



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Mitigación del riesgo de arco eléctrico mediante protecciones adaptables en sistemas eléctricos industriales

César Augusto Agudelo Osorio

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática
Medellín, Colombia

2017

Mitigación del riesgo de arco eléctrico mediante protecciones adaptables en sistemas eléctricos industriales

César Augusto Agudelo Osorio

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D., MSc, Ernesto Pérez González

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática
Medellín, Colombia

2017

A mi familia, son lo más maravilloso de mi vida.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la extraordinaria vida que me ha dado.

A todas las personas que me apoyaron con su comprensión y paciencia.

A la Universidad Nacional, en especial a Ernesto por su acompañamiento y calidad humana.

A mis compañeros de Ingetesa por su apoyo.

A mi familia que me respalda y anima para alcanzar todas las metas que me he propuesto en la vida.

Resumen

Este trabajo presenta una metodología para disminuir la severidad de los accidentes por arco eléctrico en instalaciones industriales mediante la implementación de sistemas de protecciones de sobrecorriente adaptables. Se propone aprovechar las capacidades disponibles en los relés típicamente utilizados a nivel industrial, específicamente los grupos de ajuste, con el fin de permitir la adaptación de las protecciones a las condiciones cambiantes del sistema, tales como transferencias de barra, arranque de motores y operación con generadores de emergencia, con el objetivo final de disminuir los tiempos de despeje de falla y de esta forma disminuir la energía incidente. Mediante la aplicación de la metodología propuesta a un caso de estudio simulado en el programa ETAP, se pudo evidenciar que es posible reducir el riesgo por arco eléctrico al aplicar un esquema adaptable como el propuesto. Las industrias que busquen mejorar las condiciones de seguridad frente a arco eléctrico pueden encontrar en la metodología propuesta una herramienta útil que contribuye a explotar las capacidades de los relés que típicamente utilizan tanto en plantas nuevas como existentes, mitigando de esta forma los efectos de los accidentes por arco eléctrico, los cuales pueden producir quemaduras y lesiones graves en las personas expuestas, siendo potencialmente fatales y altamente destructivos para los equipos.

Palabras clave: arco eléctrico, protecciones de sobrecorriente, relés digitales, energía incidente, protecciones adaptables.

Abstract

A methodology to reduce arc flash hazards in industrial facilities through the implementation of adaptive overcurrent protection systems is presented in this document. It is proposed to take advantage of the available relay functions commonly used at industries, specifically the setting groups, to allow the adaptation of the protections to the changing conditions of the system, such as bus transfer, motor starting and operation with emergency generators, This strategy is aimed to reduce the fault clearing times and therefore, the incident energy. By applying the proposed methodology to a study case simulated in ETAP software, it was noted that it is possible to reduce arc flash hazard when applying an adaptive scheme such as the one proposed. Industries that seek to improve safety conditions against arc flash events may find in the proposed methodology an useful tool that contributes to exploit the functions of the relays that typically use both new and existing plants, mitigating in this way the effects of arc flash accidents, which could cause burns and serious injuries in exposed personnel, being potentially fatal and highly destructive for equipment.

Keywords: arc flash, overcurrent protection, digital relay, incident energy, adaptive protections.

B. Anexo: Ajuste de los relés de protección	73
C. Anexo: Ajuste de los interruptores de baja tensión	76
D. Anexo: Características de los fusibles	81
E. Anexo: Resumen de flujo de carga	82
F. Anexo: Resumen de cortocircuito.....	88
G. Anexo: Curvas tiempo-corriente	91
H. Anexo: Energías incidentes	99
Bibliografía	107

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Medidas de protección frente a arco eléctrico, tomada de [13].	10
Figura 2-1: Parámetros ajustables protecciones 50/51.	19
Figura 2-2: Curvas típicas para protección de transformadores.	21
Figura 2-3: Curvas tiempo-corriente típicas para protección de alimentadores.	24
Figura 2-4: Característica de protección completa por sobrecorriente, tomada de [22].	25
Figura 3-1: Flujograma de evaluación.	28
Figura 3-2: Flujograma cálculos arco eléctrico.	30
Figura 3-3: Unifilar ejemplo de adaptación.	33
Figura 3-4: Curva tiempo corriente estado inicial ejemplo de adaptación.	33
Figura 3-5: Curva tiempo corriente estado final ejemplo de adaptación.	34
Figura 3-6: Distribución inicial de la energía incidente.	36
Figura 3-7: Distribución final de la energía incidente.	36
Figura 3-8: Arquitectura control del esquema adaptable.	39
Figura 3-9: Lógica de activación grupo de ajuste.	40
Figura 3-10: Grupos de ajustes relé Multilin F60.	41
Figura 4-1: Diagrama unifilar del caso de estudio.	46
Figura 4-2: Diagrama unifilar del caso de estudio Escenario 2.	47
Figura 4-3: Diagrama unifilar del caso de estudio Escenario 3.	48
Figura 4-4: Distribución inicial de la energía incidente del Escenario 1.	51
Figura 4-5: Distribución inicial de la energía incidente del Escenario 2.	51
Figura 4-6: Distribución inicial de la energía incidente del Escenario 3.	52
Figura 4-7: Fusible protección transformador T_05.	53
Figura 4-8: Tiempos de despeje con grupos 1 y 2.	55
Figura 4-9: Tiempos de despeje con grupos 1 y 3.	56
Figura 4-10: Distribución inicial de la energía incidente E1-G1.	58
Figura 4-11: Distribución final de la energía incidente E1-G2.	58
Figura 4-12: Distribución inicial de la energía incidente E2-G1.	59
Figura 4-13: Distribución final de la energía incidente E2-G2.	59
Figura 4-14: Distribución inicial de la energía incidente E3-G1.	59
Figura 4-15: Distribución inicial de la energía incidente E3-G2.	59
Figura 4-16: Distribución inicial de la energía incidente E3-G3.	60

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Estadísticas de accidentes por arco eléctrico [6].	5
Tabla 1-2: Limitaciones de los métodos de cálculo del riesgo por arco eléctrico [6].	7
Tabla 1-3: Factor de tensión y clase de equipos (Tabla 4 de [1]).	8
Tabla 1-4: EPP acorde con NFPA 70E (Adaptada de [2]).	10
Tabla 2-1: Relés de protección.	13
Tabla 2-2: Parámetros típicos ajustables de una protección de sobrecorriente.	19
Tabla 2-3: Factores α y K en curvas IEC.	20
Tabla 2-4: Factores α , β y K en curvas ANSI/IEEE.	20
Tabla 2-5: Corriente continua mínima permitida para fusibles de potencia clase R [26].	27
Tabla 3-1: Rangos energía incidente.	29
Tabla 3-2: Variables estado inicial ejemplo de adaptación.	33
Tabla 3-3: Variables estado final ejemplo de adaptación.	34
Tabla 3-4: Grupos de ajuste ejemplo de adaptación.	35
Tabla 3-5: Condiciones y bloqueo ejemplo de adaptación.	35
Tabla 3-6: Comparación energía incidente estado inicial y final.	35
Tabla 3-7: Tensiones nominales típicas en motores.	37
Tabla 4-1: Energías incidentes grupo de ajustes 1.	50
Tabla 4-2: Rangos de energía incidente grupo 1.	51
Tabla 4-3: Criterios de ajuste grupo 2.	55
Tabla 4-4: Criterios de ajuste grupo 3.	57
Tabla 4-5: Condiciones de activación y bloqueo.	57
Tabla 4-6: Rangos de energía incidente Escenario 1 (E1).	58
Tabla 4-7: Rangos de energía incidente Escenario 2 (E2).	58
Tabla 4-8: Rangos de energía incidente Escenario 3 (E3).	59
Tabla 4-9: Energía incidente para todos los escenarios y grupos de ajuste.	60
Tabla 4-10: Indicador de energía incidente del sistema.	63

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
C_f	Factor de cálculo	1	1.0, para $V > 1kV$ 1.5, para $V \leq 1kV$
D	Distancia del posible punto de arco a la persona	mm	
E	Energía incidente	J/cm ²	Ec. (1.3)
E_n	Energía incidente normalizada	J/cm ²	Ec. (1.4)
EPP	Elementos de Protección Personal	1	
$E_{pr}(i)$	Energía promedio dentro de la categoría de riesgo i	cal/cm ²	Columna 2 de la Tabla 4-10
G	Distancia entre conductores	mm	Tabla 1-3
I	Corriente de falla vista por el relé	A	
I_a	Corriente de arco	kA	Ec. (1.1) y (1.2)
I_{bf}	Corriente de falla trifásica simétrica RMS	kA	
I_s	Ajuste de corriente de disparo		
IE_s	Indicador de energía incidente del sistema	cal/cm ²	Ec. (4.1)
K	Coeficiente	1	-0.153, abiertas -0.097, en caja
K	Constante para cada tipo de curva	1	Tabla 2-3 y Tabla 2-4
K_1	Coeficiente	1	-0.792, abiertas -0.555, cerradas
K_2	Coeficiente	1	0, no aterrizado -0.113, aterrizado
$Neq(i)$	Número de equipos en la categoría de riesgo i	1	Ec. (4.1)
N_{teq}	Número total de equipos de la instalación	1	Ec. (4.1)
t	Tiempo de disparo	s	
t_a	Tiempo de arco	s	
TD	Ajuste de tiempo (multiplicador)	1	
TMS	Ajuste de tiempo (multiplicador)	1	
V	Tensión del sistema	kV	
x	Exponente de distancia	1	Tabla 1-3

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Constante para cada tipo de curva	1	Tabla 2-3 y Tabla 2-4
β	Constante para cada tipo de curva	1	Tabla 2-4

Introducción

El arco eléctrico es un evento accidental ocasionado por el paso de la corriente a través del aire, generando plasma, el cual alcanza temperaturas hasta de 20.000 °C [1] acompañadas de ondas de presión, que conjuntamente pueden producir quemaduras y lesiones graves en las personas expuestas. Normalmente la corriente eléctrica fluye por un sistema de conductores aislados, diseñados para evitar que grandes flujos de corriente pasen por el aire, sin embargo, ante eventos tales como sobretensiones, contactos no intencionales, capacidades de interrupción superadas en equipos de corte, daño en el aislamiento, entre otros, puede generarse el paso no deseado de corriente eléctrica a través del aire ionizado.

Debido a la severidad del fenómeno de arco eléctrico hay un interés mundial en el control del riesgo, lo cual se ha reflejado en la generación de normas para la cuantificación de las variables involucradas en él y para la selección de equipos de protección personal [1], [2]. A nivel local el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), de obligatorio cumplimiento en Colombia según lo dispuesto en la resolución 90708 de 2013 [3], establece en su artículo 13.4 que es requisito que en toda instalación se realice un estudio con el fin de determinar el valor de la energía incidente liberada por arcos eléctricos accidentales y seleccionar el equipo de protección personal para proteger adecuadamente a las personas expuestas.

