de muchos factores: utilidad, costos, interfaz entre otros. Entre los más destacables se pueden mencionar los siguientes:

### 2.1.1. ETAP

ETAP es un *software* de análisis de sistemas eléctricos que permite crear diagramas unifilares con facilidad; además, cuenta con una gran cantidad de módulos dependiendo del estudio que se pretende realizar. En la actualidad ETAP es uno de los *softwares* más utilizados para realizar estudios de arco eléctrico en las industrias, el cual no requiere de gran entrenamiento para su utilización. ETAP cuenta con la capacidad de analizar y evaluar los peligros de riesgo eléctrico con facilidad y de una manera rápida ofreciendo la resolución de múltiples escenarios de riesgo, a la vez, simplificando los tiempos de análisis.

Figura 7. **Logotipo del software ETAP**



Fuente: ETAP. <http://etap.com/>. Consulta: 10 de junio de 2016.

### 2.1.2. EasyPower

*EasyPower* es una herramienta de ingeniería asistida por computadora para el análisis y diseño de sistemas eléctricos industriales, servicios eléctricos y comerciales. *EasyPower* es único, ya que integra completamente las funciones de cortocircuito, flujo de potencia, coordinación de dispositivos de protección y base de datos bajo el control interactivo gráfico del diagrama unifilar. *EasyPower* le permite trabajar como lo hace normalmente, directamente desde el diagrama unifilar. *EasyPower* tienen una interfaz interactiva y fácil de usar diseñada para el análisis eficiente y preciso de sistemas de potencia.

*EasyPower* utiliza las últimas técnicas de análisis de redes desarrolladas por los líderes mundiales en algoritmos de soluciones dispersas y técnicas informáticas innovadoras.<sup>1</sup>

**Figura 8. Logotipo del software *EasyPower***



Fuente: *EasyPower*. <http://easypower.com/>. Consulta: 12 de junio de 2016.

### **2.1.3. SKM**

SKM es una herramienta para el análisis de sistemas eléctricos con reconocimiento a nivel mundial. SKM cuenta con grandes beneficios para el análisis de arco eléctrico: la evaluación de escenarios y/o alternativas de forma rápida y fácil para establecer un diseño óptimo; además, cuenta con una interfaz que permite la presentación de informes, etiquetas de riesgo de arco eléctrico, resúmenes y vista a detalle de elementos del sistema entre otras cualidades destacables.

**Figura 9. Logotipo del software SKM**



Fuente: *SKM*. <http://www.skm.com/>. Consulta: 12 de junio de 2016.

---

<sup>1</sup> *EasyPower. Basic User Manual. p.1.*



#### 2.1.4. NEPLAN

NEPLAN electricidad es una herramienta para analizar, planear, optimizar y simular redes. La amigable interfaz gráfica le permite al usuario desarrollar casos de estudio muy eficientemente. El *software* es personalizable, tiene un concepto modular y cubre todos los aspectos eléctricos en redes de transmisión, distribución, generación e industriales.<sup>2</sup>

Figura 10. Logotipo del *software* NEPLAN



Fuente: NEPLAN. <http://www.neplan.ch/?lang=es>. Consulta: 16 de junio de 2016.

<sup>2</sup> NEPLAN. <http://www.neplan.ch/neplanproduct/electricity/?lang=es>. Consulta: 16 de junio de 2016.

Este *software* por su interfaz de usuario y por la facilidad de aprendizaje es más utilizado para realizar estudios eléctricos; además, el comprador puede elegir los módulos de su interés lo que conlleva a su aplicación para diferentes tipos de estudios tanto en sistemas eléctricos de potencia como industriales.

## **2.2. Comandos y aspectos básicos del *software***

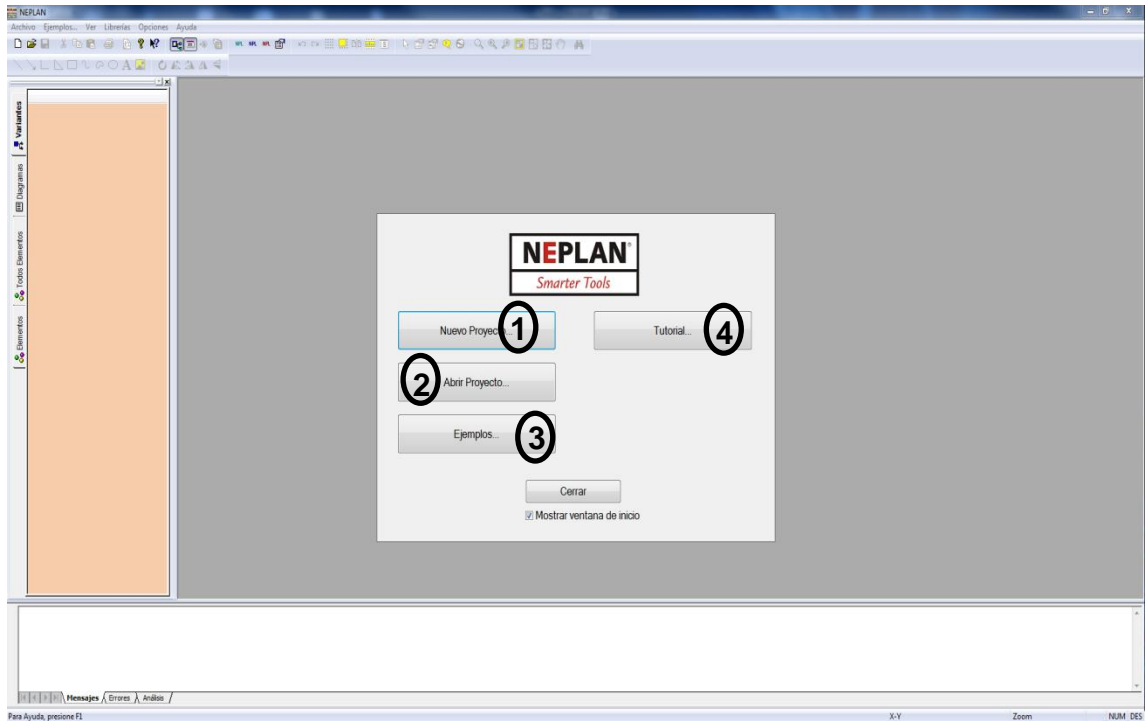
El punto de partida para el análisis de riesgo de arco eléctrico mediante *software* de computadora es la selección del *software* a utilizar; por lo cual en este trabajo de graduación se utilizará el *software* NEPLAN, por consiguiente en adelante se referirá siempre a este cuando se hable del *software* de computadora.

NEPLAN es un *software* muy amigable para el análisis y planeamiento de instalaciones eléctricas industriales el cual ha sido diseñado para su fácil aprendizaje y la obtención rápida de resultados. A continuación se describen aspectos del *software* para familiarizarse con este y así brindar los aspectos necesarios para realizar un estudio de arco eléctrico.

### **2.2.1. La interfaz de usuario**

A continuación se mostrará la pantalla principal del *software*, área de trabajo, comandos, menús, opciones de análisis, equipos, entre otros aspectos básicos para familiarizarse con el programa de cómputo.

Figura 11. Pantalla de inicio del *software* NEPLAN



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

En la figura anterior se puede observar la pantalla de inicio del *software* del cual se puede elegir una de las siguientes opciones:

- 1. Nuevo proyecto: esta opción se selecciona cuando se va a iniciar un proyecto nuevo. Luego de seleccionar esta opción se muestra otra ventana donde se indica el lugar donde se va a guardar el nuevo proyecto, su nombre, descripción y, por último, algunos parámetros básicos: frecuencia, estándar y tipo de red. Lo anterior se observa en la figura siguiente:

Figura 12. **Parámetros del nuevo proyecto**

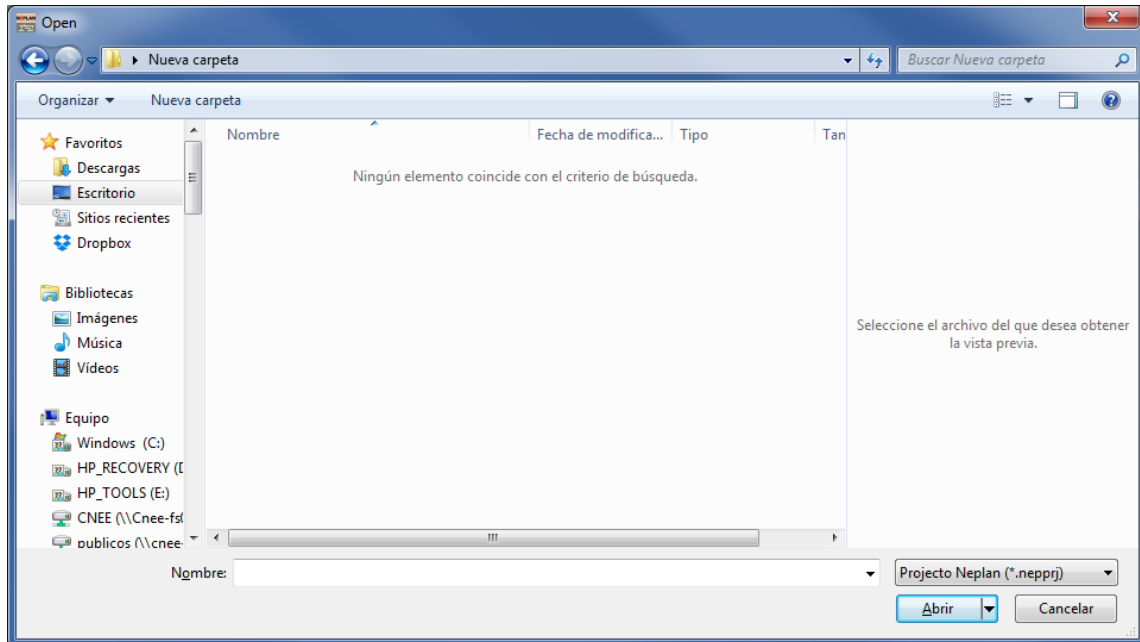
The image shows a dialog box titled "Tipo de Red" with a close button in the top right corner. The dialog contains the following elements:

- Ubicación/Directorio:** A text box containing the path "C:\Users\bmerida\Dropbox\simulaciones de tesis\arc\" and a browse button (...).
- Nombre proyecto:** An empty text box with a browse button (...).
- Tipo de Red:** A group box containing four radio buttons: "Electricidad" (selected), "Agua", "Gas", and "Redes de vapor".
- Standards:** A group box containing two radio buttons: "IEC" (selected) and "ANSI".
- Frecuencia:** A group box containing two radio buttons: "50 Hz" and "60 Hz" (selected).
- Red:** A group box containing two radio buttons: "Transmisión/Industrial" (selected) and "Distribución/Industrial".
- Descripción proyecto:** A large empty text area.
- Tamaño diagrama:** A dropdown menu set to "ANSI E 34 x 44 Pulg." and a checked checkbox labeled "Horizontal".
- Buttons:** "Aceptar" and "Cancelar" buttons at the bottom.

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

- 2. Abrir proyecto: esta opción se selecciona cuando con anterioridad se ha elaborado un proyecto y es necesario realizar modificaciones o nuevos análisis. Luego de seleccionar esta opción se muestra una ventana solicitando el directorio en el cual se encuentra guardado el proyecto. Lo cual se muestra en la siguiente figura.

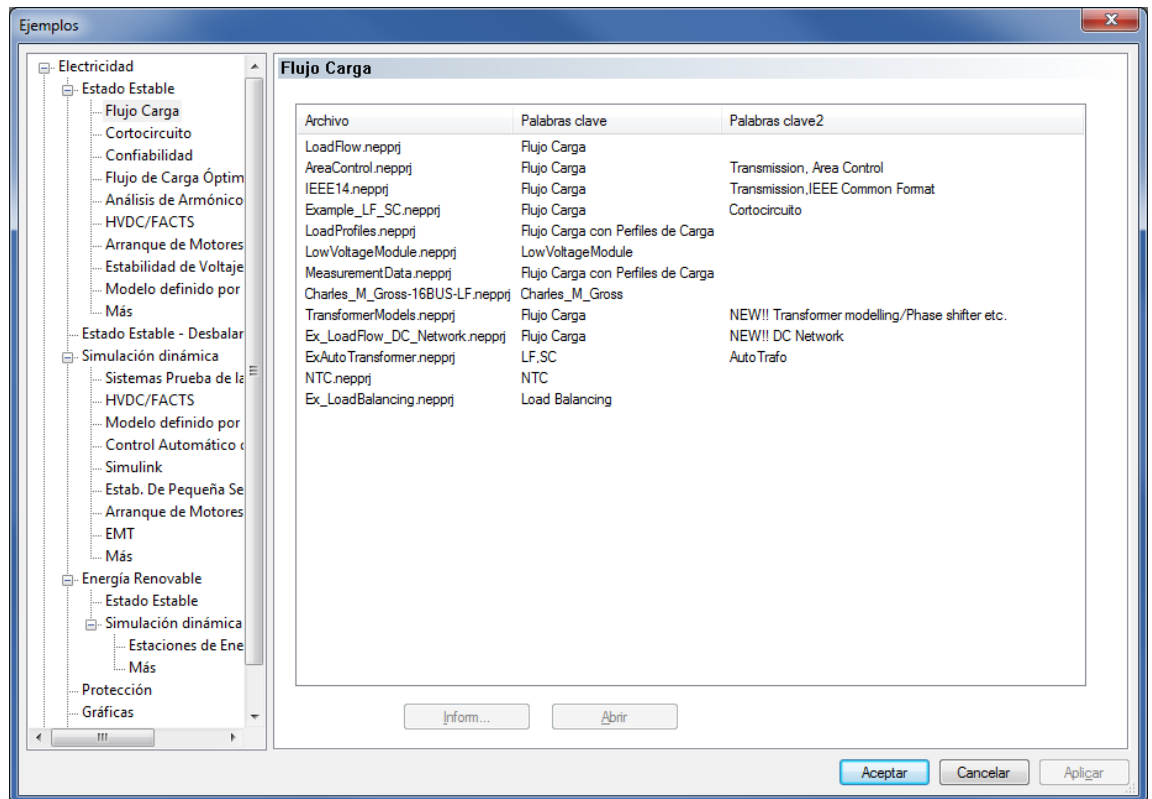
Figura 13. **Abrir proyecto**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

- 3. Ejemplos: al seleccionar esta opción se muestra una ventana donde se establecen ejemplos de los diferentes módulos del *software*: flujo de carga, cortocircuito, confiabilidad, flujo de carga óptimo, análisis de armónicos, arranque de motores, estabilidad de voltaje, entre otros. Es importante destacar que cada ejemplo mostrado, necesita de conocimientos previos del manejo del *software* para poder ejecutarlo y evaluar el escenario para la obtención de resultados. Lo indicado se muestra en la siguiente figura.

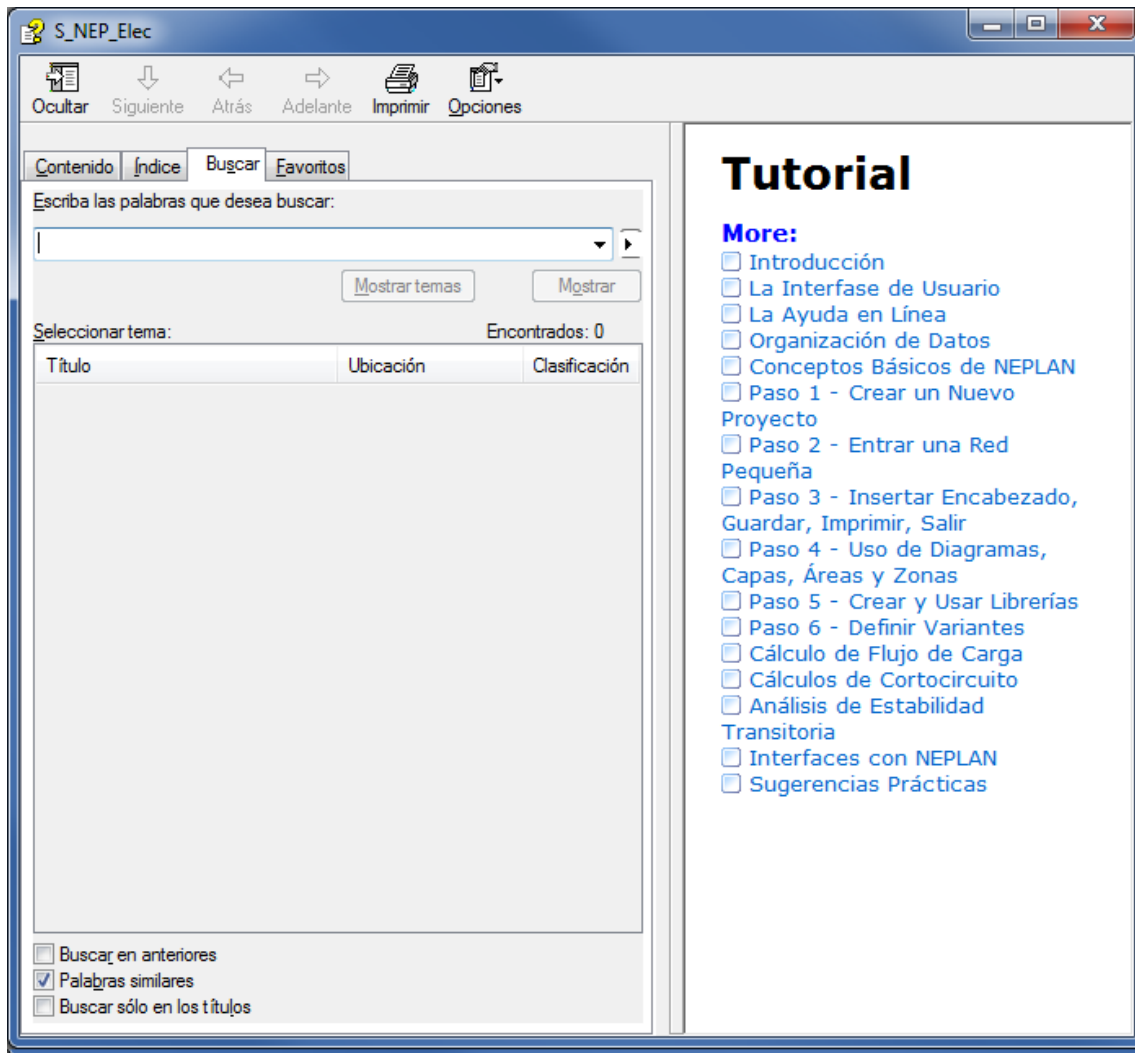
Figura 14. Ejemplos



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

- 4. Tutoriales: al seleccionar esta opción se muestra la ayuda del *software* donde se describen los aspectos necesarios para la interpretación del *software*. Esto se muestra en la siguiente figura.