Aunque desde un punto de vista legal en Colombia es suficiente con cuantificar el riesgo y seleccionar el equipo de protección personal, un estudio serio no se debe limitar a estos dos puntos, debe trascender y buscar la disminución del riesgo hasta niveles que faciliten su control y reduzcan los requerimientos de equipos de protección personal [4], facilitando la implementación de las medidas de protección y permitiendo que los trabajadores se acoplen de una mejor manera a la cultura de la seguridad. Para energías incidentes altas los equipos de protección personal son trajes robustos, los cuales son comparados por los trabajadores eléctricos con trajes de “astronautas”, debido a su baja ergonomía, derivada

de su peso y del aumento de la temperatura que se genera dentro de ellos en su uso normal, resultando en muchos casos en que los trabajadores prefieran exponerse al riesgo que utilizar estos equipos.

El tiempo de exposición al arco es una de las variables fundamentales asociadas con la severidad de las lesiones [4], sin embargo, al realizar los estudios de coordinación de protecciones a nivel industrial, no se da en todos los casos prioridad a la reducción de estos tiempos, debido que en buena parte los criterios de ajuste se basan en conceptos de la era de los relés electromecánicos [5], los cuales siguen siendo válidos desde un punto de vista técnico para proteger por sobrecorriente a los equipos, pero resultan deficientes frente a la protección de las personas y los mismos equipos frente al arco eléctrico. Dentro de los criterios mencionados se encuentran los utilizados para evitar que la corriente demandada por el arranque directo de un motor dispare indeseadamente las protecciones, lo cual implica que el ajuste de los relés se eleve permanentemente para cubrir un evento controlado, que dura unos pocos segundos. Durante la operación de una planta industrial pueden presentarse cambios topológicos en el sistema eléctrico que implican a su vez cambios en las corrientes de falla que pueden afectar los tiempos de operación de las protecciones de sobrecorriente y con esto provocar un aumento del riesgo por arco eléctrico sin que los criterios convencionales de protección aportes a la corrección de este problema.

En las últimas décadas se ha presentado una transformación en los relés, los cuales se basan ahora en electrónica y tienen múltiples posibilidades de ajuste y comunicación. Los relés digitales modernos son ampliamente utilizados en el sector industrial pero sin explotar todo su potencial para la mitigación del riesgo por arco eléctrico, lo cual motiva la elaboración del presente trabajo con los siguientes objetivos.

OBJETIVO GENERAL: Establecer una estrategia que permita aprovechar las ventajas de los relés digitales para disminuir la severidad de los arcos eléctricos en instalaciones industriales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar los relés utilizados a nivel industrial para protección de alimentadores, motores y transformadores, así como sus capacidades y los criterios de protección aplicables para su ajuste.
- Desarrollar una metodología de automatización que permita modificar los ajustes de los relés para mejorar los tiempos de disparo de las protecciones ante cambios de operación del sistema.
- Evaluar el efecto de la metodología propuesta sobre la energía incidente por arco eléctrico en un caso industrial simulado.

En la primera parte del trabajo se presentan algunas generalidades del fenómeno del arco eléctrico y los cálculos asociados con la energía incidente, luego se identifican los relés utilizados a nivel industrial para protección de alimentadores, motores y transformadores, así como sus capacidades y los criterios de protección aplicables para su ajuste.

Luego se plantea una metodología que permite evaluar la pertinencia de un esquema de protección adaptable con base en el estudio de las energías incidentes obtenidas con los ajustes tradicionales, igualmente se proponen alternativas para definir los nuevos ajustes, verificar la efectividad del esquema y estudiar la capacidad de adaptación e implementación en una instalación en particular, finalmente, la metodología establece pautas aplicables durante el proceso de implementación. La estrategia de protección propuesta no aplica a todo tipo de instalación, por lo cual el alcance está acotado a instalaciones industriales que cuenten con motores de media tensión, debido a que en este tipo de instalaciones se cuenta normalmente con relés que tienen las capacidades de adaptación requeridas para la aplicación de la metodología propuesta.

Si bien los relés actuales tienen múltiples posibilidades de configuración y adaptación, se propone trabajar con los grupos de ajuste, característica con la cual se pueden aprovechar capacidades normalmente disponibles en las empresas, con el fin de disminuir los costos de implementación, facilitando además el entrenamiento del personal, la operación y el mantenimiento del sistema, permitiendo además que el esquema sea aplicado tanto a instalaciones nuevas como existentes.

Finalmente se desarrolla un caso de estudio teórico con el fin de aplicar la metodología propuesta en un sistema industrial simulado, utilizando para tal fin el software ETAP®. El sistema seleccionado tiene características comunes con algunos referentes normativos y representa situaciones presentes en instalaciones industriales existentes, lo cual permite observar resultados que se podrían encontrar en la realidad. En los anexos se encuentran las características técnicas de los equipos, ajustes de las protecciones y resultados detallados asociados con el caso del estudio.

1 Fenómeno del arco eléctrico

A continuación se presenta aspectos relevantes asociados con el arco eléctrico, incluyendo las principales causas de los accidentes, sus efectos, los cálculos para determinar la corriente de arco y la energía incidente y finalmente las medidas de protección que se pueden tomar para disminuir el riesgo.

1.1 Importancia del arco eléctrico

Los accidentes por arco eléctrico se presentan en la mayoría de los casos cuando conductores eléctricos o partes de circuito energizadas de un equipo se encuentran expuestas, en condiciones en las cuales existe la posibilidad de que una persona interactúe con ellas generando un arco. Durante la operación normal, los equipos energizados, que han sido instalados y mantenidos adecuadamente, no deben representar un riesgo de arco eléctrico importante [2]. La Tabla 1-1 muestra los porcentajes de ocurrencia de los accidentes por arco eléctrico, reforzando el hecho de que la fuente principal de los accidentes se debe a la manipulación de los equipos por parte de los operarios.

Tabla 1-1: Estadísticas de accidentes por arco eléctrico [6].

Ocurrencia de accidente	Porcentaje
Operario trabajando con las puertas del equipo abiertas	65
Trabajador frente a una puerta cerrada y el equipo no es resistente al arco	10
Trabajador no está presente y el equipo no es resistente al arco	25

En el 75% de los casos los accidentes por arco eléctrico se generan con la presencia de personas, lo cual es riesgoso dado que la energía incidente generada en estos eventos es

alta. De acuerdo con la norma NFPA 70E [2] la Energía Incidente (E) se define como la cantidad de energía térmica proyectada sobre una superficie, ubicada a una cierta distancia de la fuente generadora durante un evento de arco eléctrico, generalmente expresada en calorías sobre centímetro cuadrado (cal/cm^2) o en unidades del SI en J/cm^2 .

El fenómeno del arco eléctrico se caracteriza por generar diferentes efectos en el momento en el que ocurre [6]:

- Temperatura: se generan altas energías térmicas (hasta 35000 °F) que pueden provocar quemaduras graves a las personas que se encuentren cerca al lugar de incidencia del arco.
- Ruido: un arco eléctrico puede emitir sonidos con intensidades de hasta 165 dB, que pueden generar sordera temporal o permanente.
- Onda de presión: el fenómeno del arco eléctrico genera unas ondas de presión capaces de empujar a las personas involucradas a varios metros, ocasionando lesiones físicas.
- Luz intensa: la intensidad de la luz durante el arco eléctrico puede generar molestias a la vista y hasta la ceguera.
- Metales proyectados: estos materiales de los equipos dañados por el arco, pueden provocar daños físicos a las personas.
- Vapores y gases tóxicos: durante los accidentes por arco eléctrico la temperatura dentro del tablero se acerca a la del arco, por lo cual todos los metales y materiales aislantes sufren erosión, pueden derretirse y evaporarse, produciendo humos tóxicos y metal en estado gaseoso.

La ocurrencia de este fenómeno cuando no se tienen medidas de protección genera costos altos [7], asociados con la asistencia médica por las diferentes lesiones que puedan haber sufrido las personas involucradas en el accidente y los daños materiales, dichos costos se elevan en promedio a 57 mil dólares por persona en el año 2014 [7]; lo cual se suma a las posibles pérdidas económicas debidas a la interrupción de la producción o servicios de la compañía donde ocurra. Por lo tanto, para prevenir o mitigar los problemas que conlleva la ocurrencia de un arco eléctrico (tales como pérdidas humanas y/o económicas), es importante cuantificar el riesgo e implementar medidas de seguridad efectivas, para lo cual pueden seguirse los lineamientos presentados en los numerales 1.2 y 1.3.

1.2 Cálculos asociados con el arco eléctrico

Para el análisis del riesgo de arco eléctrico, deben realizarse en primera instancia los estudios de cortocircuito y de coordinación de protecciones. Las metodologías para realizar estos estudios se encuentran consignadas en la norma IEEE Std. 141 [8] y en la norma IEEE Std. 242 [9]. Los resultados del estudio de riesgo por arco eléctrico se utilizan para definir las fronteras de peligro, las energías incidentes y los niveles de protección requeridos en diferentes puntos de interés del sistema de potencia [1].

Para cuantificar la severidad de un arco eléctrico se utiliza normalmente la energía incidente, la cual indica la energía térmica que puede recibir una persona expuesta al arco, este es un dato esencial para seleccionar el equipo de Protección Personal (EPP) requerido para proteger a una persona, dicho EPP se encuentra definido en la norma NFPA 70E [2], tabla 130.7(C)(11) la cual fue adoptada por el RETIE [3] en su versión del año 2013 y presentada en numeral 1.3.

Existen varias metodologías para realizar los cálculos de energía incidente, las cuales se presentan en la Tabla 1-2, En esta tabla se describen además las limitaciones y aspectos más relevantes de cada metodología.

Tabla 1-2: Limitaciones de los métodos de cálculo del riesgo por arco eléctrico [6].

Fuente	Limitaciones/Parámetros
Ralph Lee [10]	<ul style="list-style-type: none"> - Calcula la frontera de arco eléctrico al aire libre; conservativo para más de 600V y se vuelve más conservativo a medida que aumenta la tensión. - La energía incidente calculada para arcos trifásicos al aire libre en sistemas mayores a 600V nominales, se vuelve más conservativo a medida que la tensión aumenta.
Doughty and Neal [11]	<ul style="list-style-type: none"> - La energía incidente calculada para arcos trifásicos en sistemas de 600V nominales o menor, aplica para corrientes de cortocircuito entre 16kA y 50kA.
IEEE Standard 1584 [1]	<ul style="list-style-type: none"> - Calcula la energía incidente y la frontera por arco eléctrico para 208V a 15kV, sistema trifásico 50-60 Hz, corrientes de cortocircuito de 700 a 106000 A y, separación entre conductores de 13 a 152 mm.
ANSI/IEEE C2, tablas 410-1 y 410-2 [12]	<ul style="list-style-type: none"> - Calcula la energía incidente para arcos fase-tierra al aire libre de 1kV a 500kV para trabajos en línea viva.

De los procedimientos de cálculo el más difundido es el consignado en la norma IEEE 1584 [1] el cual es utilizado para realizar los cálculos presentados en este trabajo descrito a grandes rasgos en los numerales 1.2.1 y 1.2.2.

1.2.1 Cálculo de la corriente de arco

Para el cálculo de la corriente de falla que circula por el arco eléctrico norma IEEE Std 1584 – 2002 “*Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*” [1] establece las ecuaciones (1.1) y (1.2) (Ecuaciones 1, 2 y 3 de la norma) presentadas a continuación.

Para tensiones inferiores a 1000 V, la corriente de arco está dada por:

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966V + 0.000526G + 0.5588V(\lg I_{bf}) - 0.00304G(\lg I_{bf}) \quad (1.1)$$

Para tensiones superiores a 1000 V, la corriente de arco está dada por:

$$I_a = 10^{(0.00402 + 0.983 \log I_{bf})} \quad (1.2)$$

La distancia entre conductores “G”, se toma de la tabla Tabla 1-3, teniendo en cuenta el nivel de tensión y el tipo de equipo.

Tabla 1-3: Factor de tensión y clase de equipos (Tabla 4 de [1])

Tensión del sistema (kV)	Tipo de equipo	Distancia típica entre conductores (mm)	Factor x de distancia
0,208-1	Aire libre	10-40	2,000
	Switchgear	32	1,473
	CCM y tableros	25	1,641
	Cable	13	2,000
>1-5	Aire libre	102	2,000
	Switchgear	13-102	0,973
	Cable	13	2,000
>5-15	Aire libre	13-153	2,000
	Switchgear	153	0,973
	Cable	13	2,000

Con la corriente de arco calculada, se procede al cálculo de la energía incidente tal como se describe en 1.2.2.

1.2.2 Cálculo de la energía incidente

Para el cálculo de la energía incidente se aplica la ecuación (1.3) [1].

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t_a}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (1.3)$$

De donde la energía normalizada E_n , es definida con la ecuación (1.4).

$$\lg(E_n) = K_1 + K_2 + 1,081 \lg(I_a) + 0,0011G \quad (1.4)$$

Como se observa en las ecuaciones (1.1) a (1.4) la mayoría de las variables involucradas dependen de datos conocidos que no varían en el tiempo, como tensión de operación, geometría de la celda, distancia de trabajo, etc. Sin embargo, la corriente de falla y el tiempo de operación de las protecciones pueden variar en el tiempo y requiere de un análisis cuidadoso para su correcta determinación.

Las variaciones en la corriente de arco dependen esencialmente de la topología de la red, viéndose afectada por modificaciones tales como cambios en la fuente de alimentación. Las variaciones en el tiempo de operación de las protecciones están asociadas con los tiempos de operación de las protecciones, los cuales a su vez se ven afectados por los cambios en la corriente de arco. Es importante tener en cuenta que una modificación relativamente pequeña de la corriente podría generar un cambio alto del tiempo de operación. Por ejemplo una corriente que sea cercana pero mayor al *Pickup* de la función 50 podría generar tiempos de disparo del orden de los milisegundos, mientras que siendo igualmente cercana pero inferior al *Pickup* de la función 50 podría generar tiempos de disparo del orden de los segundos.

1.3 Medidas de protección frente al arco eléctrico

Frente al arco eléctrico existen diversas estrategias de protección, un primer grupo de ellas se centra en la prevención, buscando evitar que se genere el evento y el segundo grupo de medidas son las correctivas, las cuales buscan minimizar los daños generados por el arco una vez se ha presentado. Una clasificación de estas medidas es la presentada en la Figura 1-1, la cual fue tomada de [13].

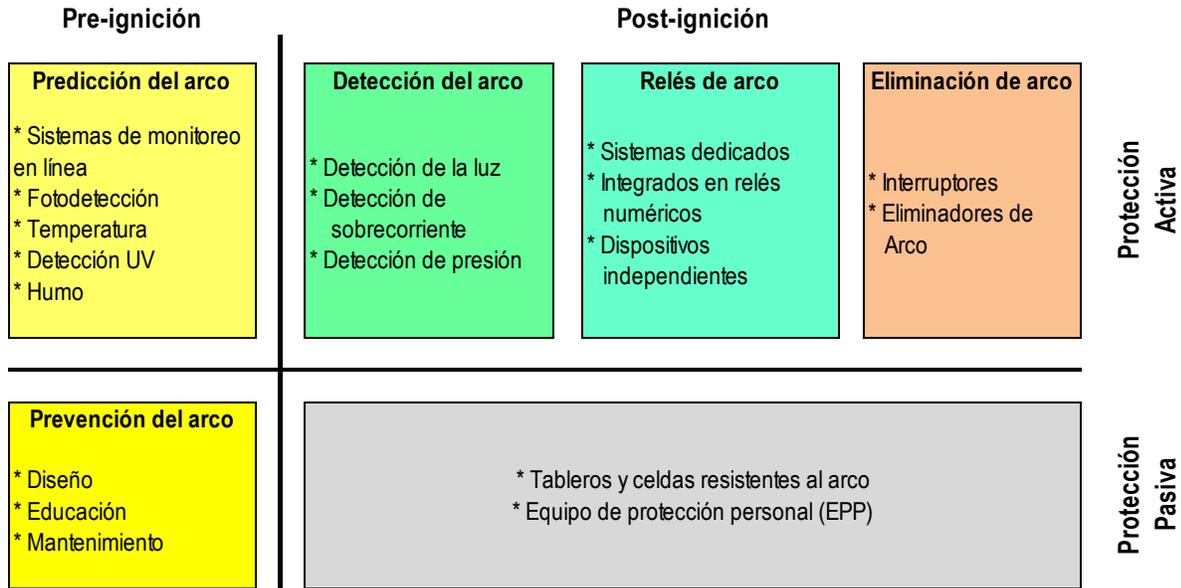


Figura 1-1: Medidas de protección frente a arco eléctrico, tomada de [13].

El trabajo propuesto se enfoca en el ajuste de las protecciones de sobrecorriente, las cuales operan como una medida activa post-ignición que más que mitigar los efectos del arco disminuye su severidad, lo cual tiene el beneficio adicional de disminuir las pérdidas potenciales derivadas de un accidente, generando que las medidas de protección adicionales sean menos robustas.

Los elementos de protección personal (*EPP*) son la medida de protección más conocida y corresponden a una medida de protección pasiva post-ignición. La clasificación de estos *EPP* de acuerdo a la norma NFPA 70E [2], se muestra en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: EPP acorde con NFPA 70E (Adaptada de [2])

Categoría de EPP	Energía incidente (E)		Descripción propuesta para el riesgo	Características del equipo de protección personal (EPP)
	>	≤		
0	0	1,2	Bajo	Vestimenta protectora, no fundible o de fibras naturales no tratadas (como algodón, lana, rayón o seda no tratados, o mezclas de estos materiales) con un peso de la tela de al menos 4,5 oz/yd ² . Camisa (manga larga) Pantalones (largos) Equipos de protección: Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), Protección auditiva, Guantes de cuero para uso industrial (SSN).
1	1,2	4	Bajo	Vestimenta resistente al arco, con valor mínimo de resistencia al arco de 4 cal/cm ² . Camisa de mangas largas y pantalones resistentes al arco u overol resistente al arco. Protector facial resistencia al arco o capucha del traje de protección contra relámpago de arco. Chaqueta, parka prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN). Equipos de protección: Casco, Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), Protección auditiva, Guantes de cuero para uso industrial, Calzado de trabajo de cuero (SSN).
2	4	8	Bajo	Vestimenta resistente al arco, con valor mínimo de resistencia al arco de 8 cal/cm ² . Camisa de mangas largas y pantalones resistentes al arco u overol resistente al arco. Capucha del traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco o protector facial con valor de resistencia al arco y pasamontañas con valor de resistencia al arco. Chaqueta, parka prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN).

Categoría de EPP	Energía incidente (E)		Descripción propuesta para el riesgo	Características del equipo de protección personal (EPP)
	>	≤		
				Equipos de protección: Casco, Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), Protección auditiva, Guantes de cuero para uso industrial, Calzado de trabajo de cuero.
3	8	25	Moderado	Vestimenta resistente al arco, seleccionada de manera que el valor de resistencia al arco del sistema cumpla con el valor mínimo de resistencia al arco requerido de 25 cal/cm ² . Camisa de manga larga resistente al arco (SSR). Pantalones de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco (SSR). Overol resistente al arco (SSR). Chaqueta de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco (SSR). Capucha de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco. Guantes resistentes al arco. Chaqueta, parka prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN). Equipos de protección: Casco, Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), Protección auditiva, Calzado de trabajo de cuero.
4	25	40	Alto	Vestimenta resistente al arco, seleccionada de manera que el valor de resistencia al arco del sistema cumpla con el valor mínimo de resistencia al arco requerido de 40 cal/cm ² . Camisa de manga larga resistente al arco (SSR). Pantalones resistentes al arco (SSR). Overol resistente al arco (SSR). Chaqueta de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco (SSR). Pantalones de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco (SSR). Capucha de traje de protección contra relámpago de arco con valor de resistencia al arco. Guantes resistentes al arco. Chaqueta, parka prendas impermeables o forros de cascos con valor de resistencia al arco (SSN). Equipos de protección: Casco, Anteojos de seguridad o gafas de seguridad (SR), Protección auditiva, Calzado de trabajo de cuero.

SSN: según sea necesario (opcional). SSR: según sea requerido. SR: selección requerida.

La columna “*Descripción propuesta para el riesgo*” corresponde a una designación formulada por el autor con el fin de identificar el riesgo desde un punto de vista cualitativo, la calificación “*bajo*” se les da a las tres categorías con el menor riesgo, las cuales tiene en común que dentro del *EPP* no es obligatorio el uso de un overol, a las dos categorías restantes se les asignan los niveles “*moderado*” y “*alto*” respectivamente. Cuando la energía incidente supera las 40 cal/cm² se propone la designación de riesgo “*severo*”. La descripción propuesta para el riesgo es utilizada en los capítulos 3 y 4, ver Tabla 3-1.

2 Relés de protección a nivel industrial

A continuación se presenta una revisión de las capacidades básicas de adaptación de una muestra de relés utilizados a nivel industrial, la cuales tienen el potencial para generar un esquema de protección adaptable que permita disminuir el riesgo de arco eléctrico en una instalación industrial, además se describen en este capítulo los criterios utilizados para definir los ajustes de las protecciones asociadas con aplicaciones típicas a nivel industrial, tal como alimentadores, transformadores y motores.

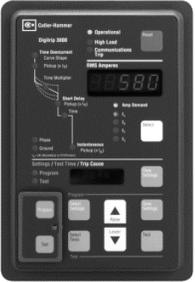
2.1 Características de los relés

Cada vez más los relés modernos presentan diferentes capacidades de adaptación, dentro de las cuales se encuentra el cambio de ajustes en línea utilizando para este fin un protocolo de comunicaciones propietario, abierto o estándar, tal como el establecido por la norma IEC 61850 [14]. Sin embargo, a nivel industrial no todos los relés cuentan con estas capacidades, adicionalmente la implementación de un esquema adaptable vía comunicaciones presenta retos importantes generados por la dificultad para garantizar la interoperabilidad de relés de diferentes fabricantes y tecnologías, por lo tanto se ha buscado una forma más simple de implementar un esquema de protección adaptable, a partir del uso de los grupos de ajuste, cuyo funcionamiento es explicado más adelante, estos grupos de ajuste son comunes en diferentes fabricantes de relés industriales, tal como se puede observar para la muestra de relés presentada en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Relés de protección.