Figura 15. Tutoriales



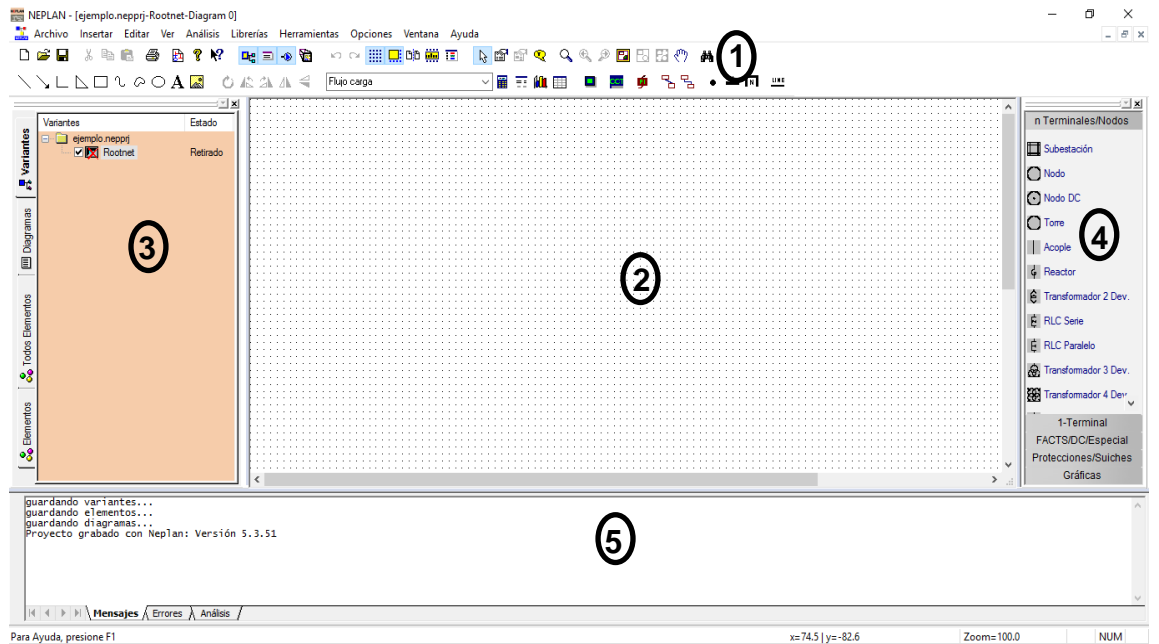
Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Las características principales de la ventana de interfaz se listan a continuación:

1. Barra de opción de menú y barra de herramientas
2. Área de trabajo

3. Administrador de variables, diagramas y elementos
4. Paleta de símbolos
5. Ventana de mensajes

Figura 16. Interfaz de usuario



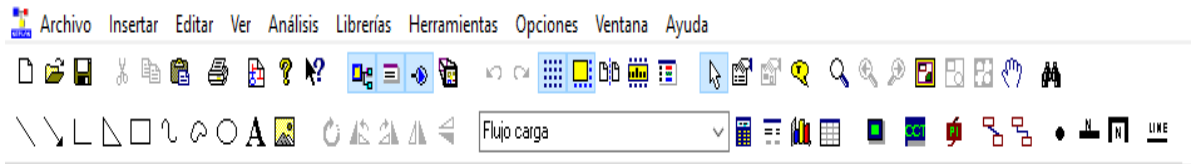
Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

### 2.2.1.1. Barra de opción de menú y barra de herramientas

En esta parte se encuentran todos los botones de comando con que está equipado el *software*, los cuales cambiarán y se adaptarán dependiendo de la pestaña seleccionada y de lo que se requiera.



Figura 17. **Barra de opción de menú y barra de herramientas**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

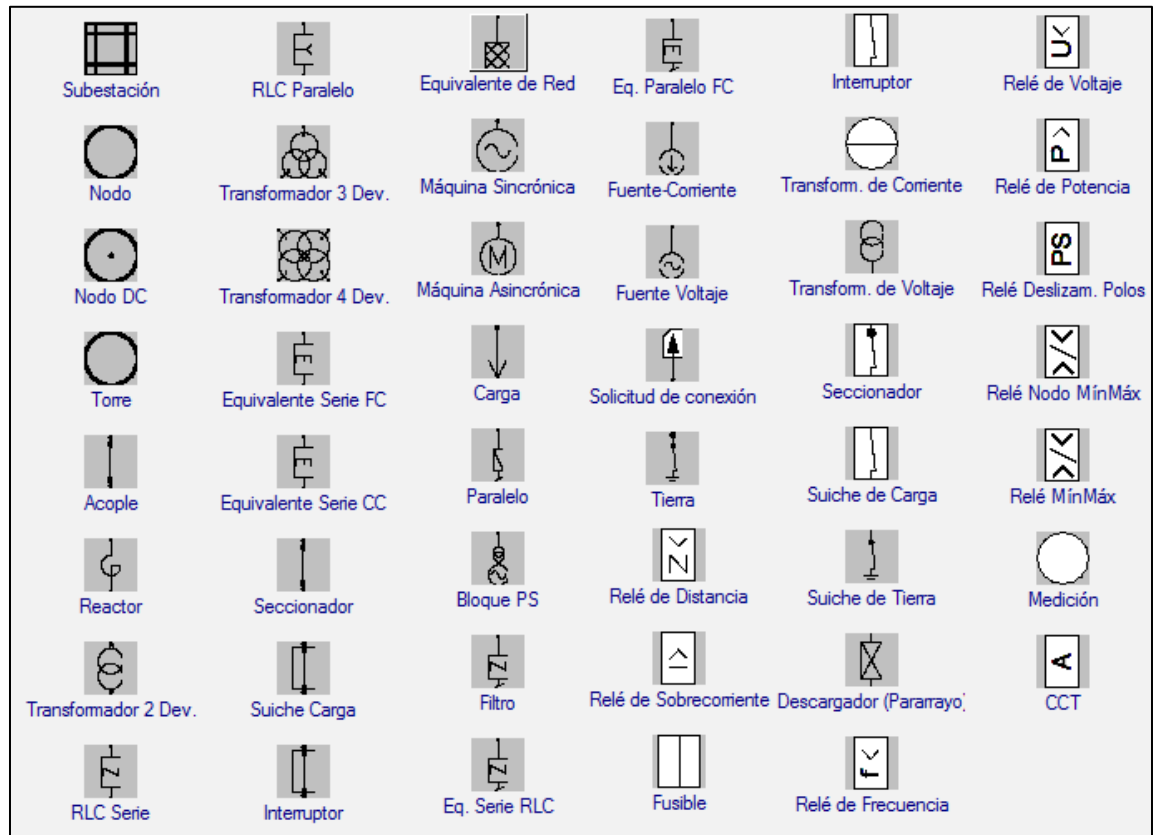
### **2.2.1.2. Área de trabajo**

En el área de trabajo se pueden realizar los diagramas que se pretenden analizar.

### **2.2.1.3. Paleta de símbolos**

La paleta de símbolos contiene todos los símbolos de los equipos y/o elementos disponibles en el *software*: motores, generadores, barras, capacitores, elementos de protección, entre otros.

Figura 18. Paletas de símbolos

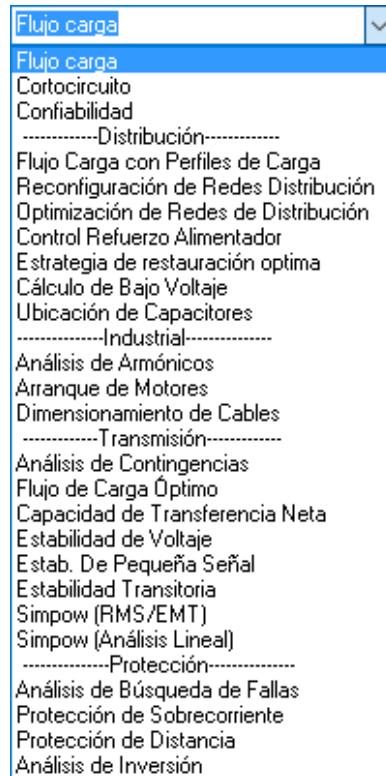


Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

### 2.2.2. Modo de análisis

En el *software* se pueden encontrar muchos modos de análisis en los cuales el programa de cómputo se adapta de tal manera que modifica las opciones del análisis; según el modo de análisis en el que se esté trabajando, con el fin de facilitar el análisis del sistema eléctrico bajo estudio.

Figura 19. **Modo de análisis**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

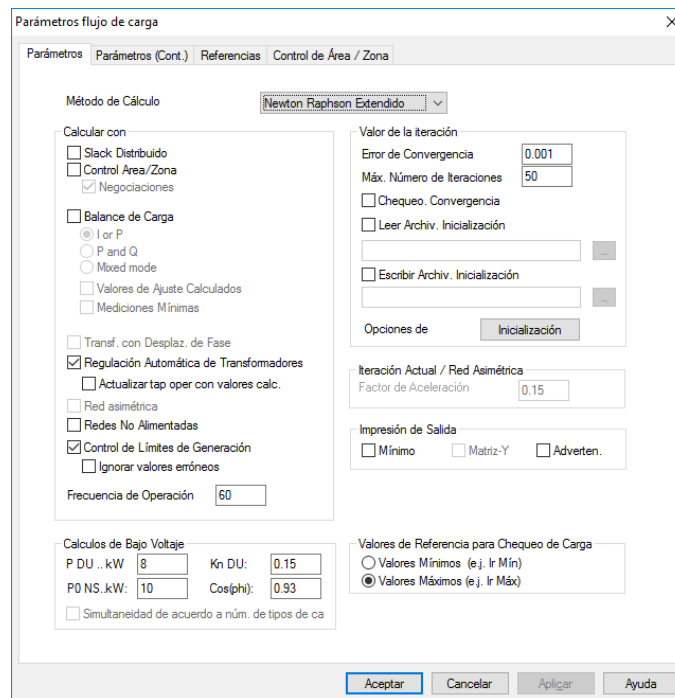
A continuación se describen los más aplicables para el desarrollo del presente trabajo.

### **2.2.2.1. Flujo de carga**

En este modo de análisis el usuario puede evaluar un flujo de carga a las instalaciones eléctricas con el fin de determinar los valores de voltaje en todos los nodos de la red; así mismo determinar elementos sobrecargados y determinar las acciones necesarias para mejorar dicha red. Además de obtener los resultados de flujo de potencia de las instalaciones eléctricas en estudio, se

pueden obtener informes, verificar violaciones en los niveles de voltaje, crear escenarios, insertar notas, entre otros. Para la simulación de flujo de potencia en instalaciones industriales lo más importante es el correcto modelado de los elementos que la conforman y la exactitud con los parámetros de estos elementos. Los parámetros que se pueden configurar en el software se muestran en la figura siguiente.

Figura 20. **Parámetros del análisis de flujo de carga**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

### 2.2.2.2. Cortocircuito

En este modo de análisis el usuario es capaz de ejecutar el estudio de cortocircuito a través de varias opciones: eligiendo el tipo de falla que se

pretende evaluar, seleccionar las barras en falla, ocultar o mostrar corrientes momentáneas y de interrupción, opciones de informe de cortocircuito, entre otros.

Figura 21. **Parámetros del modo cortocircuito**

Parámetros de Cortocircuito

Parámetros | Nodos bajo falla | Líneas en Falla | Falla especial | Cálculo de Arco Eléctrico

Tipo de falla:

Método de Cálculo:

Calcular  $I_k^*$  máx:  Flujo de carga previo al cálculo de Cortocircuito:

Dist. de falla (No. de nodos) para mostrar resultados:  Red asimétrica:

Calcular de acuerdo a IEC909

Selecc. automática del factor c:  Durac. de la falla en s para cálc. de corr. térmica:

Tolerancia reducida en sist. de bajo voltaje (sólo +6%) Durac. de la falla en s para cálc. de la corr. DC:

Cálculo de  $i_p$  según R/X en ubic. de falla Retardo del INT en s para cálc. de corr. interrup. Ib:

Cálculo según IEC61363-1 o IEC 61660-1(DC)

Corrientes en tiempo..s:  Condiciones de precarga:

Comportamiento en el tiempo T final .. s:   Omitir decaimiento de la corriente CC

Calcular de acuerdo a ANSI

Número de ciclos para cálculo corriente DC, IDC:

Número de ciclos para cálculo corriente interrup. Ib:

E operación .. pu:

Impedancia de Arco (No tiene en cuenta IEC/ANSI)

Parte Resistiva..Ohm:

Parte Reactiva..Ohm:

Resonancia en redes conectadas a tierra y aisladas

Cálculo de la impedancia de secuencia cero simplificada Vn resonan. redes conect. a tierra y aisladas..kV:

Arch. de Resultados

Crear después de cálculo  Formato 4x

Cargabilidad máxima de elementos

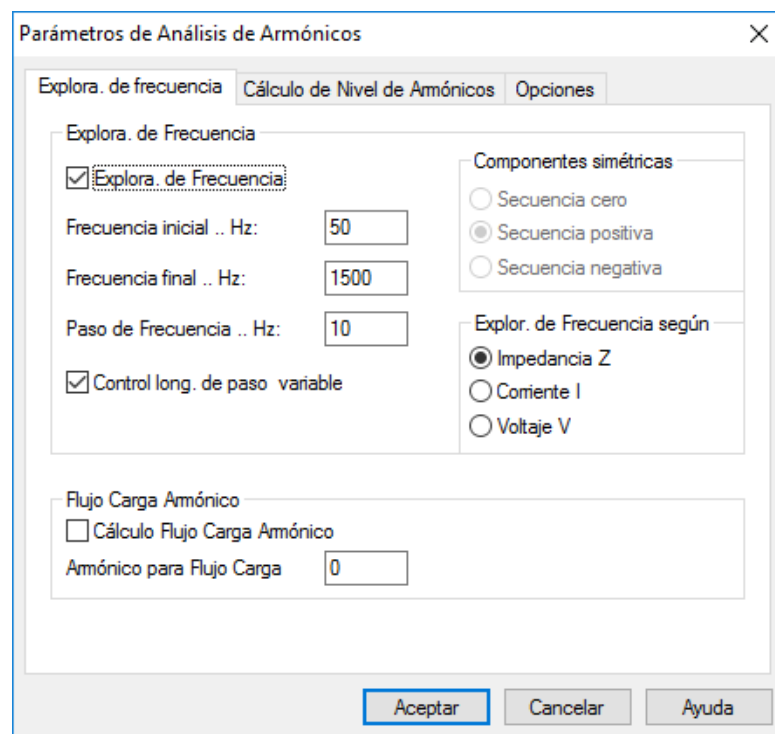
Cargabilidad .. %:

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

### 2.2.2.3. Armónicos

En este modo de análisis se puede ejecutar el análisis de armónicos en las instalaciones de interés, en el cual se encuentran las siguientes opciones:

Figura 22. **Parámetros del modo armónicos**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

### 2.2.2.4. Coordinación de dispositivos de protección

En este modo de análisis se puede ejecutar el estudio de coordinación de protección, visualizando curvas tiempo-corriente de los equipos de protección. Además, este modo de análisis cuenta con manera gráfica de las curvas

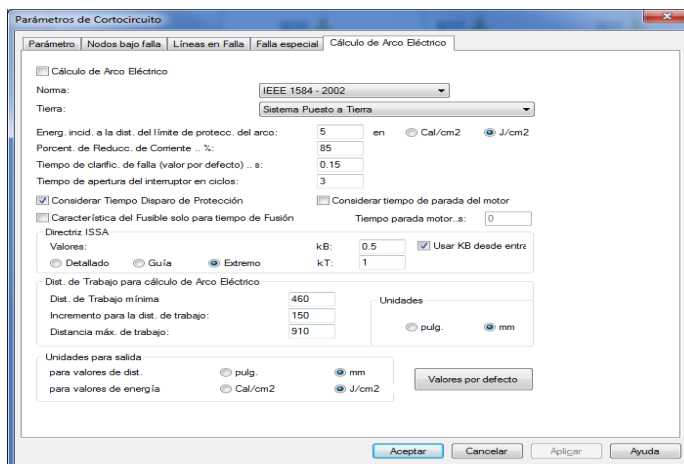
tiempo-corriente lo que hace de una manera más sencilla coordinar las zonas y dispositivos de protección.

### 2.3. Metodología para determinar la energía incidente

En el *software* NEPLAN se pueden elegir varios métodos para la determinación de la energía incidente. Entre ellos se encuentran los estipulados en las normas IEEE1584 y NFPA-70E. Las ecuaciones establecidas en la norma IEE-1584 son aplicables para sistemas hasta 15 kV, para sistemas eléctricos mayores, el *software* utiliza el método de Ralph LEE.

Para el análisis de riesgo del arco eléctrico se encuentran varios parámetros que pueden ser seleccionados por la persona que está realizando el estudio: variar el estándar a utilizar, realizar casos de riesgo de arco eléctrico, variar el tiempo máximo de despeje de falla, la distancia de trabajo a utilizar, entre otras opciones.

Figura 23. Opciones de cortocircuito



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

## **2.4. Procedimiento para el estudio de riesgo de arco eléctrico**

A continuación se describen los pasos necesarios para llevar a cabo un estudio de arco eléctrico, a partir de algunos criterios técnicos y aspectos descritos en las normas.

### **2.4.1. Identificación de los puntos o equipos con riesgo de arco eléctrico**

El primer paso es identificar aquellos lugares o equipos en los que los trabajadores están expuestos a la incidencia de un arco eléctrico, por lo cual no es necesario el análisis de todas las partes del sistema de potencia de la instalación.

Por lo general, los paneles y equipos menores de 208 voltios se pueden excluir del análisis si el transformador de servicio es menor a 125 kVA. Aunque en los últimos años varios son los estudios y modelos de cálculo para sistemas menores de 250 voltios.

La norma NFPA 70E-2015 específica, en la tabla 130.7(C) (15) (A) (a), las tareas donde es necesario la utilización de equipo de protección personal contra riesgo de arco eléctrico, considerando además las condiciones de los equipos.



Tabla X. **Fragmento de tabla, identificación de riesgo de arco eléctrico**

Tarea	Condición del equipo	EPP contra arco eléctrico requerido
Lectura de medidor en panel con interruptor conduciendo	Cualquiera	No
Funcionamiento normal de un interruptor automático (CB), interruptor, contactor o arrancador	Todas las siguientes: El equipo se ha instalado correctamente. El equipo se mantiene adecuadamente. Todas las puertas del equipo de arco cerrado y asegurado. Todas las cubiertas del equipo están en su lugar y asegurados no hay evidencia de falla inminente.	No
	Uno o más de las siguientes: El equipo se ha instalado correctamente. El equipo se mantiene adecuadamente. Todas las puertas del equipo de arco cerrado y asegurado. Todas las cubiertas del equipo están en su lugar y asegurados no hay evidencia de falla inminente.	Si
Para sistemas AC; trabajo en conductores eléctricos energizados y partes del circuito, incluidas las pruebas de tensión	Cualquiera	Si
Para sistemas AC; trabajo en conductores eléctricos energizados y partes de circuitos de celda de baterías conectadas en serie, incluyendo pruebas de tensión	Cualquiera	Si
Pruebas de tensión sobre las celdas de la batería individual o multicelda	Todas las siguientes: El equipo se ha instalado correctamente. El equipo se mantiene adecuadamente.. Las cubiertas de otros equipos deben estar instaladas y fijas	No

Fuente: *NFPA. Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition. p 35.*

### **2.4.2. Recopilación de datos del sistema**

La recopilación de datos es uno de los pasos más importantes para el estudio de arco eléctrico, conlleva un gran esfuerzo y experiencia para su realización. Es muy importante mencionar que los resultados del estudio serán tan buenos como el modelado de datos lo que implica una buena recopilación de los datos de las instalaciones eléctricas a analizar. La mayoría de los datos necesarios se pueden encontrar en las placas características de los equipos, cuando estos no se encuentren en la placa, es posible obtener los datos del fabricante de los equipos o asumiendo datos típicos.

El análisis de riesgo de arco eléctrico precisa los resultados de un estudio de cortocircuito y de un estudio de coordinación de protecciones, por lo cual para el estudio de cortocircuito es necesario los datos de los transformadores, motores, líneas de transmisión, generadores, entre otros. Los datos típicos para realizar un estudio de cortocircuito se muestran a continuación.

- Tipo de equipo
- Voltaje
- MVA/KVA
- Impedancia
- X/R %
- Fases/conexión

Para la realización del estudio de coordinación de protecciones son necesarios los datos de los dispositivos de protección: las curvas tiempo-corriente para cada equipo y los datos que se indican a continuación.

- Relé: tipo, relación del transformador de corriente (CT Ratio), configuración del umbral de disparo (tap), tipo de retardo (curva) y configuración (ajuste de tiempo).
- Fusible: tipo, amperaje y voltaje.
- Interruptor: tipo, tiempo de limpiamiento de falla, configuración del umbral de disparo, curva de retardo, ajuste de retardo.

Dependiendo del modelo de análisis de arco eléctrico es necesaria la siguiente información de la instalación:

- Tipo de recinto: aire abierto, caja cerrada, entre otros
- Distancia entre conductores expuestos
- Tipo de toma a tierra
- Fases / conexión
- Distancias de trabajo

Por último, para este paso, es necesario determinar todas las posibles condiciones de operación de las instalaciones a evaluar. El análisis debe incluir el escenario de condición normal de la instalación así como el escenario de condición más crítica con riesgo de arco eléctrico.

Es importante identificar si existen otras fuentes de alimentación en las instalaciones a evaluar, equipos y maquinarias en mantenimiento, apertura y cierre de circuitos, entre otros; teniendo en cuenta que la energía incidente está en función de la corriente de falla del sistema siendo el escenario más crítico cuando la corriente de falla sea mayor.

### **2.4.3. Elaboración del diagrama unifilar del sistema a analizar**

Para el análisis de la instalación es necesario el uso de diagramas unificables los que resultan de una gran utilidad y son una herramienta poderosa para la documentación de todos los elementos de la instalación. Un diagrama unifilar representa, por medio de líneas y símbolos normalizados, la interconexión de los elementos que conforman la instalación eléctrica.

Para un mejor análisis, mayor comprensión y una toma de decisiones más óptima, los resultados de los estudios de cortocircuito y de arco eléctrico se pueden acoplar al diagrama unifilar. Es importante mencionar que la mayoría de las instalaciones industriales debieran tener un diagrama unifilar de dichas instalaciones, en todo caso se procederá a la realización del mismo adoptando los datos recopilados del paso anterior.

### **2.4.4. Estudio de cortocircuito**

Un estudio de cortocircuito se realiza para determinar si los equipos de interrupción están apropiadamente diseñados para resistir e interrumpir una falla en las instalaciones eléctricas. Según recomendaciones de las normativas aplicables, para el estudio del arco eléctrico solo se deben considerar las fallas trifásicas para realizar dicho estudio. Aunque una falla de las tres fases es poco común, el valor de corriente de falla es mayor, con respecto a las otras fallas, y por eso resulta conveniente el análisis de esta falla.

Otra de las razones por la cual se debe de analizar el estudio de cortocircuito con una falla trifásica, es porque las fallas de fase a fase y las fallas de línea a tierra escalan muy rápido y terminan convirtiéndose en fallas trifásicas. Todo lo anterior, considerando además, que para el estudio de

cortocircuito se debe analizar el escenario más crítico siendo este cuando ocurre una falla trifásica.

El análisis del cortocircuito debe realizarse para todos los modelos de las instalaciones identificados (escenarios) en los cuales se debe considerar lo siguiente:

- Múltiples alimentadores que pueden ser puestos en servicio.
- Múltiples fuentes de generadores que funcionen en paralelo o en función aislada a la configuración normal del sistema.
- Condiciones de funcionamiento de emergencia.
- Motores grandes o procesos que no estén operando normalmente.

#### **2.4.5. Estimación de la corriente del arco eléctrico esperada**

Para determinar la corriente del arco eléctrico para cada equipo o elemento de la instalación a analizar, se deben utilizar las ecuaciones y métodos reconocidos por la NFPA-70E y la norma IEEE descritos en el capítulo anterior.

La norma IEEE-1584 establece, para instalaciones con voltaje menor a 1 000 voltios, que se debe calcular el valor de energía incidente con el 100 % de la corriente del arco y luego calcular una segunda energía incidente con un valor de 85 % de la corriente de arco eléctrico, utilizando la más alta de las energías incidentes para determinar la categoría del equipo de protección personal.

La estimación de la corriente del arco eléctrico toma valores dentro de un rango de posibles valores reales, debido a la naturaleza aleatoria de dicha

corriente. La energía incidente más alta no necesariamente se debe a una corriente de arco elevada, esta puede depender del tiempo de duración del arco debido a las características de disparo de los equipos de desconexión. Por lo anterior, se puede tener una mayor energía incidente con corrientes de arco pequeñas, dependiendo de los tiempos y características de disparo de las protecciones.

Luego de estimar la corriente del arco eléctrico es necesario comprobar si esta se encuentra entre un intervalo aceptable según los casos prácticos. A continuación se describen los límites:

- Límite superior: si la corriente de arco es mayor a la corriente de falla trifásica, descartar este valor y tomar el valor de la corriente de falla. Lo anterior se debe a que la corriente de arco eléctrico debe ser menor debido a la impedancia adicional del arco; por ende, esta no puede ser mayor a la corriente de falla trifásica.
- Límite inferior: para instalaciones de 480 voltios se estableció un porcentaje del 38 % de la corriente de falla trifásica para el valor de la corriente de arco, esto debido a que para corrientes bajas los tiempos que se sostiene un arco son muy bajos. Este límite no se tiene claro con certeza por lo cual la norma IEEE estipula que es razonable utilizar los valores siguiente:
  - Para voltajes de 0,2/0,25 kV y 0,4/0,48 kV el límite inferior de corriente de arco puede ser un 21 % de la corriente de falla trifásica.
  - Para voltajes de 0.6 kV el límite inferior de corriente de arco puede ser un 28 % de la corriente de falla trifásica.

- Para voltajes de 2,3 kV el límite inferior de corriente de arco puede ser un 51 % de la corriente de falla trifásica.
- Para voltajes de 4,16 kV el límite inferior de corriente de arco puede ser un 64 % de la corriente de falla trifásica.
- Para voltajes de 13,8 kV el límite inferior de corriente de arco puede ser un 84 % de la corriente de falla trifásica.

#### **2.4.6. Estimación de la duración del arco eléctrico**

La estimación de la duración del arco eléctrico está relacionada con el tiempo de operación del dispositivo de protección. El tiempo de operación o el tiempo de despeje de los dispositivos de protección se obtiene a partir de las curvas tiempo-corriente proporcionada por los fabricantes de los equipos de protección; además, pueden considerarse tiempos estándares según lo estipulado en las normas NFPA-70E y IEEE-1584.

Con relación al tiempo de despeje de falla la norma NFPA-70E establece lo siguiente:

El tiempo de liberación de la falla para un fusible limitador de corriente es de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de ciclo o 0,004 segundos si la corriente de arco está dentro del rango de su capacidad de limitación de corriente. El tiempo de liberación de la falla de la unidad de disparo para un interruptor automático de 5 kV y 15 kV es aproximadamente 0,1 segundos o 6 ciclos si la función instantánea está habilitada. Esto se puede desglosar de la siguiente manera: tiempo real del interruptor (aproximadamente 2 ciclos), más el tiempo de operación del relevador de aproximadamente 1,74 ciclos, más un margen de seguridad de 2 ciclos, que es tiempo total de aproximadamente 6 ciclos.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> *Standard for Electrical Safety in the Workplace*, NFPA 70E, 2015 Edition. p.63.

Además como se explicó en el capítulo 1, para sistemas iguales o mayores a 1 kV, la norma NFPA-70E establece lo siguiente:

Si el tiempo de formación de arcos, es más de 2 segundos considere cuánto tiempo es probable que se mantenga una persona en la ubicación del arco eléctrico. Es probable que una persona se exponga a un arco eléctrico y se aleje rápidamente si es físicamente posible y 2 segundos es un tiempo máximo razonable para los cálculos.<sup>4</sup>

En la tabla siguiente se muestran los tiempos recomendados en la norma IEEE 15-84-2002 para el despeje de falla de interruptores.

Tabla XI. **Tiempos recomendados por la norma IEEE-1584-2002 para la operación de interruptores**

<b>Tipo y <i>rating</i> del interruptor</b>	<b>Tiempo de apertura a 60 Hz (ciclos)</b>	<b>Tiempo de apertura (segundos)</b>
Baja tensión (caja moldeada) (<1000V) (disparo integral)	1.5	0.0025
Baja tensión (caja aislada) (<1000V) interruptor de potencia (disparo integral u operado por relé)	3	0.05
Media tensión (1-35 kV)	5	0.08
Alta tensión (>35 kV)	8	0.13

Fuente: IEEE. *Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations, IEEE Std 1584*. p 41.

<sup>4</sup> *Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition*. p.68.



#### **2.4.7. Estimación de la energía incidente**

La energía incidente según la norma NFPA-70E-2004 es la cantidad de energía impuesta sobre una superficie a una cierta distancia de la fuente generada durante el evento de arco eléctrico, las dimensionales utilizadas para medir la energía incidente son calorías por centímetro cuadrado ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ). Para la estimación de la energía incidente se deben utilizar las ecuaciones de las normas NFPA-70E o las ecuaciones de la norma IEEE-1584, descritas en el capítulo anterior, según sea el caso de análisis o según sean los datos con los que se cuente.

Es importante mencionar que la energía incidente está en función de la corriente del arco eléctrico, la duración del arco eléctrico, el tipo de recinto y la distancia del arco, por lo cual se deberán conocer todas estas variables antes de estimar la energía incidente.

#### **2.4.8. Determinación de la categoría de riesgo del arco eléctrico**

Existen 5 categorías de riesgo del arco eléctrico según la energía incidente en el área de análisis: la categoría 0 es en la que no existe riesgo de arco eléctrico y no es necesario ningún tipo de equipo de protección personal; la categoría 4 es la más peligrosa y de alto riesgo en la cual existe un nivel de energía incidente de  $40 \text{ cal}/\text{cm}^2$  y es necesario la utilización de equipo de protección personal. De igual forma para cada categoría de riesgo de arco eléctrico existe determinado equipo de protección, lo anterior lo se puede apreciar en la Tabla VI.

#### **2.4.9. Determinación de la distancia de protección contra el arco eléctrico**

Las distancias y/o fronteras de protección contra el arco eléctrico están en función de la energía incidente estimada en el numeral 2.4.7 y estas se determinarán mediante las ecuaciones descritas en las normativas NFPA-70E y IEEE-1584, mencionadas en el capítulo anterior. La frontera de protección contra arcos es la distancia en la cual los operarios están expuestos a percibir una quemadura de segundo grado (la cual se considera curable).

#### **2.4.10. Documentación de la evaluación de riesgo por el arco eléctrico**

El análisis del estudio del arco eléctrico debe ser documentado en informes y detallado tanto como fuera posible. La documentación debe ser de fácil comprensión tanto para la interpretación por los empleados como para posibles cambios en las instalaciones eléctricas. Entre la documentación necesaria es importante tener el diagrama unifilar con todo el detalle posible de los equipos y de los estudios realizados, además debe tener lo siguiente:

- Informe de evaluación: con la siguiente información:
  - Nombre de la persona o personal que realizó la evaluación.
  - Fecha de la realización de la evaluación.
  - Todos los datos recolectados y utilizados en la evaluación de riesgo del arco eléctrico.
  - Hipótesis utilizadas (si fuere el caso) por la ausencia de datos.
  - Metodología de evaluación utilizada (normativa y año).

- Documentación en diagramas unifilares: esta información indicará los equipos y las áreas en riesgo de arco eléctrico, en el cual debe de incluirse lo siguiente:
  - Identificación de las áreas o equipos con riesgo de arco eléctrico.
  - Especificar los límites de protección contra el arco eléctrico.
  - Especificar la energía incidente en las áreas de riesgo.
  - Especificar la categoría de riesgo.
  - Especificar de forma clara y concisa los valores para los interruptores, fusibles, carga, entre otros.
  - Otras especificaciones necesarias.
  
- Documentación sobre el equipo: etiquetas de advertencia de riesgo de arco eléctrico:
  - Las etiquetas deben estar ubicadas en un lugar visible y a una distancia donde sea legible de distinguir para los operarios.
  - La categoría de riesgo, la energía incidente, los límites de protección contra arco eléctrico deben estar impresos en la etiqueta.
  - Equipos robustos pueden estar etiquetados en varias partes.

Este último paso es de vital importancia ya que una correcta documentación puede facilitar la investigación de accidentes y de responsables en caso de lesiones por el arco eléctrico.

## **2.5. Metodología para el estudio del arco eléctrico en instalaciones industriales**

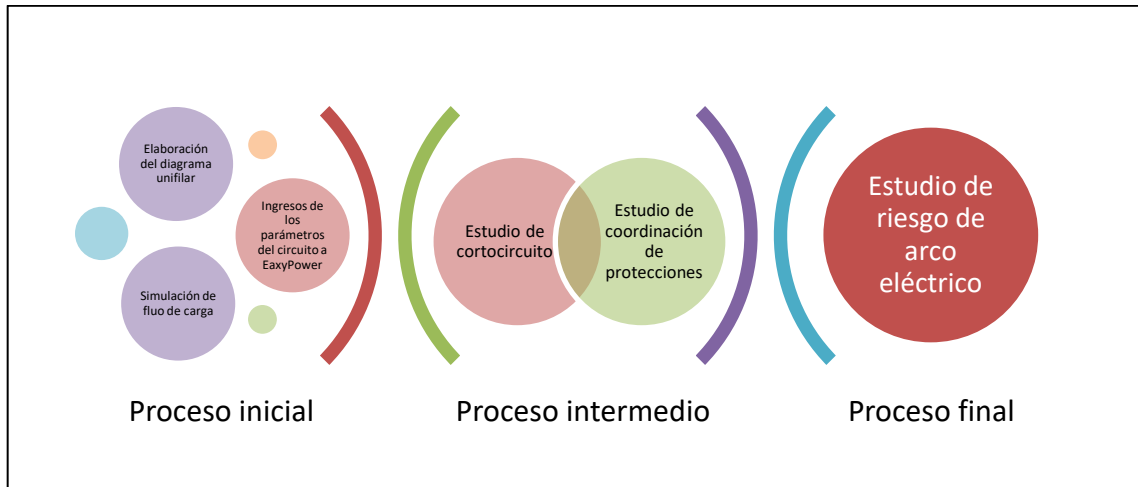
La identificación de los puntos o equipos con riesgo de arco eléctrico, recopilación de datos del sistema y la elaboración de un diagrama unifilar del sistema a analizar; son pasos fundamentales para la elaboración del estudio de arco eléctrico, como anteriormente se indicó, y para estos se necesita de personal altamente capacitado y con una alta experiencia en el tema.

Ya que para identificar los puntos o equipos con riesgo de arco eléctrico se necesita de personal que tenga conocimiento de todo el sistema de análisis, tanto de los equipos existentes como de las instalaciones que existen en la industria a analizar.

Por otro lado, para la recopilación de los datos del sistema se necesita de una persona con una gran experiencia tanto en simulación de instalaciones industriales como en conocimientos de equipos y maquinarias, así de esta forma identificará con mayor facilidad y eficacia los datos mínimos necesarios para realizar el estudio en cuestión.

Por último, para la elaboración del diagrama unifilar del sistema de análisis es importante que la persona a elaborar dicho diagrama cuente con la información de los dos pasos anteriores y posea conocimientos en nomenclatura, estudios eléctricos, dispositivos eléctricos, entre otros, con el fin de elaborar un diagrama claro y conciso reproduciendo fielmente las instalaciones eléctricas industriales a análisis.

Figura 24. Metodología para el estudio del arco eléctrico



Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que el fin práctico de este trabajo de graduación es la elaboración de una guía para la evaluación del riesgo de arco eléctrico en instalaciones industriales; por lo cual no se entrará en gran detalle en los primeros tres pasos, indicados anteriormente, para la elaboración de estudio de riesgo de arco eléctrico, ya que estos dependen tanto de la habilidad del consultor en la recaudación de datos y de las instalaciones industriales de análisis. Para lo que en este trabajo se supondrá un ejemplo práctico de análisis, para el cual se determinará los lugares de riesgo de arco, los datos necesarios y el diagrama unifilar para realizar un estudio de arco eléctrico. Lo anterior con el fin de centrarse en el proceso de análisis de resultados y en la realización del estudio de arco eléctrico.

### **3. ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES**

En el siguiente capítulo se explicará lo necesario para realizar los estudios de cortocircuito y de coordinación de protecciones; estudios necesarios para evaluar el riesgo de arco eléctrico en instalaciones industriales los cuales abarcan los pasos 4 y 6 determinados en el capítulo anterior.

#### **3.1. Conceptos básicos del estudio de cortocircuito**

Tanto para el diseño de una instalación eléctrica nueva como para la evaluación de una instalación ya existente, una fase importante es la elaboración de un estudio de cortocircuito, el cual sirve para determinar las protecciones a utilizar en las instalaciones industriales mediante la determinación de las corrientes de cortocircuito. Un cortocircuito puede causar desgaste en los aislantes, provocar esfuerzos electrodinámicos, fundir los conductores, provocar arcos eléctricos, entre otros. El estudio de cortocircuito analiza, mediante las impedancias de los equipos de la instalación eléctrica, una falla, y determina las corrientes de cortocircuito que circularán por todos los ramales de la instalación.

El estudio de cortocircuito se realiza para determinar las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito con las cuales se determina la capacidad interruptiva de los dispositivos de protección y la curva de disparo del mismo dispositivo, respectivamente. A continuación se detallan conceptos de vital importancia para la realización de este estudio para su mejor comprensión.

### **3.1.1. Fuentes de cortocircuito**

Cuando se produce una falla en cualquier parte de la instalación eléctrica industrial, cuatro son los equipos de la propia instalación que alimentan el cortocircuito; por lo cual en la realización del estudio de cortocircuito es importante que se tomen en consideración los parámetros de los siguientes equipos.

#### **3.1.1.1. Generadores y motores síncronos**

En el momento cuando acontece una falla, los primtores de los generadores siguen girando lo que causa que estos sigan generando electricidad. Esta generación de tensión produce a su vez una corriente de cortocircuito que depende de la impedancia propia del generador y de los cables que alimentan el generador hasta el punto de la falla. Por consecuente, la impedancia del generador esta combinada con los elementos aguas arriba del cortocircuito.

Los motores síncronos actúan de la misma forma ante una falla que los generadores debido a que la forma constructiva de ambas máquinas son similares; por ende, cuando sucede una falla, el motor síncrono deja de funcionar y empieza a frenar debido a la inercia de la carga, pero es esa misma inercia que hace generar una tensión que alimenta el cortocircuito. Por lo anterior, el motor síncrono opera como un generador ante una falla y entrega corriente de cortocircuito que de igual forma depende de su impedancia del mismo y de los elementos aguas arriba del cortocircuito.

### **3.1.1.2. Motores de inducción**

El mismo resultado que tiene la inercia de la carga de un motor síncrono tiene en un motor de inducción, a diferencia de que los motores de inducción no cuentan con un devanado de excitación de corriente directa, por lo cual el flujo en el rotor no decae de forma instantánea y este genera una tensión que contribuye a la corriente de cortocircuito.

De igual forma, la impedancia propia del motor y la impedancia del sistema hasta el punto de la falla son proporcionales a la magnitud de la corriente que contribuye el motor. Debido a que esta corriente es momentánea, a causa de la inercia de la carga, se estima que el valor de la corriente de cortocircuito es igual a un valor de la corriente de arranque a rotor bloqueado del motor, aproximadamente.

### **3.1.1.3. El sistema de suministro**

Cuando ocurre una falla en las instalaciones industriales, los generadores de la compañía suministradora de energía no se ven afectados ante la falla y estos siguen suministrando corriente lo cual aporta al cortocircuito. Para la representación del sistema de suministro de la compañía suministradora en el estudio de cortocircuito, se considera un equivalente de red en el punto de conexión a la industria con todos los parámetros necesarios para realizar dicho estudio.

### **3.1.2. Reactancias de las máquinas rotatorias**

El valor de reactancia de la máquina rotatoria es un valor que varía dependiendo del instante de análisis del cortocircuito, por lo cual se determinan



tres valores de reactancia para el análisis en intervalos de tiempos determinados, según muchos textos de estudio, los cuales se describen a continuación.

#### **3.1.2.1. Reactancia subtransitoria ( $X_d''$ )**

Este valor corresponde a la reactancia en los primeros milisegundos de ocurrido el cortocircuito, hasta aproximadamente los 0,1 segundos, luego de este tiempo se considera el valor de la reactancia transitoria. En textos de estudio se determina esta reactancia como la que aparece en el devanado del estator en el momento en que ocurre el cortocircuito.

#### **3.1.2.2. Reactancia transitoria ( $X_d'$ )**

Este valor de reactancia es el que se considera después de la reactancia subtransitoria y que dura hasta un valor de tiempo de 0,5 segundos, luego de este tiempo pasa a considerarse la reactancia síncrona.