Marca	Referencia	Propósito	Grupos de ajuste	Cambio de grupo	Fuente de información	Imagen
General Electric	GE 350	Feeder	2	Mediante comunicación o habilitación o un contacto de entrada	<i>GE Multilin 350 Feeder Protection System instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2010.	
General Electric	GE 750/760	Feeder	4	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>GE Multilin 750/760 Feeder Management Relay instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2010.	
General Electric	GE T60	Transformer	6	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>T60 Transformer Protection System UR Series instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2014.	
General Electric	GE G30	Generator	6	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>G30 Generator Protection Relay UR Series instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2010.	
General Electric	GE F60	Feeder	6	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>F60 Feeder Protection Relay UR Series instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2011.	
General Electric	GE T35	Transformer	6	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>T35 Transformer Protection System UR Series instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2011.	

Marca	Referencia	Propósito	Grupos de ajuste	Cambio de grupo	Fuente de información	Imagen
SEL	751A	Feeder	4	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>SEL-751A Feeder Protection Relay instruction manual</i> , Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, USA, 2013.	
General Electric	GE 745	Transformer	4	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>GE Multilin 745 Transformer Protection System instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2009.	
General Electric	GE 345	Transformer	2	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>GE Multilin 345 Transformer Protection System instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2013.	
General Electric	GE 469	Motor	1	-	<i>GE Multilin 469 Motor Management Relay instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2010.	
Allen Bradley	857	Motor	2	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>857 Feeder and Motor Protection System User Manual</i> , Rockwell Automation, Milwaukee, WI, USA, 2009.	

Marca	Referencia	Propósito	Grupos de ajuste	Cambio de grupo	Fuente de información	Imagen
EATON	DT-3000	Feeder	1	-	<i>Protective Relays Digitrip 3000, EATON, Dublin, Ireland, 1999.</i>	
EATON	EDR-3000	Feeder	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>EDR-3000 Eaton Distribution Relay, EATON, Moon Township, PA, USA, 2009.</i>	
EATON	EDR-5000	Feeder	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>EDR-5000 Eaton Distribution Relay, EATON, Cleveland, OH, USA, 2015.</i>	
EATON	FP-5000	Feeder	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>FP-5000 Feeder Protection, EATON, Moon Township, PA, USA, 2007.</i>	
EATON	MP-3000	Motor	1	-	<i>MP-3000 Motor Protection Relay, EATON, Moon Township, PA, USA, 2010.</i>	

Marca	Referencia	Propósito	Grupos de ajuste	Cambio de grupo	Fuente de información	Imagen
EATON	MP-4000	Motor	1	-	<i>MP-4000 Motor Protection Relay, EATON, Moon Township, PA, USA, 2012.</i>	
EATON	EMR-3000	Motor	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>EMR-3000 Eaton Motor Relay, EATON, Moon Township, PA, USA, 2010.</i>	
EATON	EMR-4000	Motor	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>EMR-4000 Eaton Motor Relay, EATON, Moon Township, PA, USA, 2015.</i>	
EATON	EMR-5000	Motor	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>EMR-5000 Eaton Motor Relay, EATON, Cleveland, OH, USA, 2015.</i>	
EATON	ETR-4000	Transformer	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>ETR-4000 Eaton Transformer Relay, EATON, Moon Township, PA, USA, 2009.</i>	

Marca	Referencia	Propósito	Grupos de ajuste	Cambio de grupo	Fuente de información	Imagen
EATON	ETR-5000	Transformer	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>ETR-5000 Eaton Transformer Relay</i> , EATON, Cleveland, OH, USA, 2015.	
EATON	EGR-5000	Generator	4	Mediante software o contactos de entrada	<i>EGR-5000 Eaton Generator Relay</i> , EATON, Cleveland, OH, USA, 2015.	
General Electric	GE 489	Generator	2	Usando el Activate Setpoint Group o mediante una entrada digital	<i>GE Multilin 489 Generator Management Relay instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2010.	
General Electric	GE 239	Motor	4	Usando Switch inputs 1 y 2	<i>GE Multilin 239 Motor Protection Relay instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2007.	
General Electric	GE 269 PLUS	Motor	7	Mediante comunicación o entrada lógica	<i>269Plus Motor Management Relay instruction manual</i> , General Electric, Markham, ON, Canada, 2006.	

Marca	Referencia	Propósito	Grupos de ajuste	Cambio de grupo	Fuente de información	Imagen
General Electric	GE SPM	Motor	1	-	<i>SPM Synchronous Motor Protection and Control instruction manual, General Electric, Markham, ON, Canada, 2008.</i>	
General Electric	GE 735	Feeder	1	-	<i>GE Multilin 735/737 Feeder Protection Relay instruction manual, General Electric, Markham, ON, Canada, 2008.</i>	

Las referencias más antiguas de relés no cuentan con varios grupos de ajuste, sin embargo, la mayoría de las protecciones presentadas en la Tabla 2-1 los tienen.

Para cada uno de los grupos de ajuste de un relé se pueden dar diferentes valores a los parámetros de protección, logrando de esta forma una capacidad de adaptación, dado que durante la operación del relé se puede cambiar el grupo tanto de forma manual, a través de la interfaz del relé o en forma remota mediante una orden recibida bien sea por las entradas digitales del relé o por los puertos de comunicación. Estas capacidades permiten generar un esquema de protección adaptable para mejorar el desempeño de las protecciones ante cambios operativos y topológicos del sistema, encajando en el concepto de esquema adaptable, concebido como un sistema que busca realizar ajustes automáticamente en los relés con prevalencia de las condiciones presentes en el sistema eléctrico [15].

En la Tabla 2-2 se presentan a manera de ejemplo los parámetros ajustables de un relé industrial, los cuales pueden tomar valores diferentes para cada uno de los 4 grupos de ajuste con los que cuenta este relé en particular.

Tabla 2-2: Parámetros típicos ajustables de una protección de sobrecorriente.

PARÁMETROS DE AJUSTE	
51P	Curve Family
	Curve Shape
	Phase Overcurrent <i>Pickup</i>
	Time Multiplier
51P (2)	Curve Family
50P (1)	Fault current (<i>Pickup</i>)
	Tripping <i>delay</i> (t)
50P (2)	Fault current (<i>Pickup</i>)
	Tripping <i>delay</i> (t)
51R	Curve Family
	Curve Shape
	Ground Overcurrent <i>Pickup</i>
	Time Multiplier
50R-1	Fault current (<i>Pickup</i>)
	Tripping <i>delay</i> (cyc)
50R-2	Fault current (<i>Pickup</i>)
	Tripping <i>delay</i> (cyc)

El cambio en los ajustes de cada grupo permite que la curva de disparo se mueva en los ejes del tiempo y corriente de acuerdo con las necesidades, tal como se muestra en la Figura 2-1, dándole a la protección el potencial de adaptarse a los cambios de la red.

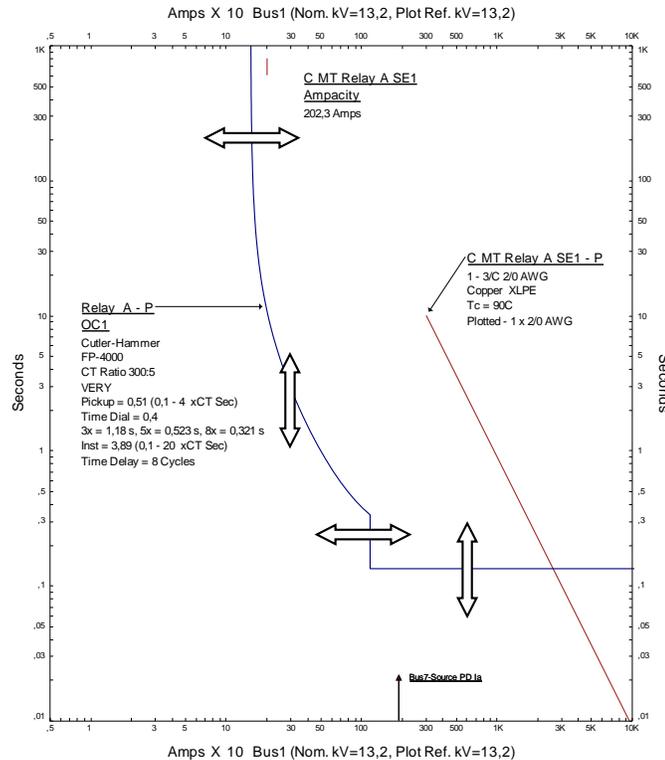


Figura 2-1: Parámetros ajustables protecciones 50/51.

Dentro de los parámetros presentados en la Tabla 2-2 se encuentran “*Curve Family*” y “*Curve Shape*”, los cuales hacen referencia a la familia de curvas IEC o ANSI/IEEE [9] y dentro de dichas familias a la forma de la curva.

La forma de las curvas de la familia IEC está definida en la norma IEC 60255 [16], la cual establece el tiempo que tarda un relé en disparar en función de la magnitud de la corriente de falla.

$$t = \frac{K}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times TMS \quad (2.1)$$

Los valores de las constantes α y K , dependen del tipo de curva y se seleccionan con base en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Factores α y K en curvas IEC.

Tipo de Curva	α	K
Standard Inverse	0,02	0,14
Very Inverse	1,0	13,5
Extremely Inverse	2,0	80
Long-time Inverse	1,0	120

La siguiente es la ecuación aplicable para las curvas de la familia ANSI/IEEE.

$$t = \frac{TD}{7} \times \left(\frac{K}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} + \beta \right) \quad (2.2)$$

Los factores para cada tipo de curva son los definidos en la Tabla 2-4:

Tabla 2-4: Factores α , β y K en curvas ANSI/IEEE.

Tipo de Curva	α	β	K
IEEE Moderately Inverse	0,02	0,114	0,0515
IEEE Very Inverse	2,0	0,491	19,61
IEEE Extremely Inverse	2,0	0,1217	28,2

El ajuste de los diferentes grupos de ajuste se debe realizar siguiendo criterios de protección que buscan una configuración óptima del relé, de tal forma que se logre una adecuada protección del sistema sin causar disparos indeseados. En el numeral 2.2 se describen criterios de ajuste utilizados para realizar los estudios de coordinación de protecciones a nivel industrial.

2.2 Criterios de ajuste a nivel industrial

A continuación, se describen los criterios de ajuste aplicados a las protecciones de sobrecorriente para los equipos principales a nivel industrial.

2.2.1 Criterios protección transformadores

2.2.1.1 Sobrecorriente de fases de tiempo inverso (51P)

De acuerdo con normas internacionales como la IEEE 242 [9] en su numeral 11.9, el relé de sobrecorriente temporizada de fase debe ajustarse entre el 125% y el 150% de la corriente nominal del transformador, con una curva de operación que se encuentre por debajo de la curva de daño térmico del mismo y un *dial* que permita la coordinación con las protecciones adyacentes. Además, debe permitir las sobrecorrientes de magnetización sin generar disparos indeseados de los dispositivos de protección. La Figura 2-2 muestra las curvas tiempo-corriente típicas para la protección de transformadores.