#### **3.1.2.3. Reactancia síncrona ( $X_s$ )**

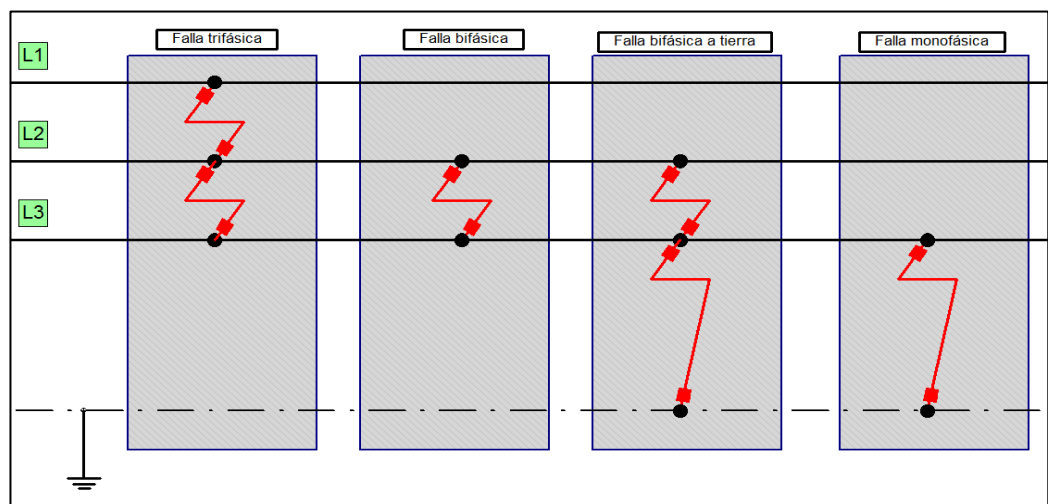
El valor de esta reactancia se utiliza para el análisis de la corriente cuando se considera que el estado de falla ha alcanzado un estado estable y que es después de varios segundos de ocurrida la falla.

#### **3.1.3. Tipos de falla**

Existen varios tipos de fallas que pueden ocurrir en una instalación eléctrica industrial las cuales se describen a continuación.

- **Falla trifásica:** también conocida como falla trifásica sólida, es aquella falla en la que las tres fases tienen contacto directo entre sí. Generalmente esta falla tiene un promedio de incidencia del 5 % en instalaciones industriales, aunque su porcentaje de ocurrencia es pequeño. Con esta falla se evalúan los estudios de cortocircuito, debido a que arroja los niveles de cortocircuito más elevados.
- **Falla bifásica:** también conocida como falla de fase a fase y es cuando dos fases se unen físicamente y generalmente tiene un porcentaje de ocurrencia del 87 %.
- **Falla bifásica a tierra:** esta falla es parecida a la anterior con la peculiaridad que además del contacto físico entre dos fases también se tiene contacto con tierra.
- **Falla monofásica:** también conocida como falla línea a tierra o como falla de fase a tierra y es cuando una fase de la instalación eléctrica industrial tiene contacto directo con la tierra.

Figura 25. **Tipos de fallas**

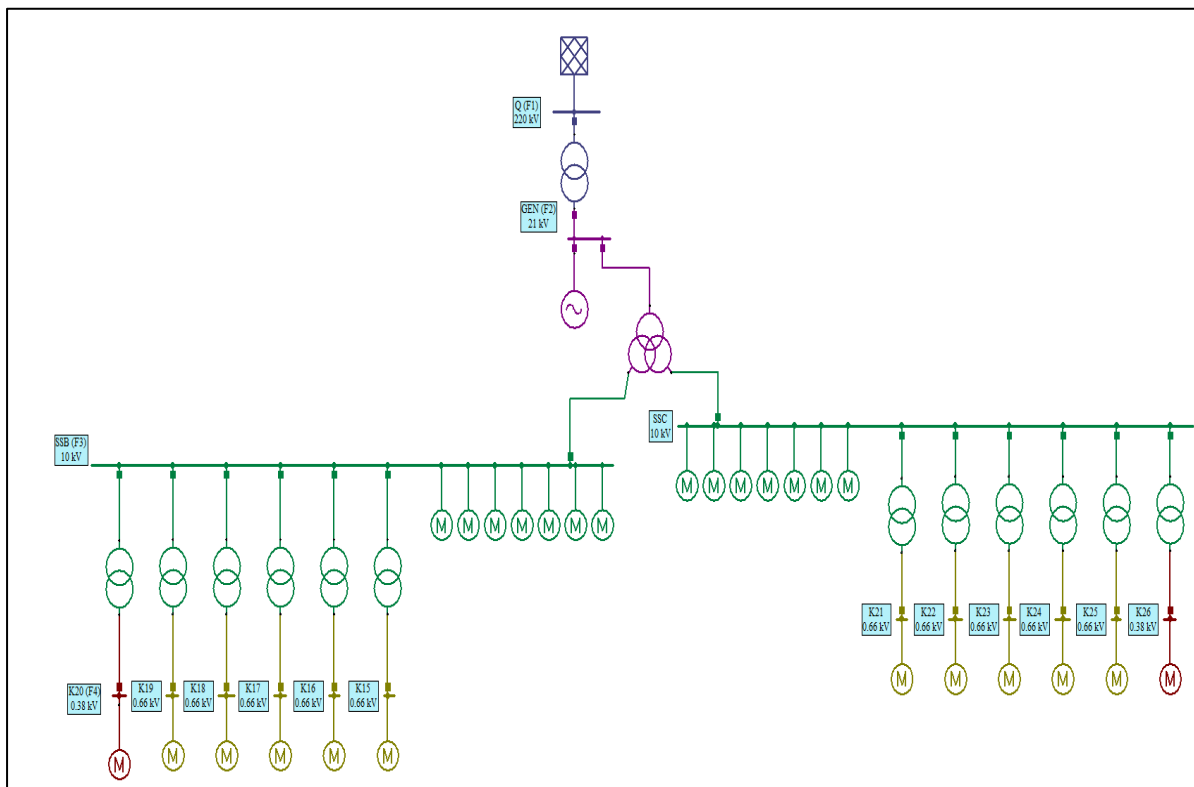


Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

### 3.1.4. Desarrollo de estudios de cortocircuito en *software*

Para explicar el desarrollo de estudios de cortocircuito mediante el *software*, se utiliza de ejemplo el siguiente sistema:

Figura 26. Diagrama unifilar de ejemplo de cortocircuito



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Para lo cual se abre el *software* NEPLAN versión 5.5.5 y se selecciona la opción de ejemplos; seguido se elige la opción cortocircuito y se escoge el archivo con nombre IEC909-3.nepprj, el cual contiene los siguientes elementos y parámetros:

Tabla XII. **Datos de equivalente de red**

Nombre	Tipo	FC tipo	Sk"mín MVA	Sk"máx MVA	Ik"mín kA	Ik"máx kA	Ik" según IEC	Voper pu	Vn kV
NETZ	Equivalente de red	SL	8000	8000	20.995	20.995	1	1	220

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Tabla XIII. **Datos de nodos**

Nombre	Tipo	Vn kV
K18	Nodo	0.66
K17	Nodo	0.66
K16	Nodo	0.66
K15	Nodo	0.66
SSC	Nodo	10
SSB (F3)	Nodo	10
GEN (F2)	Nodo	21
Q (F1)	Nodo	220
K26	Nodo	0.38
K25	Nodo	0.66
K24	Nodo	0.66
K23	Nodo	0.66
K22	Nodo	0.66
K21	Nodo	0.66
K20 (F4)	Nodo	0.38
K19	Nodo	0.66

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Tabla XIV. **Datos de transformadores de dos devanados**

Nombre	Grupo Vec.	Sr MVA	Vr1 kV	Vr2 kV	Zcc(1) %	R(1) %	Zcc(0) %	R(0) %
T21	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T22	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T23	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T24	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T25	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T26	YY.0	1.6	10	0.4	6	1.03125	6	1.03125
T20	YY.0	1.6	10	0.4	6	1.03125	6	1.03125
T19	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T18	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T17	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T16	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T15	YY.0	2.5	10	0.693	6	0.94	6	0.94
T	YY.0	250	240	21	15	0.208	15	0.208

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Tabla XV. Datos de motores

Nombre	Pr MW	Sr MVA	Vr kV	Ir kA	Cosphi	Eficiencia	la /lr	Pares de polos	Factor ANSI	Mr Nm	R1 /Zr	X1 /Zr	Zr Ohm
M5	0.53	0.75	10	0.04	0.75	0.95	4	5	3	8435	0	0.13	134.2
M4	0.7	0.87	10	0.05	0.85	0.95	4	3	3	6685	0	0.13	115.6
M3	1.5	1.77	10	0.10	0.88	0.96	4	1	1.5	4775	0	0.13	56.4
M2	3.1	3.80	10	0.22	0.85	0.96	4	2	1.5	19735	0	0.13	26.3
M1	6.8	7.83	10	0.45	0.89	0.98	4	2	1.5	43290	0	0.13	12.8
M21	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M14	2	2.45	10	0.14	0.85	0.96	4	3	1.5	19099	0	0.13	40.8
M13	0.53	0.75	10	0.04	0.75	0.95	4	5	3	8435	0	0.13	134.2
M12	0.7	0.87	10	0.05	0.85	0.95	4	3	3	6685	0	0.13	115.6
M11	1.85	2.27	10	0.13	0.85	0.96	4	3	1.5	17666	0	0.13	44.1
M10	1.5	1.77	10	0.10	0.88	0.96	4	1	1.5	4775	0	0.13	56.4
M9	3.1	3.80	10	0.22	0.85	0.96	4	2	1.5	19735	0	0.13	26.3
M8	5.1	6.03	10	0.35	0.87	0.97	4	3	1.5	48701	0	0.13	16.6
M20	1	1.39	0.38	2.11	0.8	0.90	5	20	1.5	63662	0	0.10	0.1
M19	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M18	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M17	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M16	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M15	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M7	1.71	2.10	10	0.12	0.85	0.96	4	3	1.5	16329	0	0.13	47.7
M6	2	2.45	10	0.14	0.85	0.96	4	3	1.5	19099	0	0.13	40.8
M26	1	1.39	0.38	2.11	0.8	0.90	5	20	1.5	63662	0	0.10	0.1
M25	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M24	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M23	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3
M22	0.9	1.25	0.66	1.09	0.8	0.90	5	18	1.5	51566	0	0.10	0.3

Fuente: elaboración propia utilizando el software NEPLAN.

Tabla XVI. **Datos de generador**

Nombre	Sr MVA	Vr kV	Cosphi	xd sat %	xd' sat %	xd'' sat %	x(2) %	x(0) %	Vf <sub>máx</sub> /vr	FC tipo	Q mín Mvar	Q máx Mvar	P mín MW	P máx MW
G	250	21	0.78	160	0	17	17	17	1.3	PQ	-1E+05	1E+05	-1E+05	1E+05

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Tabla XVII. **Datos de transformador de 3 devanados**

Nombr e	Sr12 MV A	Sr23 MV A	Sr31 MV A	Vr 1 kV	Vr 2 kV	Vr3 kV	Zcc 12(1 ) %	Zcc 23(1 ) %	Zcc 31(1 ) %	Zcc 12(0 ) %	Zcc 23(0 ) %	Zcc 31(0 ) %	R 12(0 ) %	R 23(0 ) %	R 31(0 ) %
EBT	25	25	25	21	11	10. 5	7	13	7	7	13	7	0.24	0.46	0.24

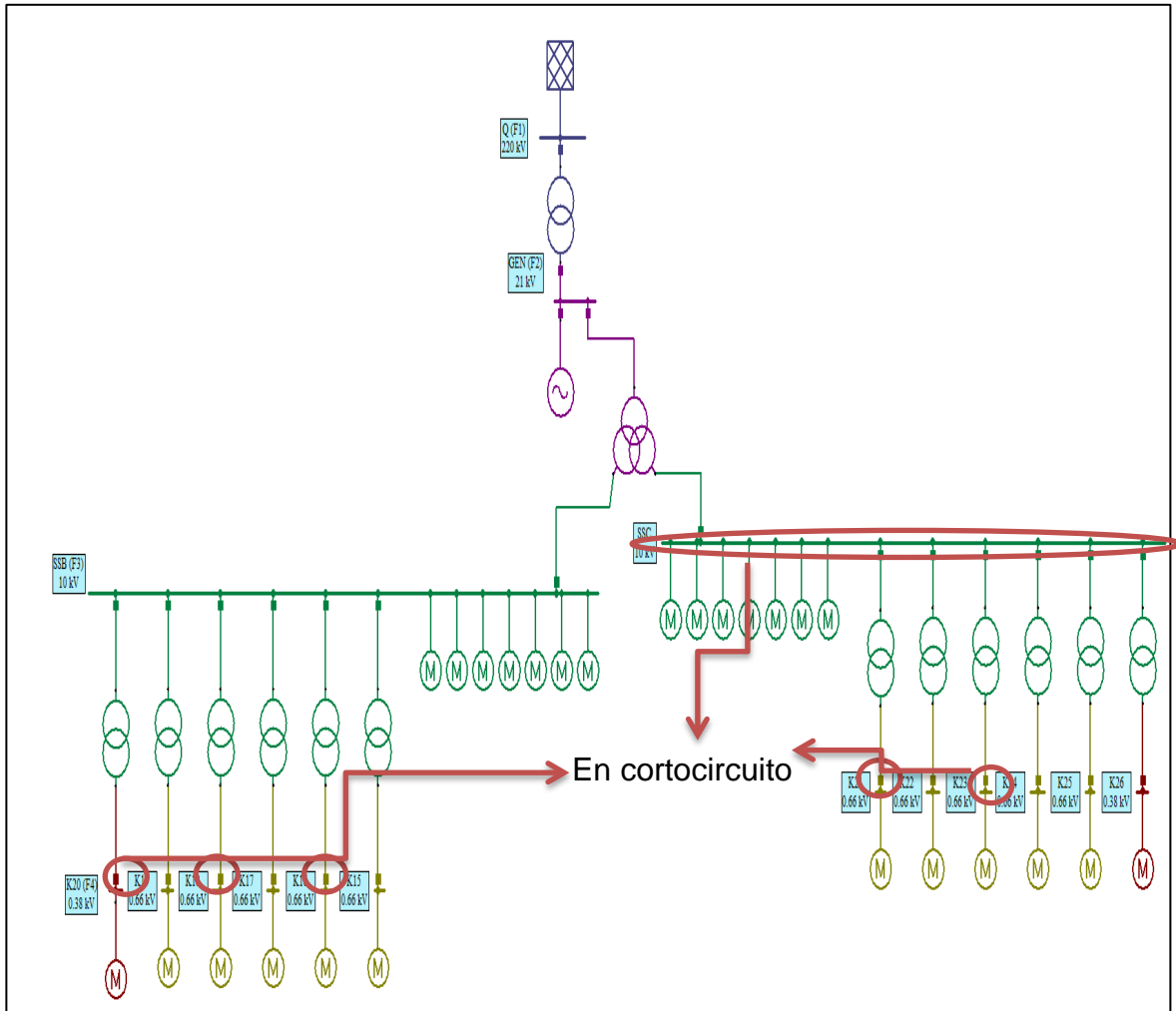
Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Con el diagrama unifilar modelado con los datos anteriores, el siguiente paso es identificar los nodos de la red eléctrica industrial donde se planea simular un cortocircuito. Para este ejemplo se simula un cortocircuito trifásico en los nodos K20 (F4), K18, K16, K21, K23 y el nodo SSC.

Antes de calcular las corrientes de cortocircuito es necesario configurar el escenario de estudio, para lo cual debe de irse a la opción de parámetros de cortocircuito (análisis>cortocircuito>parámetros...) donde se seleccionan las siguientes configuraciones:

- Tipo de falla: falla trifásica
- Método de cálculo: IEC60909 Ed. 2 2015
- Calcular  $I_{k''}$  máx: sí
- Nodos bajo falla: K16, K18, K20 (F4), K21, K23 y SSC

Figura 27. Identificación de nodos en cortocircuito



Fuente: elaboración propia utilizando el software NEPLAN.

Identificados los nodos en los cuales se va a simular el cortocircuito y configurado el escenario, lo siguiente es resolver / calcular las corrientes de cortocircuito para lo cual se puede realizar al presionando Alt+C o en la barra de herramientas siguiente se selección calcular.



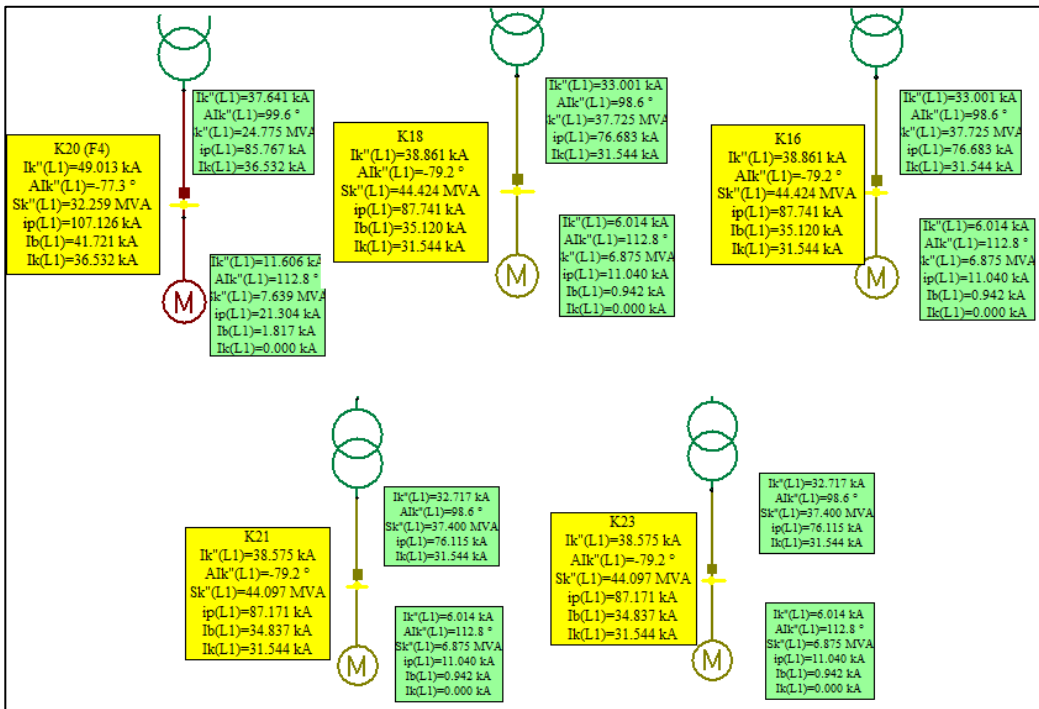
Figura 28. Barra de herramientas análisis eléctrico



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Al resolver el escenario de cortocircuito, planteado en la instalación industrial, se obtienen los resultados, en los nodos seleccionados, que se muestran en la siguiente figura.

Figura 29. Resultados del análisis de cortocircuito, en diagrama unifilar



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Donde:

- $I_{k''}$ : corriente del cortocircuito inicial
- $Al_{k''}$ : ángulo de la corriente del cortocircuito inicial
- $Sk''$ : potencia del cortocircuito inicial
- $i_p$ : corriente pico del cortocircuito
- $I_b$ : corriente de interrupción
- $I_k$ : corriente del cortocircuito de estado estable

Los resultados anteriores se pueden trasladar a una tabla de resultados para luego importarlos a Excel o a cualquier editor de texto para lo cual se debe seleccionar la opción tabla de resultados o presionar Alt+G.

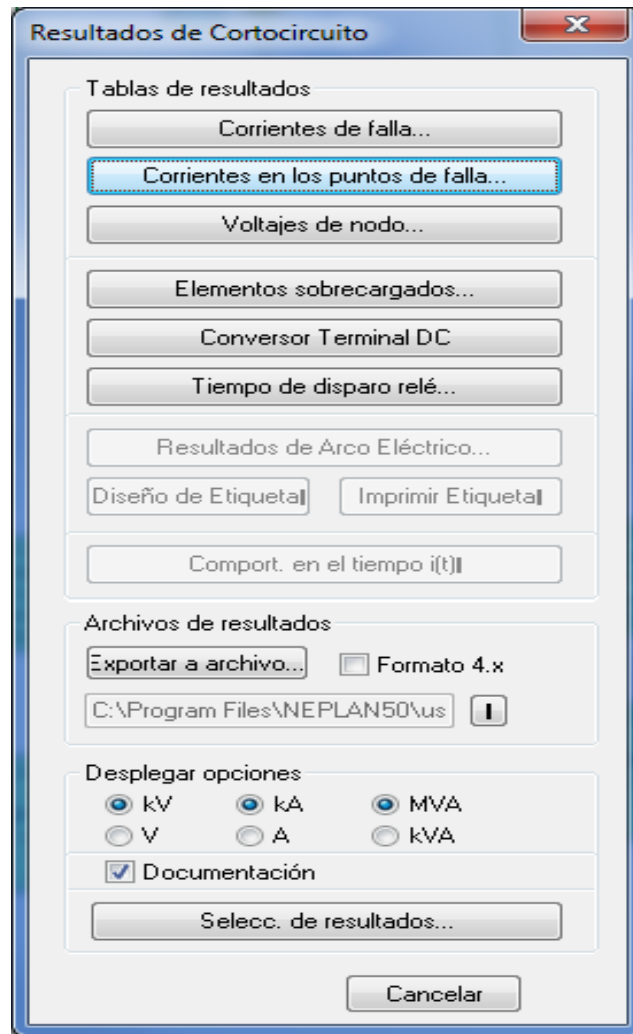
Figura 30. **Barra de herramientas análisis eléctrico**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Luego de seleccionar la opción tabla de resultados en la barra de herramientas análisis eléctrico, se abrirá otra ventana en la cual se debe seleccionar “corrientes en los puntos de falla”, como se muestra a continuación.

Figura 31. **Resultados de cortocircuito**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

A continuación, se muestran los resultados de cortocircuito de la instalación eléctrica industrial en análisis donde se muestra: corrientes de cortocircuito iniciales, corrientes de cortocircuito pico, corrientes de cortocircuito de estado estable y el tipo de falla analizado.

Tabla XVIII. **Resultados del análisis de cortocircuito**

Ubicación de falla	$I_k''$ (RST) kA	$A I_k''$ (RST) °	$i_p$ (RST) kA	$I_b$ (RST) kA	$I_k$ (RST) kA	$S_k''$ (RST) MVA	Tipo de falla
K16	38.861	-79.2	87.741	35.12	31.544	44.424	Falla trifásica
K18	38.861	-79.2	87.741	35.12	31.544	44.424	Falla trifásica
SSC	26.118	-85.4	67.031	22.043	18.287	452.38	Falla trifásica
K20 (F4)	49.013	-77.31	107.126	41.721	36.532	32.259	Falla trifásica
K23	38.575	-79.22	87.171	34.837	31.544	44.097	Falla trifásica
K21	38.575	-79.22	87.171	34.837	31.544	44.097	Falla trifásica

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

### 3.2. **Conceptos básicos para el estudio de coordinación de protecciones**

El análisis de la corriente contra el tiempo de actuación de los equipos de protección, desde los equipos de consumo de energía eléctrica hasta la fuente suministradora de energía, es lo que comprende un estudio de coordinación de esquemas de protección. En este estudio generalmente se determinan los tiempos de actuación de los dispositivos de protección frente a ciertos niveles anómalos de corriente que pasan sobre estos dispositivos.

Una adecuada coordinación de protecciones ayuda a localizar la falla para aislar los elementos en falla de la instalación en un tiempo corto; además, de detectar situaciones anormales e indeseadas en la instalación y si fuese necesario iniciar el proceso de retiro de los equipos que puedan resultar afectados.

Un estudio de coordinación de protecciones es muy importante y necesario ya que con este se puede dimensionar o verificar las particularidades

de los dispositivos de protección; tales particularidades pueden ayudar para determinar los ajustes de los relevadores, capacidad interruptora de los fusibles, capacidad de los dispositivos termo-magnéticos, entre otras.

### **3.2.1. Dispositivos de protección**

En instalaciones eléctricas industriales existen varios dispositivos cuya función es proteger a las propias instalaciones.

#### **3.2.1.1. Fusibles**

El fusible es uno de los dispositivos de protección más usado en la industria y su principal función es interrumpir sobrecorrientes que se generen por una falla. En la actualidad existen una gran cantidad de fusibles que dependen de varias características y particularidades.

- Capacidad interruptiva
  - Clase H
  - Clase K
  - Clase R
  - Clase T
  - Standard
  
- Velocidad de operación
  - Acción retardada
  - Acción rápida
  - Acción extremadamente rápida

- Tipo de operación
  - Limitador de corriente
  - Vacío
  - Tipo expulsión
  - Triple disparo

A la relación del tiempo requerido promedio para que un fusible se funda, ante la conducción de cierta corriente se le conoce como curva de fusión del fusible (tiempo-corriente). La norma ANSI C37.42 establece curvas para los fusibles: curvas tipo T y curvas tipo K. Para los fusibles con curvas tipo T estos poseen curvas corriente versus tiempo con pendientes más inclinadas siendo así lentos ante la actuación de una falla; caso contrario, los fusibles con curvas tipo K, ya que estos poseen curvas con pendientes máximas haciéndolos más rápidos en actuar.

### **3.2.1.2. Interruptores**

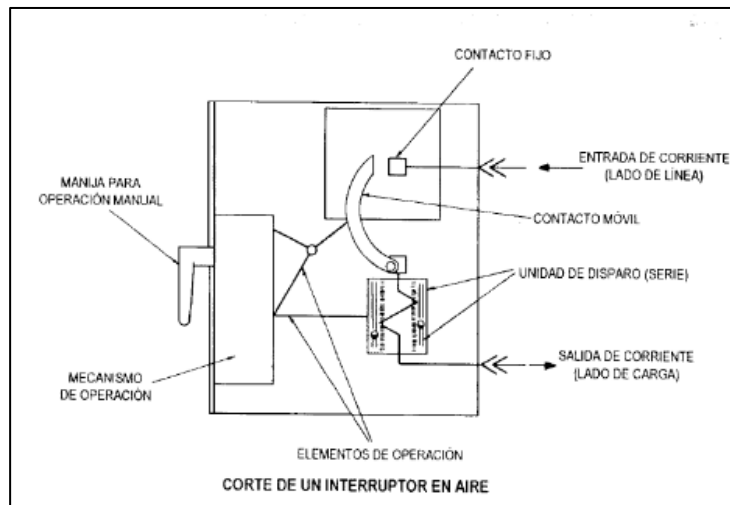
Generalmente estos dispositivos se utilizan para la protección de circuitos secundarios y derivados. Estos a su vez se pueden dividir en:

- Interruptores en aire
- Interruptores en caja moldeada

### 3.2.1.2.1. Interruptores en aire

Se utilizan frecuentemente para proteger circuitos y alimentadores principales. El mecanismo de funcionamiento de este dispositivo puede ser de varias formas, pero la estructura general se puede observar en la siguiente figura.

Figura 32. Interruptor en aire



Fuente: GILBERTO, Harper. *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. p. 135.

### 3.2.1.2.2. Interruptores en caja moldeada

Estos, como su nombre indica, se encuentran contenidos en una caja y se utilizan para la protección de circuitos derivados: centros de motores. Son tipo termomagnético y poseen una capacidad interruptiva alta. Al igual que los fusibles poseen curvas tiempo-corriente y son determinadas por los fabricantes de estos dispositivos.

### **3.2.1.3. Combinación interruptor-fusible**

Este dispositivo es una combinación de ambos equipos de protección y es de gran utilidad ya que se aprovecha las funciones interruptivas y de disparo de dichos dispositivos de protección. Además, tiene la ventaja de ser de un menor costo que un interruptor de total capacidad y se puede usar en sistemas donde la corriente de falla sea de niveles altos.

### **3.2.1.4. Relevadores**

Los relevadores son elementos de protección que cuando se energizan aíslan segmentos que se encuentran bajo falla. Generalmente se constituyen de un elemento de operación y un grupo de contactos, cualquiera que sea el tipo del relevador, para garantizar su funcionamiento debe cumplir con las siguientes características:

- Sensibilidad: deben de detectar y operar cuando se produzca una corriente de falla no importando lo mínima que sea.
- Selectividad: deben de actuar despejando solo el área donde se encuentre la falla.
- Rapidez; deben de actuar, ante una falla, lo más rápido posible, evitando así pérdida de otros elementos.

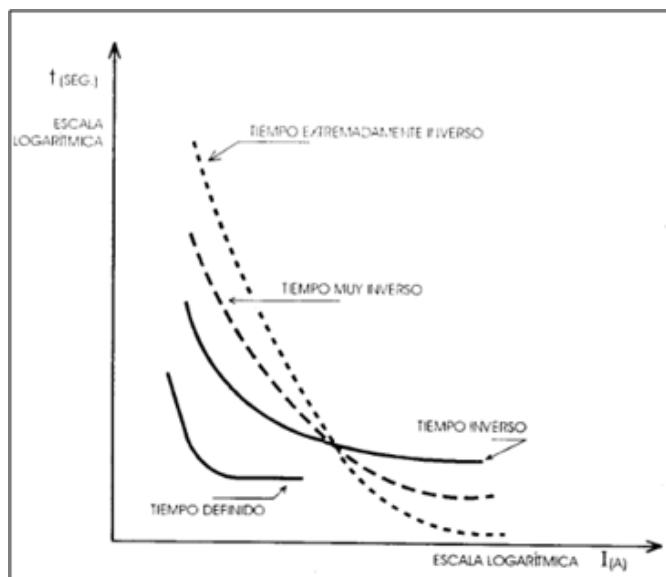
#### **3.2.1.4.1. Relevadores de sobrecorriente**

Este dispositivo de protección opera cuando en la instalación circula una corriente mayor a la que generalmente circularía. Este dispositivo se utiliza en su mayoría en instalaciones industriales y puede ser de dos formas:



- Tiempo instantáneo: es diseñado para operar sin retardo de tiempo, su rango de operación varía entre 0,016 segundos hasta 0,10 segundos.
- Retraso de tiempo: es diseñado para que opere bajo una característica de operación, de forma que el tiempo de disparo es inversamente proporcional con la corriente que circula. Dicha característica puede ser una de las siguientes:
  - De tiempo definido
  - De tiempo inverso
  - De tiempo muy inverso
  - De tiempo extremadamente inverso

Figura 33. **Curvas de relevador con retraso de tiempo**



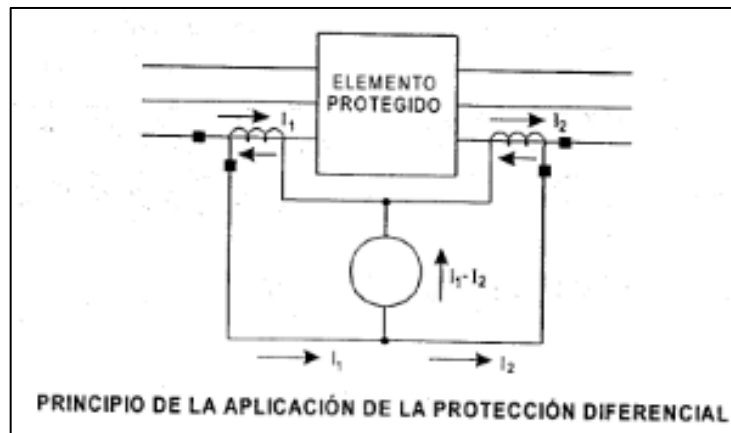
Fuente: GILBERTO, Harper. *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales.*

p. 276.

### 3.2.1.4.2. Relevadores diferenciales

Este relevador compara las señales de entrada y salida de los equipos (generadores, transformadores, motores, entre otros) protegidos; opera si encuentra alguna diferencia entre ambas señales.

Figura 34. **Funcionamiento del relevador diferencial**

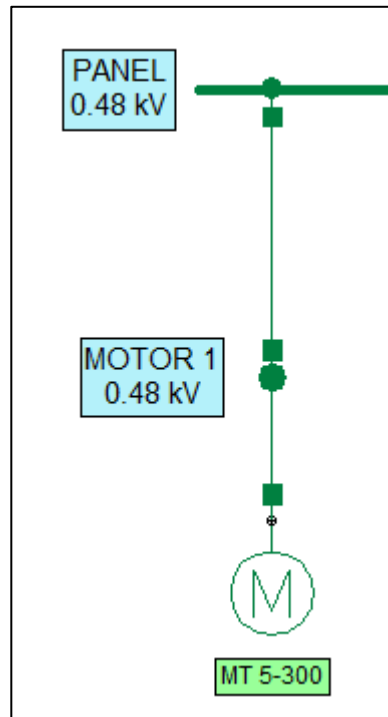


Fuente: GILBERTO, Harper. *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. p. 293.

### 3.2.2. Ejemplo de coordinación de protecciones en *software*

A continuación se describe un ejemplo de cómo coordinar los esquemas de protección de un motor, el conductor y el interruptor mediante el *software* de estudio. Para lo cual se utiliza el siguiente diagrama unifilar.

Figura 35. Diagrama de ejemplo de coordinación

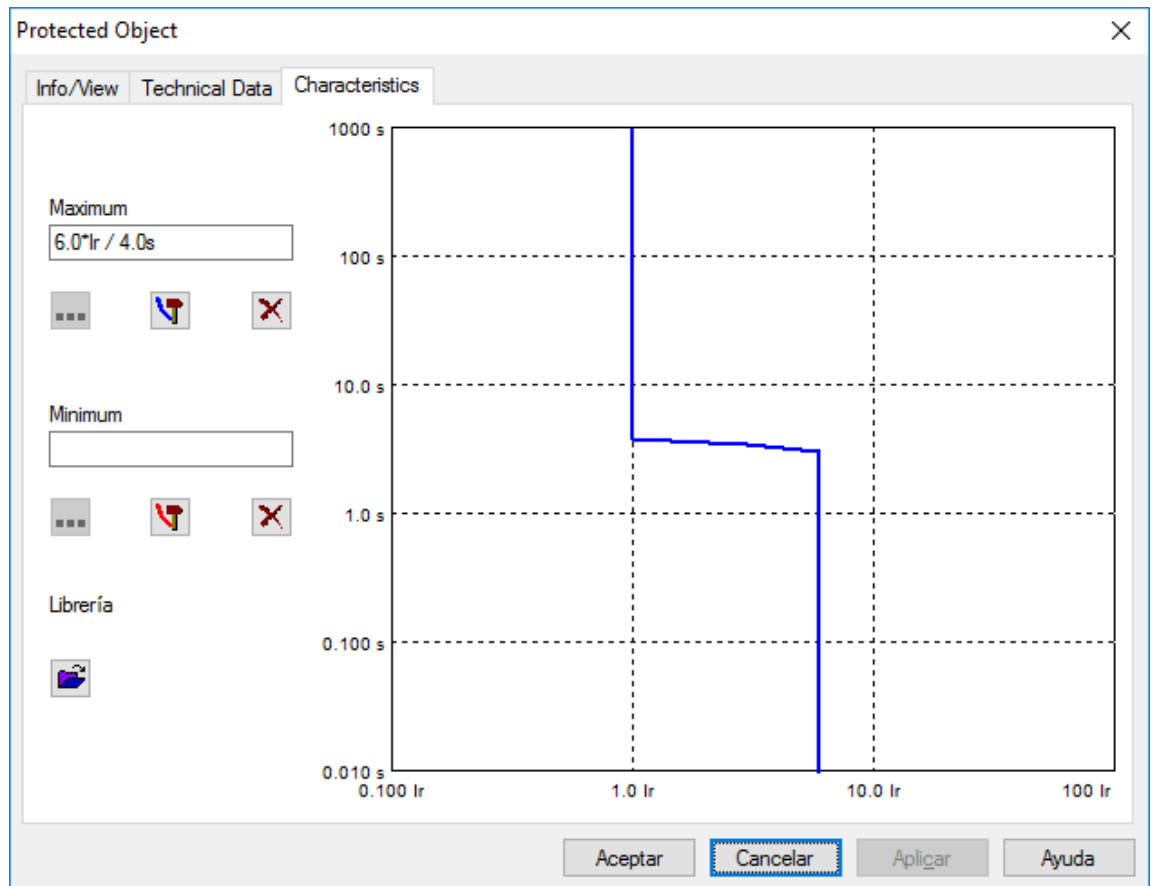


Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

A continuación, se protege el circuito anterior con un interruptor y se procede a definir las respectivas características tiempo-corriente de los elementos a proteger. Lo anterior se puede apreciar en las siguientes figuras.

Primero, se modela la curva tiempo-corriente del motor 1 para lo cual se consideran parámetros del motor.

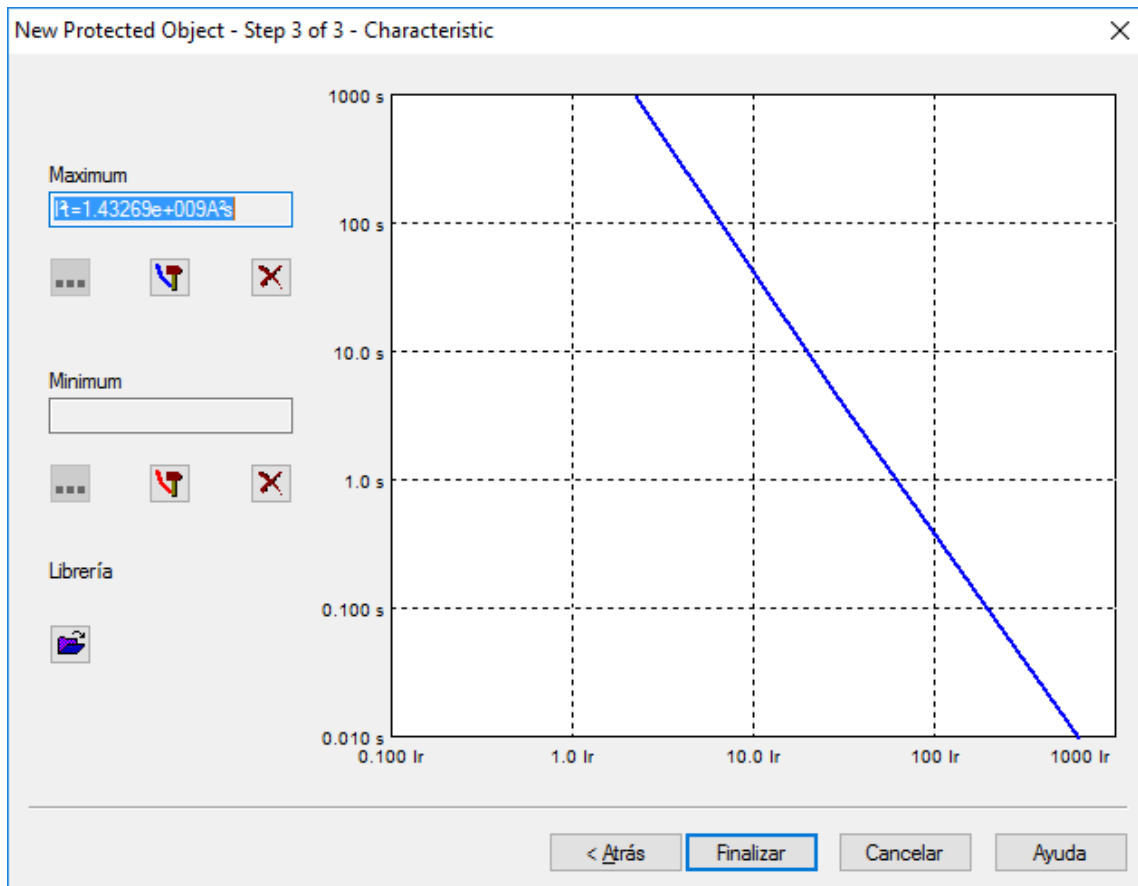
Figura 36. Curva tiempo-corriente de motor



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Posteriormente, se introducen las características tiempo-corriente del cable considerando el material y la capacidad de dicho cable.