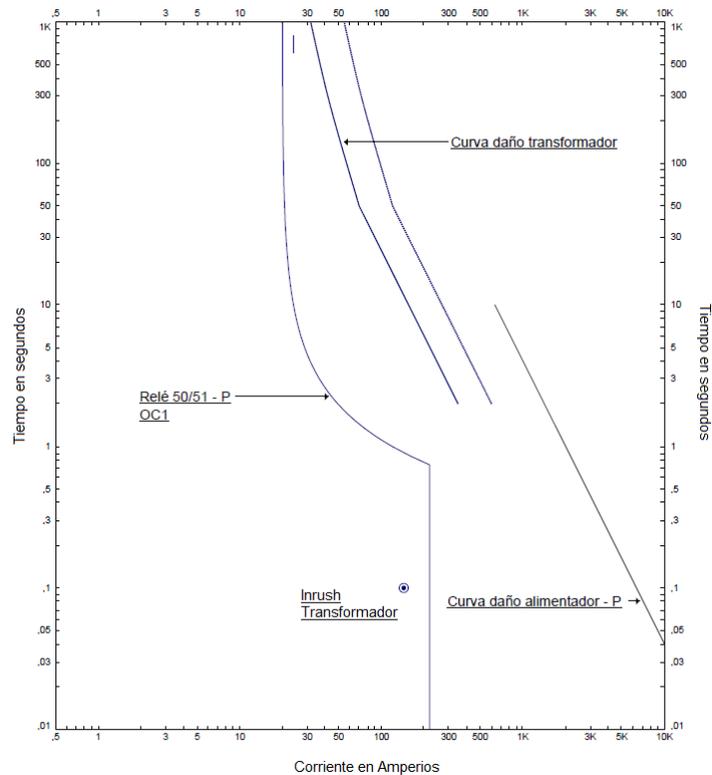


Figura 2-2: Curvas típicas para protección de transformadores.

2.2.1.2 Sobrecorriente instantánea de fases (50P)

En términos generales, no se recomienda ajustar esta función para la protección de transformadores, pues en muchas ocasiones se presentan operaciones indeseadas por corrientes de magnetización y fallas externas. Sin embargo, cuando deba emplearse, ésta debe ajustarse entre el 125% y el 200% de la máxima contribución de la corriente de cortocircuito generada por fallas en los barrajes de baja tensión del transformador, esto de acuerdo con el numeral 8.3.1 de la norma IEEE C37.91 [17]. Normalmente, la temporización es de 50 ms, con lo cual se evitan disparos indeseados de la protección ante fenómenos transitorios. Debe verificarse siempre que la actuación de la protección se encuentre por debajo de la curva de daño térmico del transformador protegido.

2.2.1.3 Sobrecorriente de tierra de tiempo inverso (51G)

De acuerdo con la norma IEEE C37.91 [17], el *pickup* de esta función debe ajustarse por encima de la corriente de secuencia cero esperada para una condición de desbalance de carga. Típicamente, se ajusta al 40% de la corriente nominal del transformador. El *dial* y la curva de disparo se seleccionan de tal manera que la operación de la protección se dé con un margen de tiempo que permita la selectividad respecto a la protección adyacente.

2.2.1.4 Sobrecorriente instantánea de tierra (50G)

Al igual que la protección de sobrecorriente instantánea de fase, esta función no se recomienda para la protección de transformadores, pues en muchas ocasiones puede generar disparos indeseados por fenómenos transitorios y fallas externas. Cuando sea necesario utilizarla, esta función debe ajustarse al 150% de la corriente simétrica máxima de cortocircuito trifásico, reflejada en el devanado primario, producidas por fallas en el devanado secundario del transformador [18] y [19]. La temporización se recomienda de 50 ms para evitar disparos indeseados generados por fenómenos transitorios, verificando que la actuación de la protección se dé por debajo de la curva de daño térmico del transformador.

2.2.1.5 Fusibles para transformadores

Estos dispositivos deben operar de manera efectiva ante fallas que alcancen niveles de cortocircuito que superen las magnitudes de soportabilidad especificadas por el fabricante de los transformadores. De acuerdo con la Tabla 450.3(A) del NEC [20], el fusible primario

para transformadores con tensión superior a 1 kV debe operar máximo al 300% de la corriente nominal primaria del equipo. Generalmente, los fusibles se dimensionan entre el 133% y el 150% de la corriente nominal del transformador.

Un aspecto muy importante para la selección de los fusibles es la corriente de magnetización de los transformadores (*Inrush*), cuya magnitud y tiempo de duración depende de las características de fabricación de los mismos. Los fusibles deben seleccionarse de manera que no operen ante esta sobrecorriente. La IEEE 242 en su artículo 11.9 [9], establece que, para los estudios de coordinación de protecciones, normalmente se usa una corriente *Inrush* con una magnitud entre 8 y 12 veces la corriente nominal del transformador con una duración de 100 ms. Además, en el numeral 5.8.5 de esta misma norma, se dice que la corriente *Inrush* también puede alcanzar una magnitud entre 20 y 25 veces la corriente nominal del transformador durante los primeros 10 ms. Por tanto, la curva tiempo-corriente de operación del fusible debe estar por encima de estos dos valores.

2.2.2 Criterios de protección alimentadores

2.2.2.1 Sobrecorriente de fases de tiempo inverso (51P)

Para el ajuste de esta función se debe tener en cuenta el cableado del circuito, el cual debe quedar protegido, permitiendo la máxima carga esperada del alimentador. De acuerdo con [21], el *Pickup* de esta función se establece entre el 100% y el 125% de la máxima demanda esperada para el alimentador. La curva de operación y el *dial* deben seleccionarse de acuerdo con el estudio de coordinación de protecciones, de manera que se garantice la selectividad con las protecciones adyacentes y la no operación ante los fenómenos transitorios generados por corrientes de arranque y magnetización de elementos ubicados aguas abajo. La Figura 2-3 muestra las curvas tiempo-corriente típicas para protección de alimentadores.

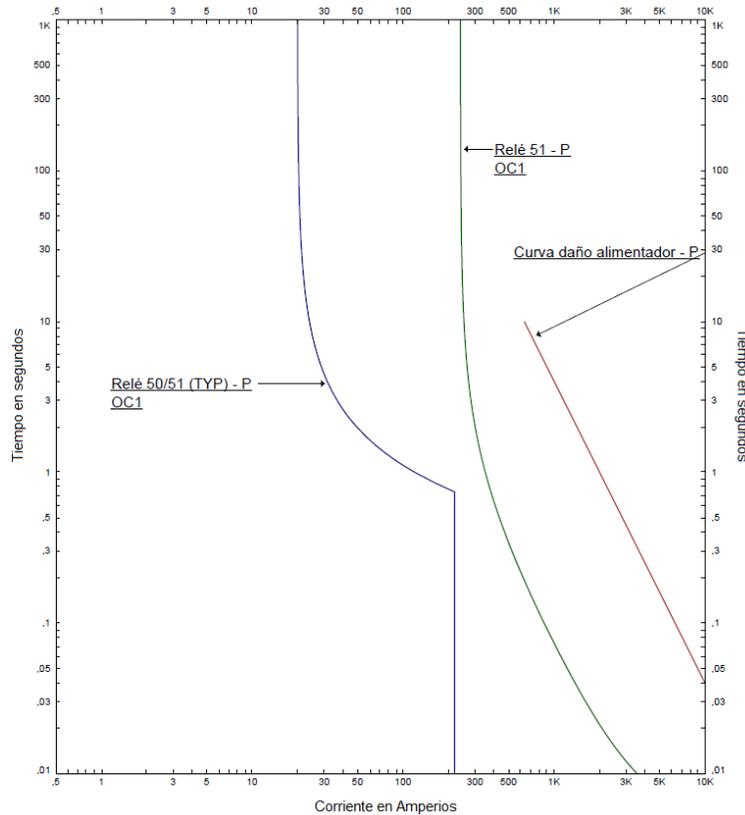


Figura 2-3: Curvas tiempo-corriente típicas para protección de alimentadores.

2.2.2.2 Sobrecorriente instantánea de fases (50P)

Típicamente, esta función se ajusta al 150% de la corriente de cortocircuito trifásico para fallas en el extremo remoto del alimentador a proteger, por ejemplo en el secundario del mayor transformador del circuito. El *dial* se ajusta en 50 ms, verificando que la curva característica de la protección no sobrepase la curva de daño del alimentador, y que no se generen disparos indeseados por fenómenos transitorios.

2.2.2.3 Sobrecorriente de tierra de tiempo inverso (51G)

En muchas aplicaciones no se recomienda el uso de esta función, pues se elimina la selectividad con las protecciones adyacentes y se generan disparos indeseados por fenómenos transitorios propios de la operación del alimentador. Sin embargo, cuando se requiere su uso, esta debe ajustarse al 40% de la máxima corriente esperada en el alimentador.

2.2.2.4 Protección de sobrecorriente instantánea de tierra (50G)

En muchas aplicaciones no se recomienda el uso de la función de sobrecorriente instantánea de tierra, pues se pone en riesgo la selectividad y se pueden producir disparos indeseados por fenómenos transitorios.

2.2.3 Criterios de ajuste de protecciones para motores de media tensión

En la Figura 2-4 se presenta el esquema de protección típico de un motor. La curva (B) representa la corriente de arranque y las curvas (C) y (E) muestran el comportamiento de los relés de protección.

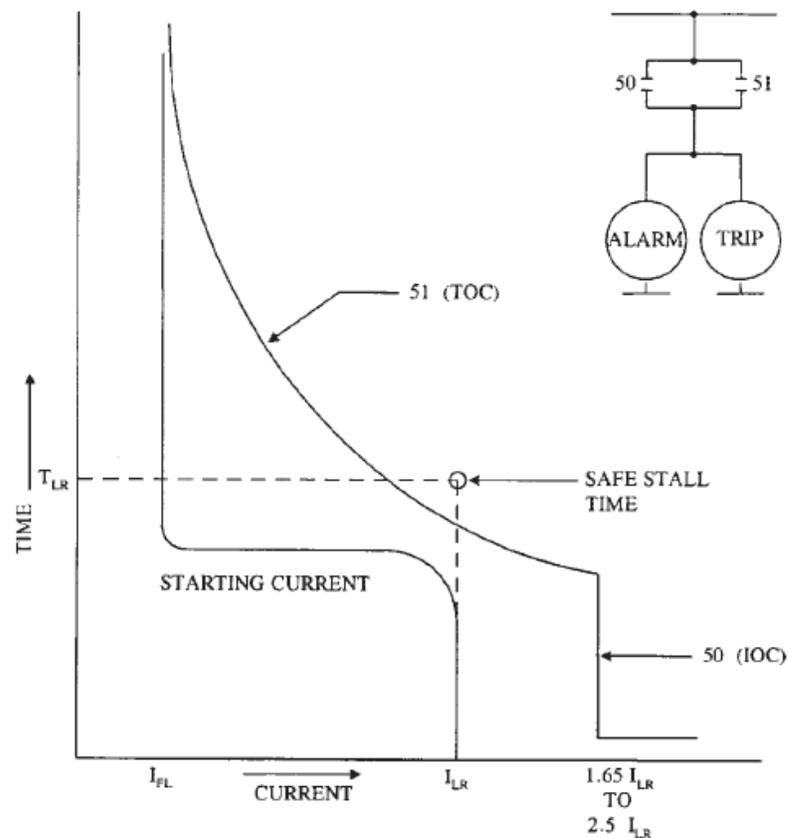


Figura 2-4: Característica de protección completa por sobrecorriente, tomada de [22],.

Como se observa en la Figura 2-4 los relés de protección se ajustan a la forma de la corriente de arranque, con el fin de que este fenómeno transitorio no genere un disparo

indeseado. Sin embargo, este ajuste normalmente se mantiene durante la operación normal del motor, momento en el cual ya no es requerido, generando un retardo innecesario en la operación de la protección.

2.2.3.1 Protección contra sobrecarga

De acuerdo con el NEC [20], el máximo ajuste del *pickup* de la función de sobrecorriente temporizada de fases para motores con un factor de servicio de 1,15 o más, y cuyo aumento de temperatura no sea mayor a 40°C, es del 125% de la corriente nominal a plena carga. Para todos los demás motores, este ajuste debe hacerse al 115% de dicha corriente. En caso de que estos valores no permitan el arranque del motor, se puede aumentar el ajuste de acuerdo con las restricciones planteadas en el NEC [20], las cuales establecen que el ajuste no debe exceder el 140% de la corriente nominal a plena carga cuando el motor tiene un factor de servicio de 1,15 y un máximo incremento de temperatura de 40°C, mientras que para los demás motores el máximo ajuste no puede exceder el 130% de la corriente mencionada [23].

2.2.3.2 Protección contra atascamiento mecánico (JAM)

La protección *Jam* o de atascamiento mecánico permite que, después del arranque del motor, cuando cualquiera de las corrientes de las tres fases alcance el valor de ajuste por un periodo de tiempo especificado en el *delay*, se genere un disparo de la protección que saque de servicio a la máquina. Esta función también se emplea para generar una alarma de atascamiento cuando el motor está en operación. Esta protección tiene la propiedad de sacar al motor más rápidamente que la protección de sobrecarga, y además, eleva la vida útil del mismo al evitar que se someta prolongadamente al torque de arranque presentado durante una condición de atascamiento [24].

El *pickup* de la función de atascamiento mecánico debe ajustarse a un valor que sea superior al de la corriente de carga en condiciones normales, pero que a su vez, sea inferior a la corriente de atascamiento especificada para la máquina por parte del fabricante. El *delay* se ajusta al mínimo tiempo evitando que ocurran disparos indeseados por fluctuaciones de carga momentáneas [24].

2.2.3.3 Fusible limitador de corriente tipo “R”

En motores de media tensión es frecuente encontrar que la protección magnética se hace con fusibles limitadores de corriente, los cuales deben ser apropiadamente dimensionados para la carga y coordinados correctamente con algún dispositivo de protección contra sobrecarga, de manera que el fusible esté en capacidad de interrumpir el paso de corriente y que no se sobrecaliente [25]. De acuerdo al artículo 5.4 a) de la norma IEEE C37.46-2010, El fusible se debe fundir en un rango de 15 a 35 segundos (típicamente 20 segundos) para un valor de corriente en amperios igual a 100 veces el número R [26].

La Tabla 2-5 muestra la capacidad de corriente continua mínima permitida para cada fusible de acuerdo a la norma IEEE C37.46 [26], y la corriente de fusión a la cual el fusible se debe derretir en un rango de 15 s a 35 s.

Tabla 2-5: Corriente continua mínima permitida para fusibles de potencia clase R [26].

Denominación del fusible ^a	Corriente continua permitida (A)		Corriente de fusión (A) para tiempo de 15s a 35s
	A 55°C ambiente	A 40°C ambiente	
1.5R	36	40	150
2R	63	70	200
3R	90	100	300
4R	115	130	400
5R	135	150	500
6R	150	170	600
9R	180	200	900
12R	210	230	1200
18R	350	390	1800
24R	400	450	2400
26R	430	480	2600
30R	490	550	3000
32R	540	600	3200
36R	580	650	3600
38R	630	700	3800

^a Existen fusibles mayores a 38R pero normalmente son diseños especiales elaborados por los fabricantes.

El fusible se selecciona de manera que la protección de sobrecarga sea hecha por el relé para corrientes menores o iguales a la corriente de rotor bloqueado y la protección contra cortocircuitos sea función del fusible, para lo cual se deberá verificar que la curva de tiempo mínimo de fusión del fusible se intersecte con la curva de protección del relé en un punto mayor a la corriente de rotor bloqueado, lo cual se logra al seleccionar el valor del número R de tal forma que la corriente de la columna 4 de la Tabla 2-5 sea mayor o igual al 110% de la corriente de rotor bloqueado [25].

3 Metodología de evaluación e implementación de un sistema adaptable

La metodología de adaptación propuesta busca disminuir las energías incidentes que se pueden presentar en una planta industrial, mediante el aprovechamiento de las capacidades de adaptación disponibles en las protecciones de sobrecorriente utilizadas en dicha industria. Sin embargo, es importante tener en cuenta que no en todas las instalaciones industriales será posible o necesario implementar un esquema de protección adaptable para la reducción de la energía incidente por arco eléctrico, desde este punto de vista se requiere evaluar la necesidad y viabilidad de la implementación. El procedimiento propuesto para definir estos aspectos es condensado en el siguiente diagrama de flujo.

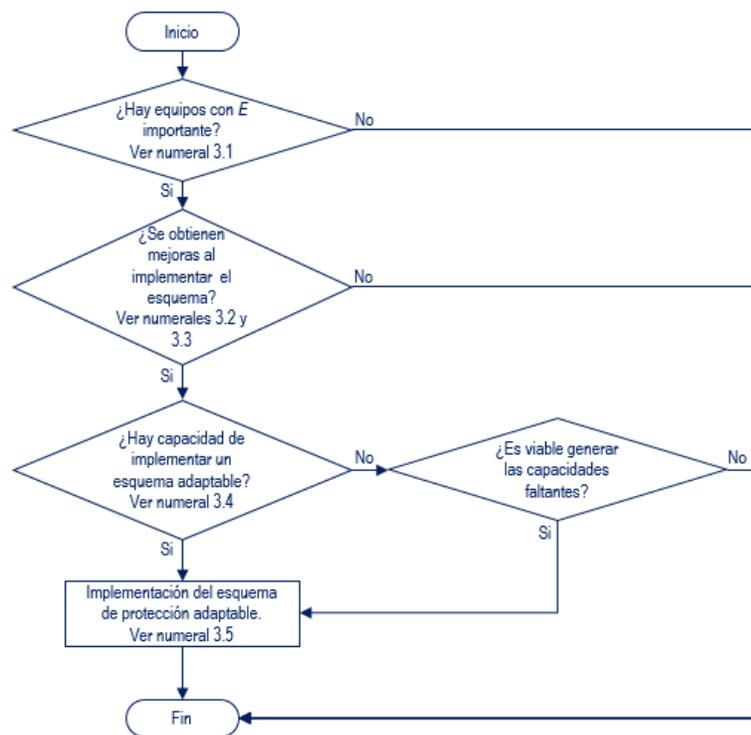


Figura 3-1: Flujograma de evaluación.

En los siguientes numerales se ampliará la explicación de cada una de las etapas del anterior flujograma.

3.1 Cálculo inicial de energía incidente

Un estudio de arco tiene como objetivo principal cuantificar el riesgo por arco eléctrico y tomar las medidas necesarias para mitigarlo. La variable más importante para cuantificar el riesgo de arco eléctrico es la energía incidente, dado que de ella dependen las lesiones que puede sufrir una persona, además, con base en esta se selecciona el equipo de protección personal y se define la frontera de peligro por arco eléctrico, por lo tanto, el punto de partida para evaluar la necesidad de contar con un esquema de protección adaptable en una instalación en particular, será el valor de energía incidente obtenido al evaluar el riesgo con ajustes fijos de las protecciones, dado que si al realizar dicha evaluación se determina que el riesgo de la instalación es bajo, las acciones que se tomen para reducir dicho riesgo no tendrán un efecto significativo.

Con el fin de cuantificar el riesgo se propone trabajar con base en las categorías presentadas en la norma NFPA 70E [2], las cuales se basan en el valor de la energía incidente tal como se presenta en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Rangos energía incidente.

Categoría del riesgo	Rango energía incidente (cal/cm ²)		Descripción propuesta para el riesgo
	>	≤	
0	0	1,2	Bajo
1	1,2	4	Bajo
2	4	8	Bajo
3	8	25	Moderado
4	25	40	Alto
>4	40	-	Severo

Dentro del esquema propuesto es fundamental realizar un adecuado cálculo de la energía incidente con el fin de estimar correctamente el riesgo, para lo cual se debe seguir el procedimiento descrito en la norma IEEE 1584 [1], la cual establece el procedimiento de cálculo presentado en la Figura 3-2.

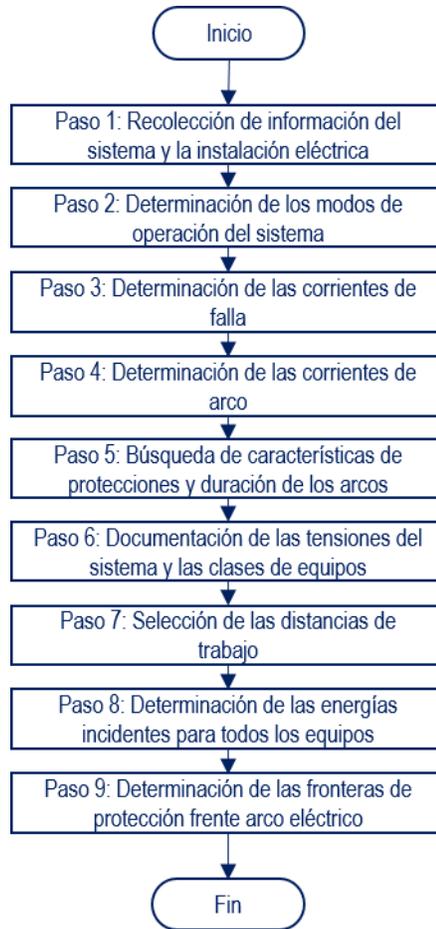


Figura 3-2: Flujograma cálculos arco eléctrico.

Para los pasos 1, 5 y 6, asociados con la recolección de información, pueden ser utilizados los formatos presentados en [1], [27], [28], los cuales son importantes para recopilar información confiable que permita calcular adecuadamente los niveles de corto circuito requeridos en el Paso 3. La evaluación de los diferentes modos de operación del sistema requerida en el Paso 2 es fundamental para identificar los escenarios en los cuales se presenta la mayor energía incidente en cada equipo, dado que cada topología de operación puede implicar cambios en la corriente de cortocircuito calculada en el Paso 3, lo cual impactan el valor de la energía incidente. Algunos ejemplos de diferentes modos de operación son [1]:

- Una o más fuentes de alimentación.
- Operación individual o en paralelo de transformadores en subestación principal.
- Subestaciones satélites con uno o dos alimentadores principales.
- Subestaciones satélites con transformadores acoplados o no en el secundario.

- Centros de control de motores con uno o dos alimentadores energizados.
- Generadores operando sincronizados a la red o en isla.

Teniendo identificadas las corrientes de corto circuito el siguiente punto crítico es determinar los tiempos de duración del arco eléctrico, dado que los pasos 4, 7, 8 y 9 son claros y no requieren un análisis exhaustivo, el procedimiento para la ejecución de dichos pasos es presentado en el capítulo 1. La determinación de la duración del arco eléctrico está ligada a la evaluación del tiempo de despeje de la falla de las protecciones frente a las corrientes de arco, las cuales son menores que las corrientes francas de falla, debido a la impedancia del arco. Es posible realizar la evaluación de los tiempos de despeje de falla partiendo de los ajustes existentes en la planta y determinando con base en estos ajustes la duración de los arcos eléctricos, sin realizar un estudio de coordinación de protecciones, sin embargo, es normal que el estudio de arco eléctrico sea una oportunidad para afinar el estudio de coordinación y redefinir los ajustes de tal manera que se puedan disminuir las energías incidentes al reducir los tiempos de operación. Por lo tanto una adecuada ejecución del Paso 5 implicará realizar un estudio de coordinación de protecciones aplicando criterios tales como los presentados en el capítulo 2.