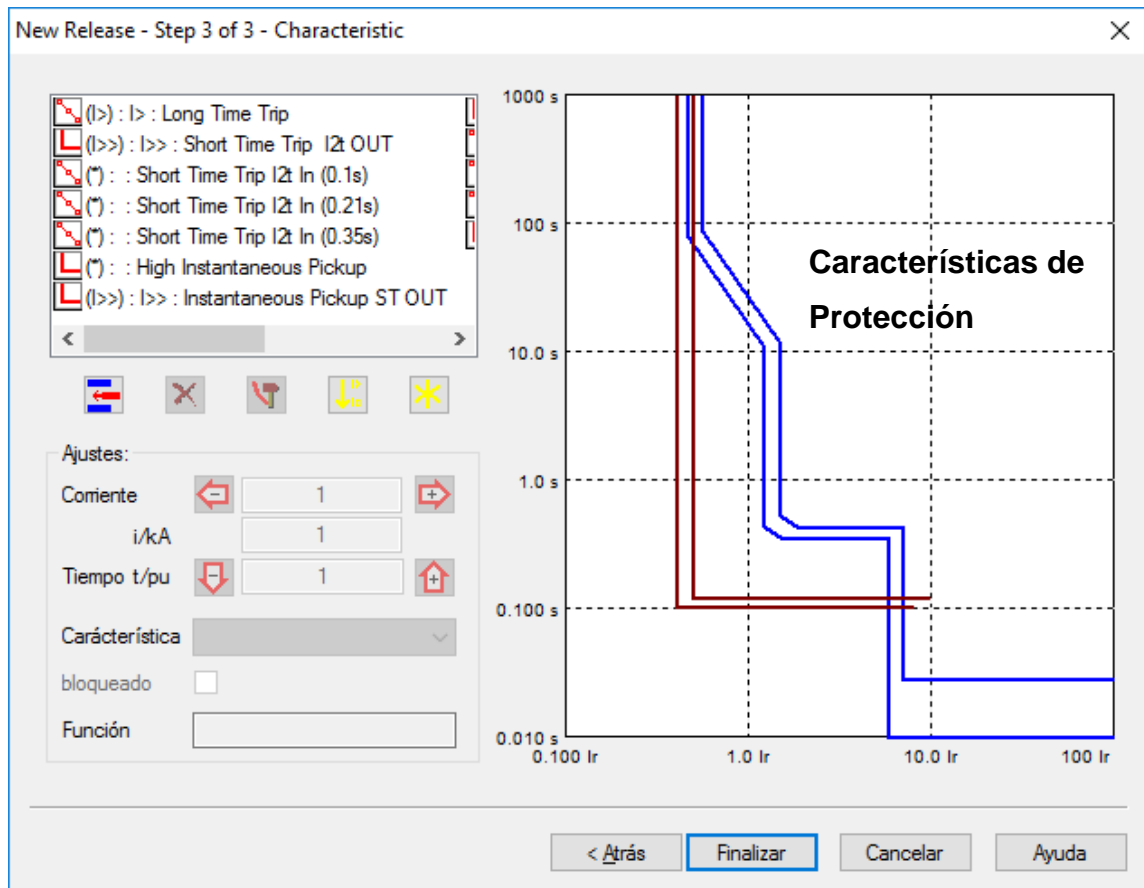
Figura 37. **Curva tiempo-corriente del cable**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

A continuación, se modelan las características tiempo-corriente del interruptor. Es importante mencionar que en esta pestaña se pueden modificar los parámetros de la curva tiempo-corriente del interruptor, lo cual es necesario para coordinar la correcta protección de los equipos, para este caso el motor 1.

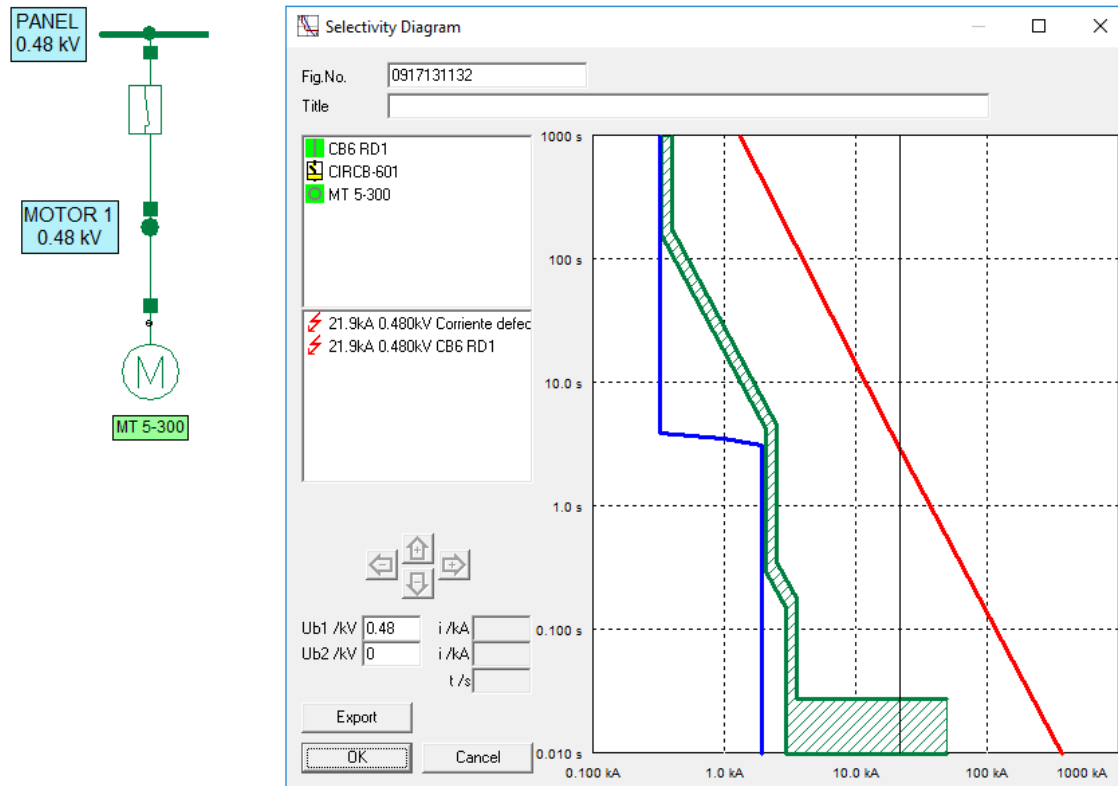
Figura 38. Curva tiempo-corriente de interruptor



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Simulando una falla y verificando los tiempos y curvas, se puede observar que con los parámetros introducidos se puede despejar correctamente una falla en el motor 1, al tiempo que se garantiza el resguardo de los equipos de la instalación industrial. A continuación, se muestra el diagrama unifilar con el interruptor de potencia y correcta coordinación de las curvas tiempo-corriente de los elementos.

Figura 39. Coordinación de la protección de motor



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

En la figura anterior se puede observar que ante una falla en el motor actúa antes la protección, garantizando así la protección de este elemento, además se aprecia que el conductor es capaz de soportar la corriente de falla en el tiempo que dura el despeje de la falla, lo que garantiza también la protección del conductor.

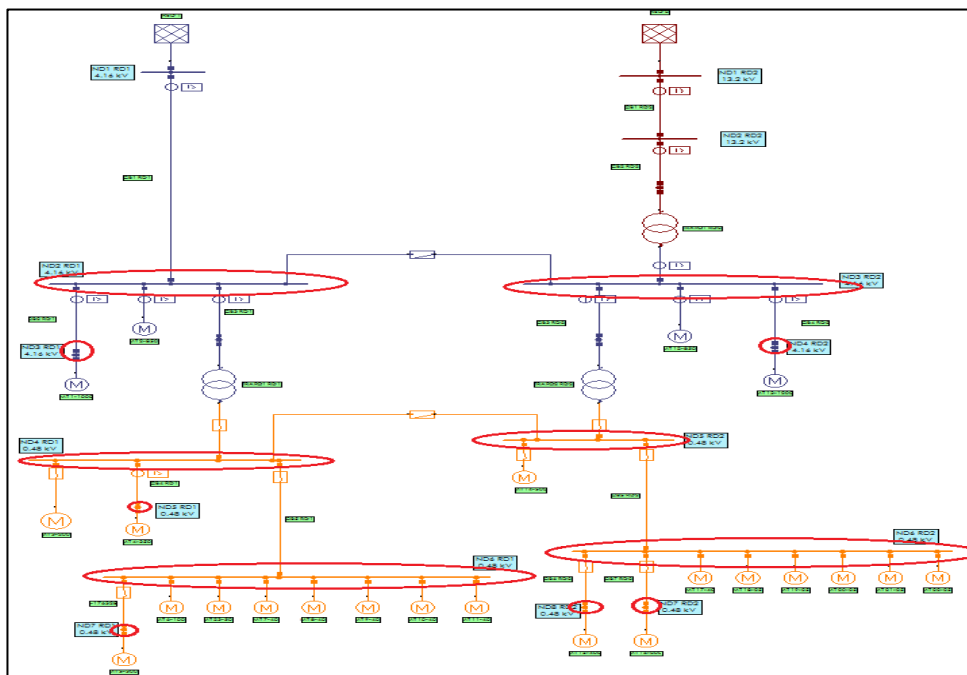
## 4. ESTUDIO DE ARCO ELÉCTRICO

### 4.1. Procedimiento para el estudio del arco eléctrico

A continuación se ejemplificará un estudio del arco eléctrico siguiendo los procedimientos definidos en el capítulo 2 del presente trabajo.

El primer paso es identificar los puntos o equipos con riesgo de arco eléctrico y que para el ejemplo serán todas las barras que conecten carga (motores).

Figura 40. Identificación de nodos con riesgo de arco eléctrico



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.



En la imagen anterior se muestran las barras (nodos/paneles) en los cuales se analizará el riesgo de arco eléctrico, se designan con los siguientes nombres:

- ND2 RD1
- ND3 RD1
- ND4 RD1
- ND5 RD1
- ND6 RD1
- ND7 RD1
- ND3 RD2
- ND4 RD2
- ND5 RD2
- ND6 RD2
- ND7 RD2
- ND8 RD2

NDx RDx significa nodo x de la red x para su mejor análisis. El siguiente paso consiste en la recopilación de los datos de la instalación eléctrica que se pretende analizar, para lo cual se utilizan los siguientes parámetros:

Tabla XIX. **Datos de equivalentes de red**

Nombre	Tipo	FC tipo	Sk"mín MVA	Sk"máx MVA	Ik"mín kA	Ik"máx kA	Ik" según IEC	Voper pu	Vn kV
RED 2	Equivalente de red	SL	0	800.207	0	35	0	1	13.2
RED 1		SL	0	216.16	0	30	0	1	4.16

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Tabla XX. **Datos de nodos**

Nombre	Nodo Tipo	Vn kV	Equipo	Espac. entre conduc. mm
ND3 RD1	Nodo	4.16	Aire libre	102
ND1 RD2	Nodo	13.2	Aire libre	153
ND2 RD2	Nodo	13.2	Aire libre	153
ND1 RD1	Nodo	4.16	Aire libre	102
ND6 RD1	Nodo	0.48	Aire libre	32
ND7 RD1	Nodo	0.48	Aire libre	32
ND5 RD1	Nodo	0.48	Aire libre	32
ND4 RD2	Nodo	4.16	Aire libre	102
ND7 RD2	Nodo	0.48	Aire libre	32
ND4 RD1	Nodo	0.48	Aire libre	32
ND5 RD2	Nodo	0.48	Aire libre	32
ND2 RD1	Nodo	4.16	Aire libre	102
ND3 RD2	Nodo	4.16	Aire libre	102
ND6 RD2	Nodo	0.48	Aire libre	32
HV TRAFO1	Nodo	13.2	Aire libre	153
HV1 TRAFO 2	Nodo	4.16	Aire libre	102
HV1 TRAFO1	Nodo	4.16	Aire libre	102
ND8 RD2	Nodo	0.48	Aire libre	32

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Tabla XXI. **Datos de transformadores de dos devanados**

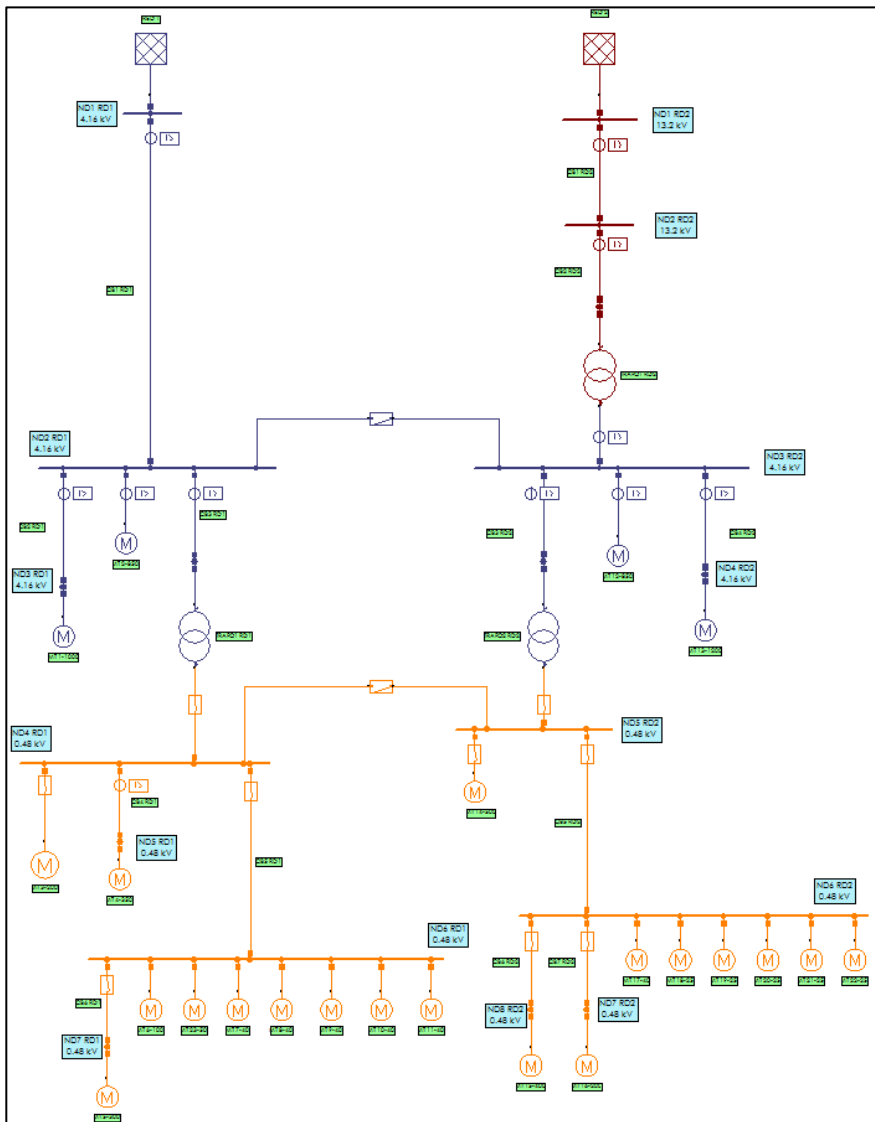
Nombre	Grupo Vec.	Sr MVA	Vr1 kV	Vr2 kV	Zcc(1) %	R(1) %	Zcc(0) %	R(0) %
TRAFO2 RD2	Dyn5	3	4.16	0.48	9	0.51787	7.5	0.34025
TRAFO1 RD1	Dyn5	3	4.16	0.48	9	0.51787	7	0.69653
TRAFO1 RD2	Dyn5	20	13.2	4.16	9	0.69653	7	0.69653

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Los datos complementarios (motores, cable, entre otros) de la instalación eléctrica industrial anterior se encuentran en los apéndices del presente

trabajo. El siguiente paso es la elaboración del diagrama unifilar de la instalación eléctrica industrial a analizar, el cual es el siguiente:

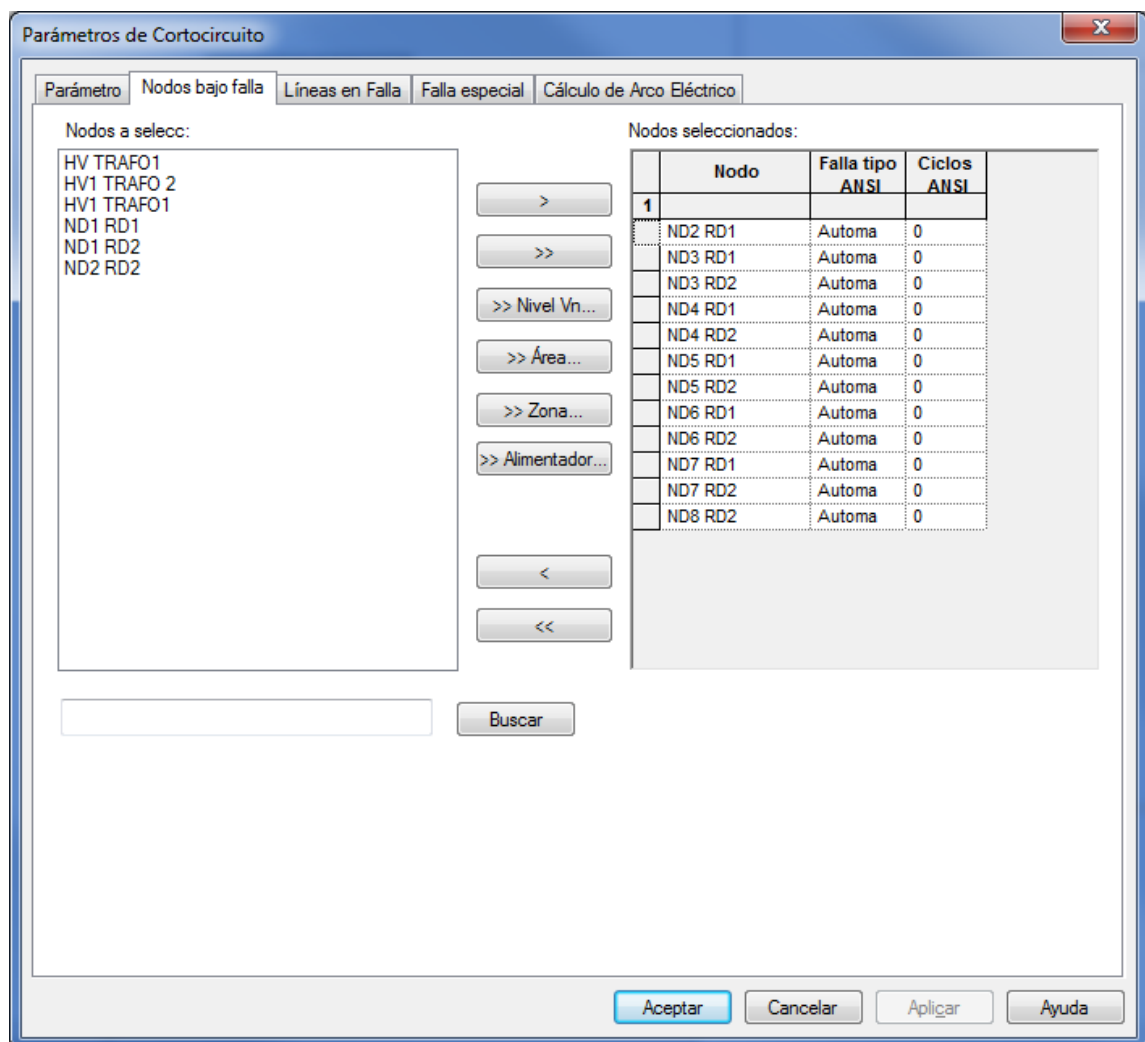
Figura 41. Diagrama unifilar instalación eléctrica industrial



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

El paso numero 4 es la elaboración del estudio de cortocircuito. Se usará la metodología descrita en el capítulo anterior para determinar las corrientes de cortocircuito, en los nodos que se pretende analizar el riesgo de arco eléctrico. Por lo anterior, se procederá a introducir en dichos nodos una falla trifásica.

Figura 42. Selección de los nodos en cortocircuito



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Se procede ahora, a resolver el escenario con las fallas previamente introducidas, para lo cual en la tabla siguiente se muestran los resultados definidos por el *software*.

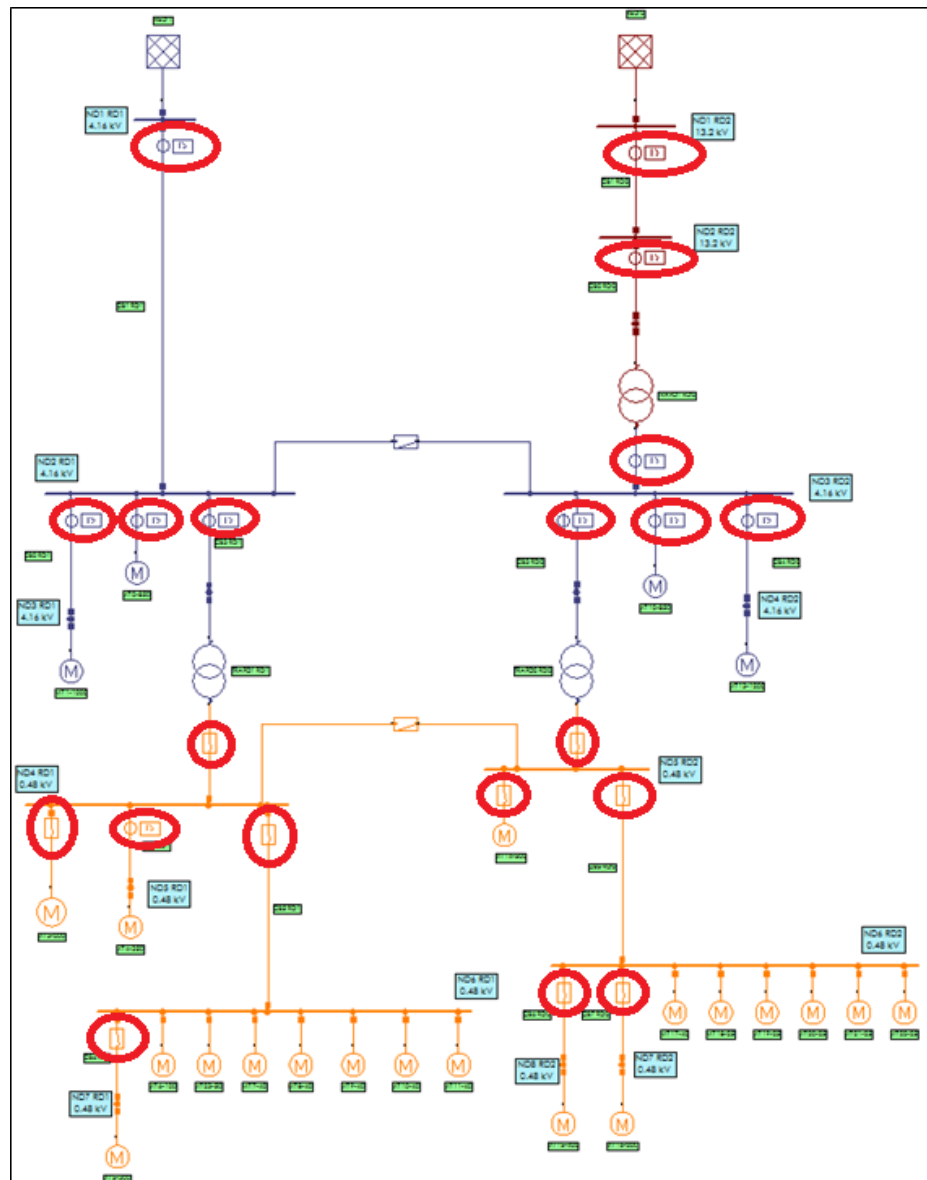
Tabla XXII. **Resultados del estudio de cortocircuito**

Ubicación de falla	Vn kV	I <sub>k</sub> " (RST) kA	Alk" (RST) °	i <sub>p</sub> (RST) kA	I <sub>b</sub> (RST) kA	I <sub>k</sub> (RST) kA	Tipo de falla	Método	Número de ciclos
ND2 RD1	4.16	35.094	-84.2	94.753	34.018	32.931	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND3 RD1	4.16	34.362	-83.88	92.778	33.319	32.253	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND3 RD2	4.16	24.518	-82.03	66.199	23.419	22.251	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND4 RD2	4.16	24.482	-82.01	66.102	23.385	22.219	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND4 RD1	0.48	44.816	-86.1	121.002	40.462	37.984	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND5 RD2	0.48	43.001	-85.91	116.104	38.435	35.632	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND5 RD1	0.48	34.262	-82.13	92.506	31.22	29.415	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND6 RD1	0.48	28.16	-80.15	76.033	24.953	23.361	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND7 RD1	0.48	23.649	-78.56	63.853	21.084	19.749	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND6 RD2	0.48	33.628	-84.98	90.794	29.755	27.518	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND8 RD2	0.48	19.646	-78.88	53.043	17.437	16.066	Falla trifásica	ANSI C37.10	3
ND7 RD2	0.48	29.007	-82.79	78.32	25.935	24.117	Falla trifásica	ANSI C37.10	3

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Con ayuda de los resultados anteriores se procede a determinar los dispositivos de protección necesarios en la instalación eléctrica industrial. Para el escenario de análisis se modelaron los siguientes dispositivos:

Figura 43. **Dispositivos de protección**



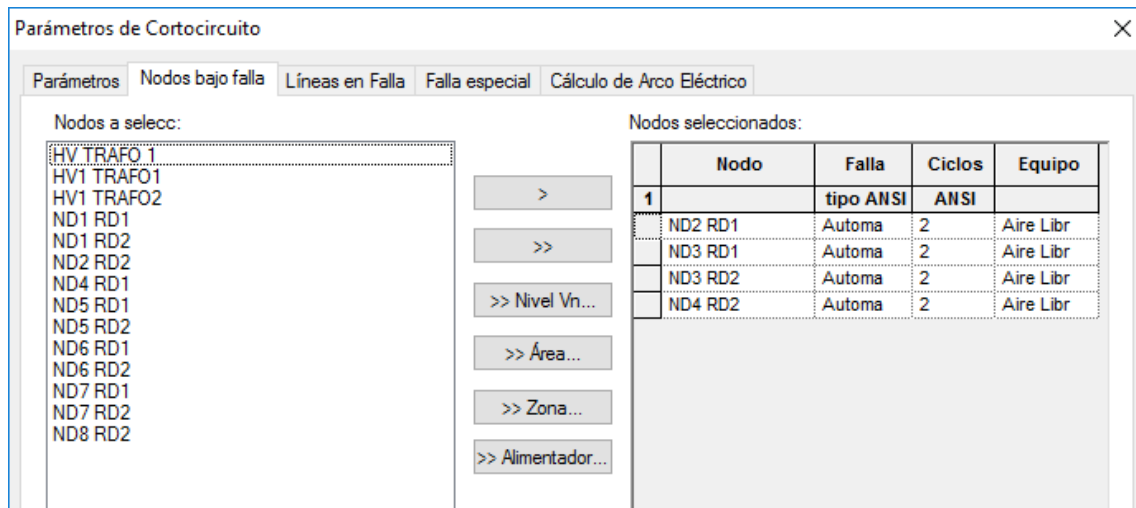
Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

A continuación, se procederá a estimar la corriente del arco eléctrico esperada y estimar la duración del arco eléctrico, para lo cual es necesario realizar ciertos ajustes a los parámetros de resolución del escenario bajo análisis:

- Primero, hay que hacer distinción de los nodos en los cuales se analizará el riesgo de arco eléctrico.
- Segundo, se modificará el tiempo para el despeje de falla, el cual depende del nivel de tensión del nodo en el que se esté realizando el análisis de riesgo de arco eléctrico.

De lo anterior se procede a analizar el riesgo de arco eléctrico de los nodos con voltaje 4.16 kV para lo cual se ponen los siguientes nodos bajo falla:

Figura 44. **Nodos de 4.16 kV bajo falla**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

A continuación, se modifica el tiempo de despeje de falla para instalaciones de 4,16 kV según la norma IEEE-1584-2002 y otros parámetros de cálculo de arco eléctrico:

Figura 45. **Parámetros de arco eléctrico para nodos de 4.16 kV**

Norma: IEEE 1584 - 2002

Tierra: Sistema Aterizado

Energ. incid. a la dist. del límite de protecc. del arco: 5 en  Cal/cm<sup>3</sup>  J/cm<sup>3</sup>

Porcent. de Reducc. de Corriente .. %: 85

Tiempo de clarific. de falla (valor por defecto) .. s: 0.08

Tiempo de apertura del interruptor en ciclos: 5

Dist. de Trabajo para cálculo de Arco Eléctrico

Dist. de Trabajo mínima: 460

Incremento para la dist. de trabajo: 150

Distancia máx. de trabajo: 910

Unidades:  pulg.  mm

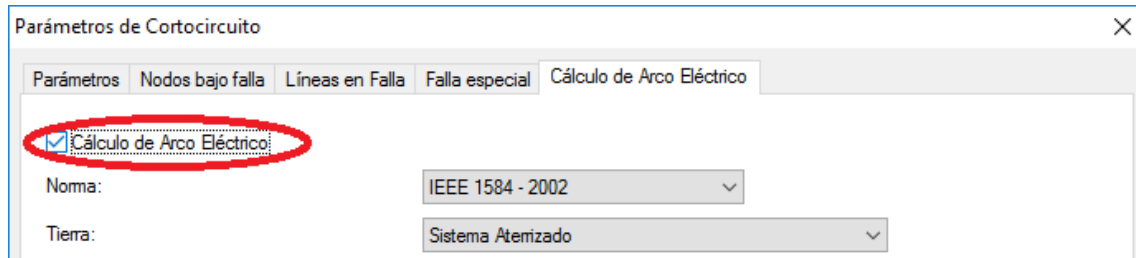
Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Para niveles de voltaje entre 1-35 kV, según la Tabla XI, se selecciona un tiempo de apertura de 5 ciclos y 0,08 segundos, para lo cual en este escenario se seleccionan esos valores debido a que el nivel de tensión de los nodos de análisis es de 4,16 kV.

Para determinar la energía incidente en cada nodo de análisis es necesario habilitar, en parámetros de cortocircuito, el cálculo del arco eléctrico. Además, en propiedades del diagrama, en la pestaña cortocircuito, habilitar resultados de arco eléctrico (editar/propiedades del diagrama...), como se muestra en las siguientes figuras:

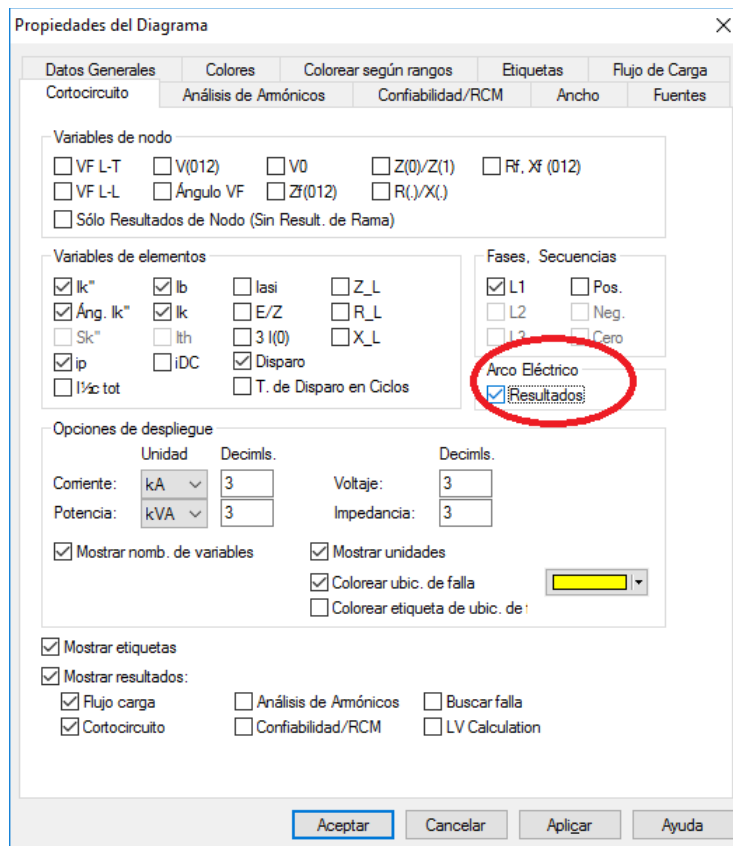


Figura 46. **Habilitar cálculos del arco eléctrico**



Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Figura 47. **Habilitar resultados del arco eléctrico**

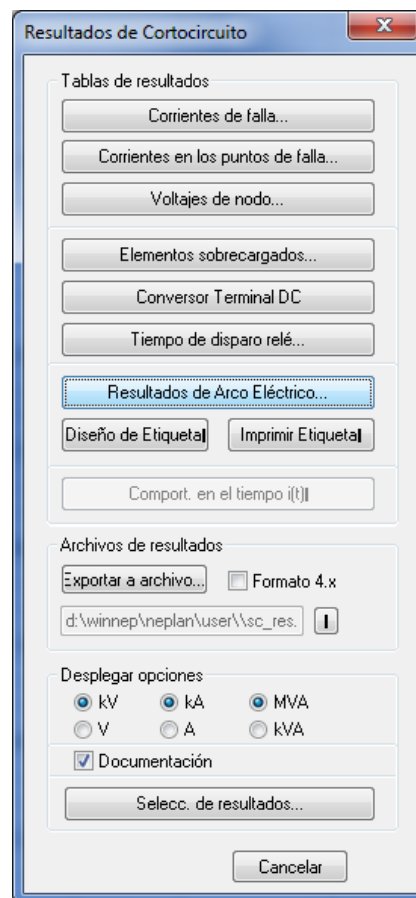


Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

El siguiente paso es resolver/calcular las corrientes de cortocircuito según se mostró en la Figura 28. Luego de resolver las corrientes de cortocircuito es necesario desplegar los resultados del arco eléctrico para lo cual se selecciona la opción tabla de resultados, como se muestra en la Figura 30.

A continuación, se desplegará una ventana en la cual se seleccionará “resultados de arco eléctrico...”, como se muestra a continuación:

Figura 48. Selección de resultados del arco eléctrico



Fuente: elaboración propia utilizando el software NEPLAN.

A continuación, se muestran los resultados de arco eléctrico de los nodos de 4.16 kV de la instalación eléctrica industrial bajo análisis: corriente de arco estimada, energía incidente, categoría de riesgo de arco eléctrico y distancia límite de protección contra arco eléctrico.

**Tabla XXIII. Resultados de arco eléctrico nodos de 4.16 kV**

Tipo	Nodo en Falla	Iarc kA	Límites de protección cm	Distancia de oper. mm	Energía incidente J/cm <sup>2</sup>	Categoría
Nodo	ND2 RD1	33.341	94.285	460	21.006	2
Nodo	ND3 RD1	32.658	93.236	460	20.541	2
Nodo	ND3 RD2	23.7	78.4	460	14.524	1
Nodo	ND4 RD2	23.665	78.339	460	14.501	1

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Para los nodos con voltaje de 0,48 kV, según la Tabla XI, con interruptor de potencia para este nivel de tensión, se utiliza un tiempo de apertura de 3 ciclos y de 0,05 segundos.

Por lo anterior, para los nodos bajo análisis de arco eléctrico con niveles de 0,48 kV, se modificó el tiempo de apertura y los ciclos; seguido de esta modificación, se aplicó el mismo procedimiento descrito en los párrafos anteriores para determinar: la energía incidente, categoría de riesgo de arco eléctrico y distancia límite de protección contra el arco eléctrico.

Los resultados se muestran a continuación.

Tabla XXIV. **Resultados de arco eléctrico nodos de 0.48 kV**

Tipo	Nodo en falla	I <sub>arc</sub> kA	Límites de protección cm	Distancia de oper. mm	Energía incidente J/cm <sup>2</sup>	Categoría
Nodo	ND4 RD1	19.308	62.188	460	9.138	1
Nodo	ND5 RD2	18.779	61.26	460	8.868	1
Nodo	ND5 RD1	15.439	55.106	460	7.176	0
Nodo	ND7 RD1	11.337	46.636	460	5.139	0
Nodo	ND6 RD1	13.112	50.449	460	6.014	0
Nodo	ND6 RD2	15.274	54.788	460	7.093	0
Nodo	ND8 RD2	9.739	42.958	460	4.361	0
Nodo	ND7 RD2	13.495	51.241	460	6.204	0

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

#### 4.2. Desarrollo y análisis del cálculo de arco eléctrico

Para el cálculo de la corriente de arco eléctrico, la energía incidente esperada y la determinación de la distancia de protección contra arco eléctrico, se utiliza la metodología establecida en la norma IEEE 1584, descrita en el capítulo 1 del presente trabajo; por lo cual es importante conocer la corriente de falla de cortocircuito trifásica, voltaje del sistema, distancia entre conductores, entre otros.

Para determinar la corriente de arco eléctrico estimada, en los nodos de 4,16 kV, se utiliza la ecuación para instalaciones eléctricas mayores o iguales a 1 kV, para lo cual es necesario conocer la corriente de falla de cortocircuito trifásica. Por lo anterior, se utilizarán las corrientes de falla de cortocircuito trifásica determinadas en la Tabla XXII, las cuales fueron determinadas con el estudio de cortocircuito.

$$lgI_a = 0,00402 + 0,983lg(35,094kA)$$

$$I_a = 33.3414 \text{ kA}$$

Lo anterior es la determinación de la corriente de arco eléctrico para el nodo identificado con el nombre ND2 RD1. Como se observa, el resultado de corriente de arco es de aproximadamente 33,3414 kA. Este resultado se comparó con el obtenido mediante el *software* y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XXV. **Comparación de resultados de corriente de arco eléctrico**

Nodo en falla	Vn kV	Iarc Software kA	Iarc Calculado kA	Diferencia kA
ND2 RD1	4,16	33,341	33,341	0,000
ND3 RD1	4,16	32,658	32,658	0,000
ND3 RD2	4,16	23,7	23,436	0,264
ND4 RD2	4,16	23,665	23,402	0,263
ND4 RD1	0,48	19,308	21,974	2,666
ND5 RD2	0,48	18,779	21,230	2,451
ND5 RD1	0,48	15,439	17,570	2,131
ND7 RD1	0,48	11,337	12,902	1,565
ND6 RD1	0,48	13,112	14,921	1,809
ND6 RD2	0,48	15,274	17,299	2,025
ND8 RD2	0,48	9,739	11,055	1,316
ND7 RD2	0,48	13,495	15,294	1,799

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Como se muestra en la tabla anterior, para los nodos con nivel de tensión de 4,16 kV, la diferencia entre el valor de corriente de arco eléctrico determinado por el *software* y la corriente de arco determinada mediante ecuación, no son significativas; sin embargo, para los nodos con tensión de 0,48 kV se observa que la diferencia entre las metodologías de cálculo son poco significativas, en el mayor de los casos la diferencia es de 2,666 kA.

Con los datos de corriente de arco eléctrico, se procede a calcular la energía incidente normalizada para todos los nodos bajo análisis, lo cual se realizará mediante la ecuación descrita en el capítulo 1.