Normalmente un estudio de arco eléctrico concluye con la aplicación del procedimiento presentado en la Figura 3-2. Sin embargo, es posible que el ajuste fijo de las protecciones no sea suficiente para controlar el riesgo, razón por la cual se propone analizar las energías incidentes calculadas para una instalación con base en la Tabla 3-1, continuando con la evaluación de la capacidad de implementación de un sistema de protección adaptable únicamente cuando se tengan equipos con riesgo importante (moderado, alto y severo). En el caso de encontrar que todos los equipos tienen un riesgo bajo no sería necesario continuar con el proceso para implementar un esquema de protección adaptable.

Una vez identificada la necesidad de reducir el riesgo debe evaluarse si un esquema de protección adaptable contribuye a disminuirlo, tal como se describe a continuación.

3.2 Definición de ajustes adaptables

El objetivo fundamental de este paso de la metodología consiste en identificar puntos donde los ajustes fijos de las protecciones no garantizan un adecuado control de la energía

incidente por arco eléctrico y existen, bajo ciertas condiciones, ajustes alternativos que pueden disminuir el riesgo sin generar disparos indeseados.

Partiendo del listado de los equipos con energías incidentes importantes (riesgo moderado, alto y severo) obtenido con base en lo descrito en 3.1, se debe realizar un análisis con el fin de identificar las causas que generan los altos valores, dichas causas pueden estar asociadas con altas corrientes de falla y tiempos prolongados de operación de las protecciones. Las condiciones de mayor riesgo puede estar presentes durante la operación normal del sistema o ser temporales, generadas por un cambio topológico del sistema. Por lo cual es fundamental realizar un análisis completo de escenarios. Las causas que generan energías incidentes altas en cada sistema pueden ser diferentes, por lo cual se requiere un análisis particular para cada instalación.

En la Figura 3-3 se presenta un ejemplo donde se puede aplicar un esquema de adaptación, consiste en una barra de media tensión (*Bus2*) que presenta una alta energía incidente durante el cambio de alimentación de la fuente *U1* a la fuente *U2*, debido a la disminución en la corriente de arco que a su vez deriva en un aumento en el tiempo de operación del relé (*R*).

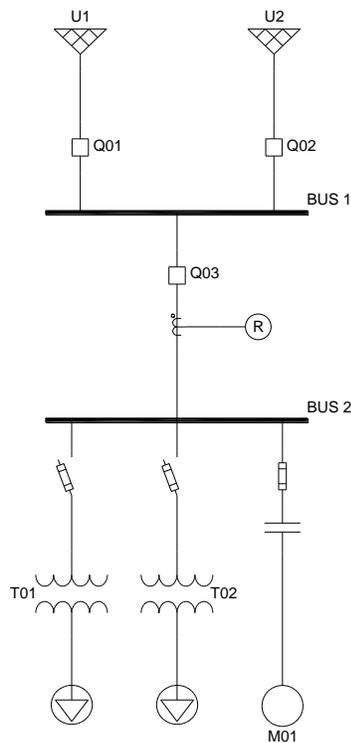


Figura 3-3: Unifilar ejemplo de adaptación

La Figura 3-4 presenta las curvas tiempo corriente asociadas con el ejemplo. La corriente de arco I_{a1} se presenta cuando el sistema está alimentado por la fuente $U1$ y la corriente I_{a2} cuando la fuente de alimentación es $U2$, fuente que cuenta con un menor nivel de corto circuito que $U1$.

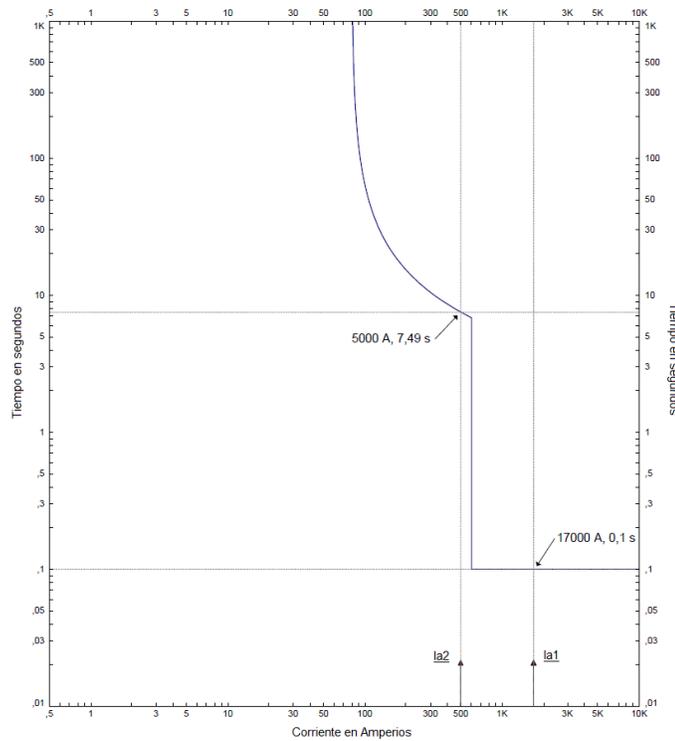


Figura 3-4: Curva tiempo corriente estado inicial ejemplo de adaptación

En la Tabla 3-2 se presentan los valores de corriente de arco, tiempo de despeje de falla y energía incidente asociados con los dos escenarios de alimentación.

Tabla 3-2: Variables estado inicial ejemplo de adaptación

Fuente	Corriente de arco (kA)	Tiempo de despeje de falla (s)	Energía incidente (cal/cm ²)
U1	16,7	0,1	1,887
U2	5	7,49	39,244

En condiciones normales de operación el arranque del motor M01 evita que se pueda disminuir en forma permanente el ajuste de la función 50 del relé R, lo cual genera que al cambiar de fuente de alimentación se aumente la energía incidente, sin embargo, al cambiar a la fuente alterna de alimentación el motor no opera y en esta condición se puede

disminuir el ajuste de la función instantánea a 3000 A, con el fin de detectar la corriente de arco I_{a2} . En estas circunstancias un PLC podría recibir el estado de los interruptores de las fuentes de alimentación (Q01 y Q02) y cambiar el grupo de ajuste mientras el sistema opera con la fuente de alimentación alterna.

En la Figura 3-5 se presentan las curvas tiempo corriente obtenidas luego de hacer el cambio de ajuste de la función de sobrecorriente instantánea.

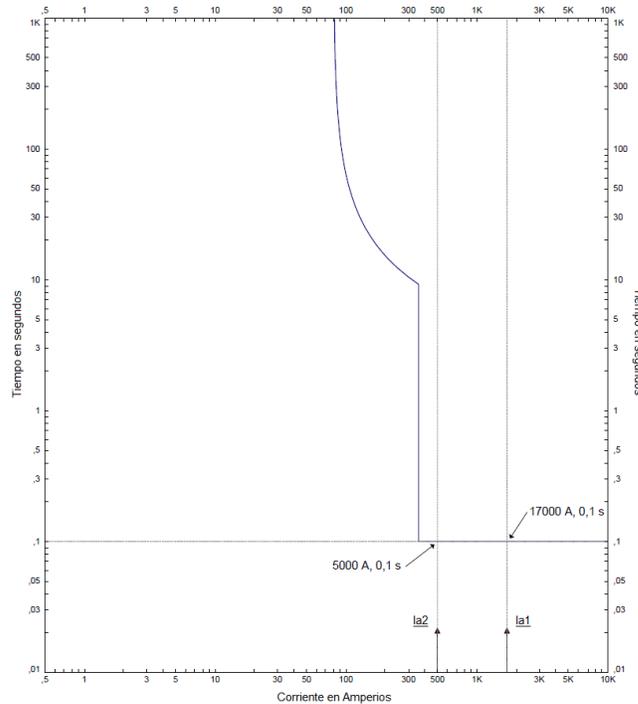


Figura 3-5: Curva tiempo corriente estado final ejemplo de adaptación

Al disminuir el ajuste de la protección 50 la duración del arco eléctrico pasa de más de 7 segundos a 100 ms. Generando una disminución significativa en la energía incidente, tal como se observa al comparar la Tabla 3-2 y la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Variables estado final ejemplo de adaptación

Fuente	Corriente de arco (kA)	Tiempo de despeje de falla (s)	Energía incidente (cal/cm ²)
U1	16,7	0,1	1,887
U2	5	0,1	0,524

Cuando se detecta la viabilidad de aplicar un esquema adaptable se deben generar los ajustes aplicables a cada uno de los grupos, las condiciones requeridas para el cambio de

ajuste y los bloqueos del cambio de grupo cuando sean aplicables, tal como se presenta a continuación para el ejemplo anterior.

Tabla 3-4: Grupos de ajuste ejemplo de adaptación

Función		Grupo de ajuste 1	Grupo de ajuste 2
Sobrecorriente temporizada (51)	Curva	IEC Normal Inversa	IEC Normal Inversa
	Pickup	2	2
	I (primario)	800 A	800 A
	Dial	2	2
Sobrecorriente instantánea (50)	Pickup	15	8
	I (primario)	6000 A	3200 A
	Delay	0,1 s	0,1 s

Tabla 3-5: Condiciones y bloqueo ejemplo de adaptación

	Grupo de ajuste 1	Grupo de ajuste 2
Condiciones	-	Q01: Abierto Q02: Cerrado
Bloqueo	Grupo 2 Activado	-

El grupo 1 de ajustes siempre será el grupo por defecto y no existes condiciones para su operación, únicamente se desactiva cuando otro de los grupos está activado, tal como ocurre en el ejemplo con el grupo 2.

3.3 Verificación de reducción de energía incidente

Como se ha indicado con anterioridad, la implementación de un esquema de protección adaptable tiene sentido cuando el estado final obtenido al aplicar el esquema genera una reducción de la energía incidente en los equipos y con ello una disminución del riesgo por arco eléctrico. Con el fin de realizar una comparación entre los dos estados se propone partir de la Tabla 3-1, agregando el estado inicial y el estado final. A manera de ejemplo se presenta la Tabla 3-6 la cual ha sido diligenciada con datos supuestos para facilitar su comprensión.

Tabla 3-6: Comparación energía incidente estado inicial y final.

Categoría del riesgo	Rango energía incidente (cal/cm ²)		Descripción propuesta para el riesgo	Estado Inicial		Estado Final	
	>	≤		Número Equipos	% de la instalación	Número de Equipos	% de la instalación
0	0	1,2	Bajo	50	16,4%	50	16,4%
1	1,2	4	Bajo	80	26,2%	80	26,2%
2	4	8	Bajo	40	13,1%	75	24,6%

3	8	25	Moderado	35	11,5%	55	18,0%
4	25	40	Alto	40	13,1%	35	11,5%
>4	40	-	Severo	60	19,7%	10	3,3%
Total				305	100,0%	305	100,0%

La columna de categorías del riesgo y descripción propuesta para el riesgo están asociadas con lo descrito en [20] y explicadas en el capítulo 1.