Según lo anterior y para determinar la energía normalizada en el nodo con nombre ND2 RD1, se evalúa la siguiente ecuación:

$$\lg E_n = (-0.792) + (-0.113) + 1.081 \lg(33.3414 \text{ kA}) + 0.0011(102)$$

$$E_n = 7.1374916 \text{ J/cm}^2$$

Con el dato de la energía normalizada, para todos los nodos bajo análisis, se procede a determinar la energía incidente la cual se evalúa con la siguiente ecuación:

$$E = 4.18 * 1 * 7.137 \text{ J/cm}^2 \left( \frac{0.08}{0.2} \right) \left( \frac{610^2}{460^2} \right)$$

$$E = 20.9858174 \text{ J/cm}^2$$

Tabla XXVI. **Comparación de resultados de energía incidente**

Nodo en Falla	Vn kV	Energía incidente Software J/cm2	Energía incidente Calculada J/cm2	Diferencia J/cm2
ND2 RD1	4.16	21.006	20.986	0.0202
ND3 RD1	4.16	20.541	20.521	0.0200
ND3 RD2	4.16	14.524	14.336	0.1881
ND4 RD2	4.16	14.501	14.314	0.1875
ND4 RD1	0.48	9.138	9.048	0.0897

Continuación tabla XXVI.

ND5 RD2	0.48	8.868	8.718	0.1504
ND5 RD1	0.48	7.176	7.105	0.0713
ND7 RD1	0.48	5.139	5.088	0.0508
ND6 RD1	0.48	6.014	5.954	0.0595
ND6 RD2	0.48	7.093	6.986	0.1068
ND8 RD2	0.48	4.361	4.306	0.0554
ND7 RD2	0.48	6.204	6.116	0.0885

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

En la tabla anterior se muestran los resultados de energía incidente obtenidos mediante el *software* y los resultados obtenidos mediante el cálculo según la norma; de lo anterior se observa que la diferencia entre ambos resultados es poco significativa, en el mayor de los casos de 0,1881 J/cm<sup>2</sup>.

Lo último, es determinar la distancia de frontera de protección contra el arco eléctrico la cual se evalúa, para los nodos de análisis, con la siguiente ecuación:

$$D_b = \left[ 4.184 * 1 * 33.341^{(0.08/0.2)} \left( 610^2 / 5 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$D_b = 94.263 \text{ cm}$$

La evaluación anterior corresponde para el nodo ND2 RD1; con la ecuación empírica determinada en la norma, se analizó el resultado obtenido mediante el *software*, y el calculado, y se puede observar poca diferencia entre ambos resultados, siendo en el mayor de los casos de 6,642 cm. Lo anterior se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla XXVII. **Comparación de resultados de la distancia límite de protección de arco eléctrico**

Nodo en falla	Vn kV	Límites de protección <i>software</i> cm	Límites de protección calculado cm	Diferencia cm
ND2 RD1	4.16	94.285	94.263	0.022
ND3 RD1	4.16	93.236	93.213	0.023
ND3 RD2	4.16	78.4	77.909	0.491
ND4 RD2	4.16	78.339	77.848	0.491
ND4 RD1	0.48	62.188	68.830	6.642
ND5 RD2	0.48	61.26	67.112	5.852
ND5 RD1	0.48	55.106	58.409	3.303
ND7 RD1	0.48	46.636	46.565	0.071
ND6 RD1	0.48	50.449	51.809	1.360
ND6 RD2	0.48	54.788	57.746	2.958
ND8 RD2	0.48	42.958	41.574	1.384
ND7 RD2	0.48	51.241	52.756	1.515

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

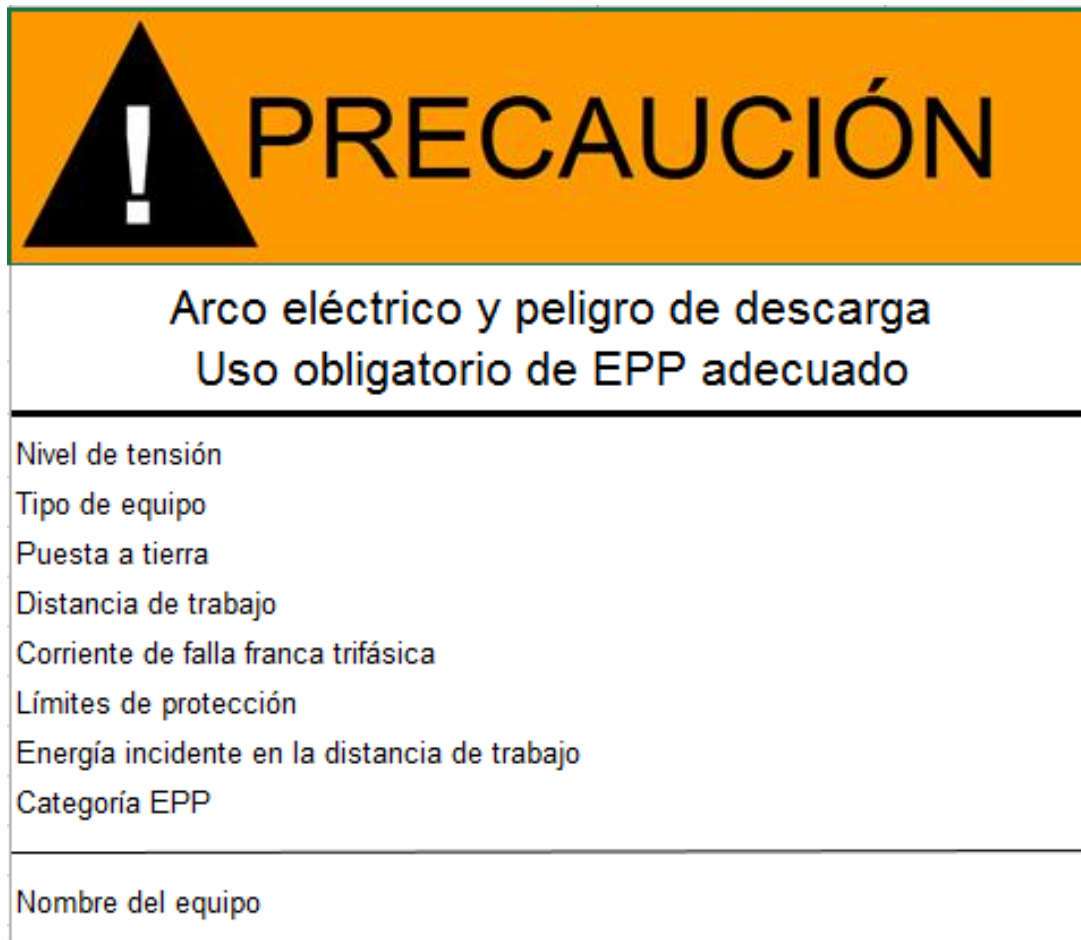
#### 4.3. Aplicación de los resultados

Posterior a realizar el estudio de arco eléctrico, es importante identificar los lugares (nodos, equipos, entre otros) que se encuentren bajo riesgo de arco eléctrico. Por lo anterior, es necesario la elaboración de señales / etiquetas que determinen el riesgo de arco eléctrico en las instalaciones industriales.

En la imagen siguiente se muestra el diseño de una etiqueta identificadora de riesgo de arco eléctrico.



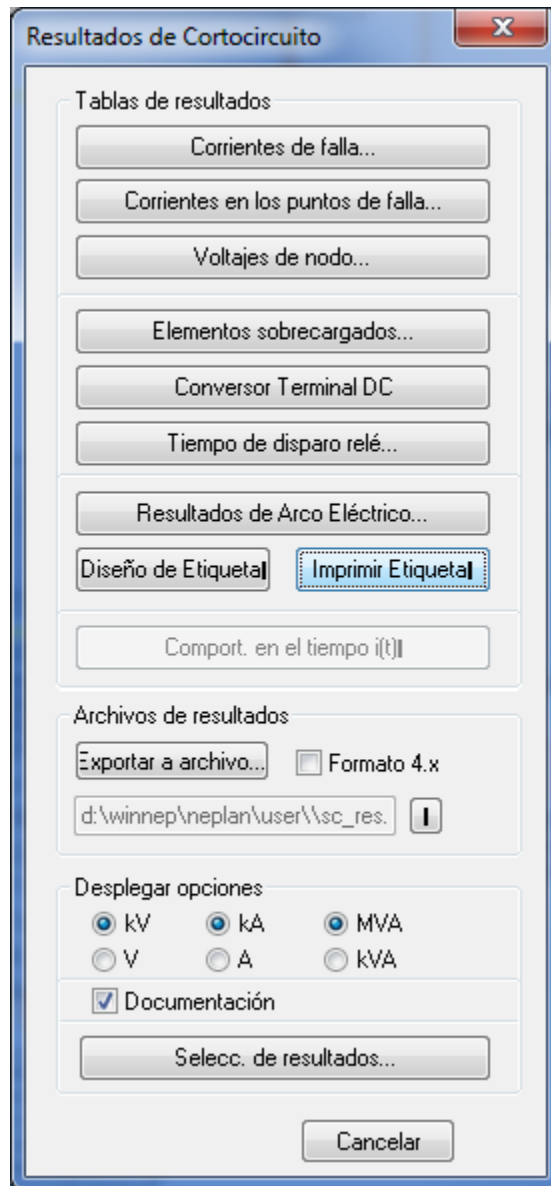
Figura 49. Etiqueta identificadora de riesgo de arco eléctrico



Fuente: elaboración propia.

Debido a lo anterior, se procede a la realización de las etiquetas identificadoras de riesgo de arco eléctrico para el escenario bajo análisis; para lo cual se utilizará la opción “imprimir etiqueta” del *software*, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 50. Imprimir etiquetas de riesgo de arco eléctrico




Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

Al momento de seleccionar la opción "imprimir etiquetas", el *software* abre una hoja de excel en la cual se imprimen todas las etiquetas, de los nodos seleccionados, de riesgo de arco eléctrico. Es importante destacar que estas

etiquetas pueden variar según el estilo que elija el consultor. En la figura siguiente se observa la etiqueta de riesgo de arco eléctrico correspondiente al escenario bajo análisis.

Figura 51. **Etiquetas de riesgo de arco eléctrico**

	A	B	C
1			
2	<b>PRECAUCIÓN</b>		
3	Arco eléctrico y peligro de descarga		
4	Uso obligatorio de EPP adecuado		
5	Nivel de tensión	4.16 kV	
6	Tipo de equipo	Exterior	
7	Puesta a tierra	Puesto a tierra	
8	Distancia de trabajo	460.0 mm	
9	Corriente de falla franca trifásica	35.094 kA	
10	Límites de protección	94.285 cm	
11	Energía incidente en la distancia de trabajo	21.006 J/cm <sup>2</sup>	
12	Categoría EPP		2
13			
14	Nombre del Equipo	ND2 RD1	
15			
16		08.22.2016	
17			
18			
19			

Fuente: elaboración propia utilizando el *software* NEPLAN.

## CONCLUSIONES

1. La elaboración de estudios de arco eléctrico tiene por finalidad proteger, a personas e instalaciones contra descargas eléctricas, explosiones y quemaduras; además, reducir el riesgo de arco eléctrico debido a una falla en la instalación eléctrica industrial.
2. El arco eléctrico es un riesgo causante de quemaduras, desmembramiento, electrocución y muerte; y la pérdida total de los equipos. El incorrecto dimensionamiento de protecciones y los accidentes causados por equipo energizado en movimiento son las causas más comunes por las cuales se generan arcos eléctricos en instalaciones industriales. Por lo anterior, es importante que estos equipos y los paneles que resguardan a los equipos de protección estén debidamente señalizados para advertir a las personas el riesgo de la descarga de arco eléctrico.
3. Los procedimientos y criterios descritos para realizar los estudios de arco eléctrico, mediante normativas, son de vital importancia ya que es necesario entender todas las variantes de entrada y salida de las ecuaciones de corriente de arco eléctrico, energía incidente y distancia de protección contra el arco eléctrico. La correcta interpretación de dichas variantes y el criterio para definir sus valores permiten garantizar la protección de las personas y de los equipos en la industria, ante el riesgo de arco eléctrico.

4. Los procedimientos y herramientas descritos para la elaboración de los estudios eléctricos son los más esenciales y básicos. Dichos procedimientos, además, son los adecuados teniendo en cuenta que fueron definidos para resolver y ejemplificar una guía concisa para el análisis de riesgo de arco eléctrico en una instalación industrial.
5. Para la validación y evaluación de la confiabilidad de los resultados del estudio de arco eléctrico se realizó un cálculo manual mediante la metodología descrita en la normativa IEEE 1584. De lo anterior, se pudo observar que de la comparación de los resultados de la corriente de arco eléctrico y de la energía incidente, entre ambas metodologías de resolución, la diferencia fue poco significativa. En el caso de la distancia límite de protección contra el arco eléctrico, la diferencia más significativa fue de aproximadamente 6,642 cm entre ambos métodos de resolución lo cual es poco considerable.
6. De la comparación de los resultados obtenidos mediante *software* y cálculo manual, se determina que los resultados de ambas metodologías son bastante parecidos; por lo cual los resultados obtenidos mediante el *software* son confiables.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar una serie de capacitaciones al personal con la finalidad de dar a conocer los peligros por arco eléctrico y proveer, a los mismos, de todo el equipo de protección personal necesario para garantizar el mínimo de accidentes por arco eléctrico.
2. Realizar nuevamente el estudio de arco eléctrico cuando se cambie la topología de la red, de la instalación industrial o cuando se adicione nuevos equipos en dicha instalación; lo anterior, con el fin de determinar los nuevos valores de corriente de arco eléctrico, energía incidente y, si es necesario, modificar el equipo de protección personal que se debe de utilizar en cada punto de riesgo de arco eléctrico.
3. Es trascendentalmente importante promover la realización de estudios de arco eléctrico para determinar los lugares y equipos con riesgo de generar un arco eléctrico. A partir de dichos estudios, es posible garantizar la seguridad de las personas que trabajan en una instalación industrial lo cual promueve una mayor eficiencia laboral en la misma industria.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CERVANTES MARTINEZ, Sebastian; VILLEGAS FRANCO, Jorge. *Coordinación de Protecciones de la red eléctrica de la ESIME Zacatenango*. Trabajo de graduación de ing. electricista. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, 2009. pp 69.
2. DAVIS, Chet; PIERRE, Conrad; CASTOR, David; LUO, Rober; SHRESTHA, Satish. *Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards*. Estados Unidos: ESA, Inc., 2003 pp 133.
3. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. México: Limusa Noriega, 2003. pp 520.
4. FOWLER, Thakkeus; MILES, Karen. *Seguridad eléctrica, salud y seguridad para los oficios eléctricos*. Estados Unidos: Instituto Nacional para la Seguridad Ocupacional (NIOSH), 2009. pp 82.
5. GARCÍA YOL, Abner Enmanule. *Evaluación de cortocircuito de un sistema eléctrico de potencia industrial*. Trabajo de graduación de ingeniero electricista. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2014. pp 92.
6. METZ-NOBLAT, Bonoit; DUMES, Frédéric; THOMASSET, Georges. *Cuaderno técnico No. 158, cálculo de corrientes de cortocircuito*. Estados Unidos: Schneider Electric, 2000. pp 38.



7. *NFPA. Standard for Electrical Safety in the Workplace, NFPA 70E, 2015 Edition.* Estados Unidos: NFPA. pp 97.
  
8. PIERRE, Conrad; SHRESTHA, Satish; MAJAD, Afshin; CASTOR, David; LUO, Robert; KOCH, Mike. *Practical Solution Guide To Arc Flash Hazards. 2.* Estados Unidos: EasyPower, LLC, 2015. pp 138.

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Datos de motores

Nombre	Pr HP	Sr MVA	Vr kV	Ir kA	Ia /Ir	Pares de polos	cosphi	Ma/Mr	Mk/Mr	Rm Ohm	H s	R1 /Zr	X1 /Zr	Zr Ohm
MT 1-1000	1000	0.9	4.2	0.123	6	2	0.0687	0.9	0.9	0.29	0.3	-0.01	0.079	19.46
MT 17-40	40	0	0.5	0.044	6	2	0.1366	2.1	2.3	0.08	0	-0.03	0.083	6.29
MT 16-200	200	0.2	0.5	0.215	6	2	0.0866	1.8	0	0.02	0	-0.03	0.083	1.287
MT 15-400	400	0.4	0.5	0.429	6	2	0.0591	1.7	2.2	0.01	0	-0.03	0.083	0.646
MT 14-500	500	0.4	0.5	0.529	6	3	0.0512	1.8	2.7	0	0.2	-0.03	0.083	0.524
MT 12-850	850	0.8	4.2	0.105	6	3	0.134	0.7	1.2	0.83	0.1	0.01	0.083	22.79
MT 13-1200	1200	1.1	4.2	0.148	6	2	0.0381	0.9	0.9	0.1	0.2	-0.02	0.083	16.21
MT 23-50	50	0.1	0.5	0.055	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	5.032
MT 6-100	100	0.1	0.5	0.11	6	2	0.1168	1.8	2	0.05	0	-0.02	0.083	2.516
MT 5-300	300	0.3	0.5	0.323	6	2	0.0698	2	2.2	0.01	0	-0.04	0.083	0.859
MT 4-350	350	0.3	0.5	0.378	6	2	0.064	1.4	2	0.01	0.3	-0.02	0.083	0.734
MT 3-200	200	0.2	0.5	0.215	6	2	0.2	1.8	2.5	0.04	0	-0.01	0.083	1.287
MT 2-850	850	0.8	4.2	0.11	6	2	0.0971	0.9	1	0.62	0.2	0	0.082	21.94
MT 8-40	40	0	0.5	0.044	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	6.29
MT 7-40	40	0	0.5	0.044	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	6.29
MT 22-25	25	0	0.5	0.028	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	10.06
MT 21-25	25	0	0.5	0.028	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	10.06
MT 20-25	25	0	0.5	0.028	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	10.06
MT 19-25	25	0	0.5	0.028	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	10.06
MT 18-25	25	0	0.5	0.028	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	10.06
MT 11-40	40	0	0.5	0.044	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	6.29
MT 10-40	40	0	0.5	0.044	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	6.29
MT 9-40	40	0	0.5	0.044	6	2	0.3	2.1	0	0	0	0	0.079	6.29

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Datos de cables

Nombre	Tipo	Longitud		Número	R(1)		X(1)		C(1)		B(1)		R(0)		X(0)		C(0)		I <sub>r</sub> máx(alta)
		km	ud		Ohm/k m	Ohm/k m	uF/km	uF/km	uS/km	Ohm/k m	Ohm/k m	uF/km	uF/km	Ohm/k m	Ohm/k m	uF/km	uF/km	A	
CB1 RD1	1000 XLPE 8 kV	0.001		1	0.0623	0.163	0.632	238.1	0.7174	0.277	0.632	655							655
CB2 RD1	1000 XLPE 8 kV	0.01		1	0.0623	0.163	0.632	238.1	0.7174	0.277	0.632	655							655
CB1 RD2	N2XSY 1X400	1.5		1	0.055	0.098	0.558	210.4	1	1	0.558	900							900
CB5 RD1	1000 MCM 600V	0.032		1	0.0571	0.1509	0	0	0.779	0.316	0	590							590
CB6 RD1	1000 MCM 600V	0.015		1	0.0571	0.1509	0	0	0.779	0.316	0	590							590
CB4 RD1	1000 MCM 600V	0.015		1	0.0571	0.1509	0	0	0.779	0.316	0	590							590
CB4 RD2	1000 XLPE 8 kV	0.03		1	0.0623	0.163	0.632	238.1	0.7174	0.277	0.632	655							655
CB5 RD2	1000 MCM 600V	0.05		2	0.015	0.1	0	0	0.5	0.316	0	700							700
CB7 RD2	1000 MCM 600V	0.01		1	0.0571	0.1509	0	0	0.779	0.316	0	590							590
CB3 RD2	1000 XLPE 8 kV	0.001		1	0.0623	0.163	0.632	238.1	0.7174	0.277	0.632	655							655
CB2 RD2	N2XSY 1X400	0.001		1	0.054	0.105	0.368	138.7	1	1	0.367	674							674
CB3 RD1	1000 XLPE 8 kV	0.001		1	0.0623	0.163	0.632	238.1	0.7174	0.277	0.632	655							655
CB6 RD2	1000 MCM 600V	0.05		1	0.0571	0.1509	0	0	0.779	0.316	0	590							590

Fuente: elaboración propia.