Los datos seleccionados muestran intencionalmente una mejora, lo cual puede evidenciarse gráficamente en la Figura 3-6 y la Figura 3-7.

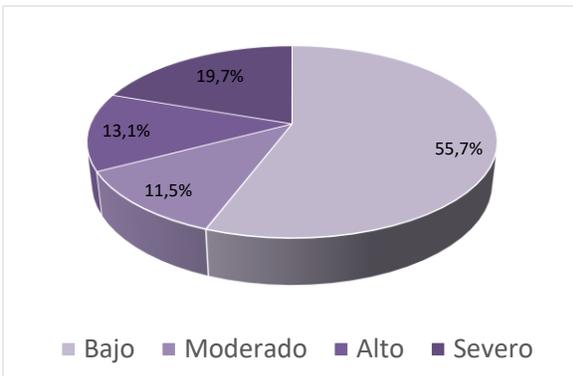


Figura 3-6: Distribución inicial de la energía incidente

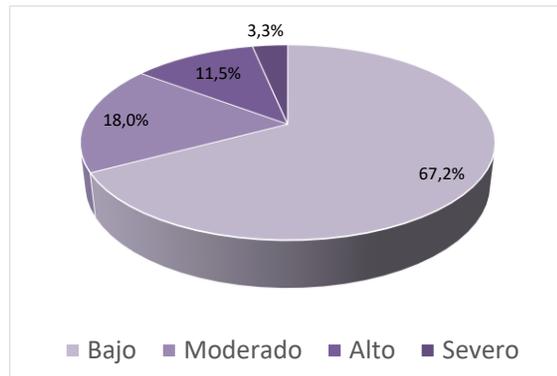


Figura 3-7: Distribución final de la energía incidente

La valoración del riesgo para cada empresas puede ser diferente en función de sus recursos económicos y las políticas asociadas con la seguridad industrial y la continuidad del proceso, por lo cual es posible que en una empresa solo con obtener la disminución del riesgo en un equipo sea suficiente para justificar la inversión en un esquema de protección adaptable, mientras que en otros casos será necesario tener una mejora en una cantidad alta de equipos para que por lo menos sea analizada la posibilidad de invertir en un esquema tal como el propuesto.

A continuación se describen los aspectos principales que deben ser analizados con el fin de determinar si existen las capacidades necesarias para realizar la implementación del esquema de protección adaptable.

3.4 Evaluación de capacidad de implementación

Una vez identificado que en la instalación industrial existen equipos con niveles de riesgo por arco eléctrico importantes y que es posible reducirlos con un esquema adaptable, debe determinarse si en los circuitos que alimentan los equipos de interés existen protecciones

con capacidades de adaptación. Tal como las presentadas en el capítulo 2, las protecciones modernas de sobrecorriente utilizadas a nivel industrial tiene algunas características que permiten el cambio de ajustes, siendo la de mayor viabilidad de implementación el cambio de grupo de ajuste mediante la activación de una entrada digital del relé, por lo tanto, para validar la posibilidad de implementar un esquema adaptable se debe verificar:

- Presencia de relés con capacidad de cambio de grupo de ajuste en los circuitos de los equipos de interés.
- Disponibilidad de entradas y salidas digitales en los relés de interés.
- Existencia de un sistema de control que permita monitorear las variables de las cuales dependerá el cambio de ajuste y automatizar el cambio de ajustes.
- Disponibilidad de contactos o instrumentación que permita monitorear el estado del sistema eléctrico, por ejemplo, posición de interruptores y arrancadores de motores.
- Disponibilidad de un módulo de entradas y salidas de un PLC conectado al sistema de control de la planta, el cual debe ser accesible desde la ubicación de los relés.

En las industrias modernas es normal encontrar que se cumplen estas características, especialmente en industrias donde se cuente con distribución interna en media tensión y motores con tensión nominal mayor a 1000 V. En la Tabla 3-7 se presentan voltajes nominales típicos utilizados para la fabricación de motores industriales [29].

Tabla 3-7: Tensiones nominales típicas en motores

Frecuencia	Tensiones nominales típicas en baja tensión	Tensiones nominales típicas en media tensión
60	460, 480, 575, 690	2300, 4000, 6600, 13200
50	380, 415, 690	3000, 3300, 6000, 11000

En Colombia y otras regiones con influencia americana es común encontrar que en las grandes industrias se tienen motores de 4 kV conectados en redes con tensión nominal 4,16 kV, en instalaciones de este tipo será frecuente contar con las capacidades suficientes para la implementación del esquema propuesto. Sin embargo, en instalaciones industriales pequeñas o de manufactura liviana donde todas las cargas se encuentran conectadas en baja tensión, un esquema de protección adaptable no es viable en la actualidad, dado que

no se utilizan relés y los interruptores operan con unidades de disparo, las cuales no cuentan a hoy con opción de cambio de ajustes remoto.

En caso de no existir las capacidades requeridas se pueden hacer las inversiones requeridas para obtenerlas, bien sea en instalaciones existentes o preverlas en la etapa de diseño de una instalación nueva, esta decisión depende tanto de un análisis económico como del beneficio obtenido en cuanto a la reducción del riesgo. Una vez se cuente con las capacidades requeridas se continúa con la etapa de implementación descrita a continuación.

3.5 Implementación

La implementación de un esquema de protección adaptable dependerá de las características y necesidades propias de cada industria. Sin embargo, se propone trabajar con un esquema básico que aprovecha las capacidades normalmente disponibles en las empresas con el fin de disminuir los costos de implementación, facilitando además el entrenamiento del personal y la operación y mantenimiento del sistema.

En términos generales, la opción de adaptación que se propone, utiliza un control centralizado que cambia el grupo de ajuste de las protecciones en función de los cambios de estado de los equipos de maniobra de la planta. Esto quiere decir que mediante los estados de los equipos de maniobra se puede deducir la topología del sistema y con base en el análisis de escenarios descrito en el numeral 3.2, modificar el grupo de ajustes de las protecciones con el fin de disminuir el riesgo de arco eléctrico.

En la Figura 3-8 se presenta la arquitectura básica del esquema de control, la cual puede tener tantos relés y equipos de maniobra como sea requerido.

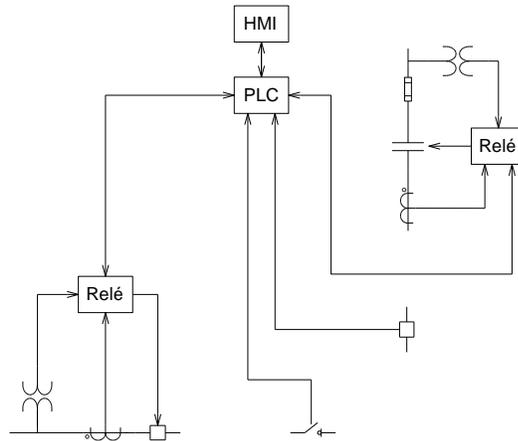


Figura 3-8: Arquitectura control del esquema adaptable

Los pasos básicos propuestos para la implementación del sistema de control son los siguientes:

3.5.1 Programar el sistema de control (Paso 1)

El punto de partida para la programación del sistema de control es el análisis realizado en 3.2, en el cual se deben identificar todos los estados que llevan a la activación de un grupo de ajuste en particular. Este análisis es fundamental, dado que un error en el mismo puede generar disparos indeseados en las protecciones al activar un grupo de ajuste más sensible que el requerido para las condiciones presentes en la planta. Un error en la selección del grupo de ajuste no debe generar una desprotección del sistema, dado que los grupos propuestos tienen ajustes que implican una disminución de los tiempos de operación de las protecciones respecto al Grupo de Ajuste 1.

Con el fin de generar una protección que evite malos funcionamientos por fallas en la comunicación los relés deben estar configurados para operar por defecto en el Grupo de Ajustes 1, de esta forma si se tiene una falla en el sistema de control o una pérdida de señal el relé quedará configurado con los ajustes fijos del primer grupo.

Como se presentó en la arquitectura del sistema de control, la programación será centralizada en un PLC, en el cual se verificará que se cumplan todas las condiciones de activación del grupo definidas en 3.2, adicionalmente es necesario contar con sistemas de bloqueo que desactiven el grupo ante condiciones específicas del sistema. Cada caso en particular requerirá la generación una lógica específica, sin embargo, a manera de ejemplo

se presentan los bloques lógicos asociados con la activación de un grupo, el cual cuenta con un bloqueo generado por el comando de arranque de un motor o el arranque de la función *Jam* de rotor bloqueado por atascamiento de la carga. Para la activación del grupo de ajustes se tendrán que definir tantas condiciones y bloqueos como sean necesarios.

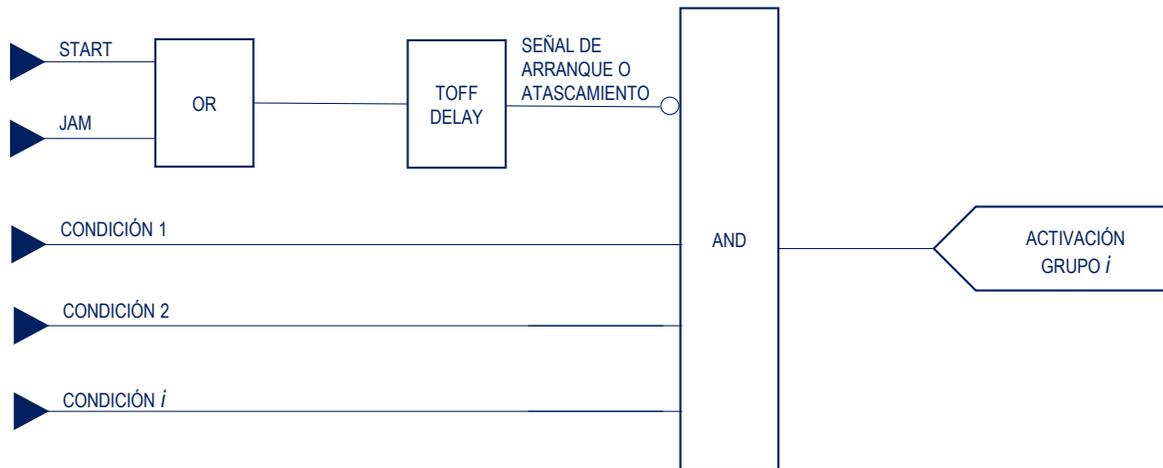


Figura 3-9: Lógica de activación grupo de ajuste

En la Figura 3-9 se presenta el bloqueo asociadas a un único motor, sin embargo, este conjunto debe repetirse para todos los motores asociados con el bloqueo de la activación del grupo de ajustes “*i*”.

3.5.2 Cableado de señales (Paso 2)

El cableado de señales se debe realizar cumpliendo con los estándares mínimos aplicables a un sistema de control, teniendo en cuenta que en cada caso el efecto que pueda tener la pérdida de una señal para implementar una lógica segura. En el caso de las señales de cambio de ajuste la pérdida de la señal debe generar que el relé quede configurado por defecto en el Grupo de Ajustes 1.

3.5.3 Programación del relé (Paso 3)

La programación del relé es un paso simple dado que se puede copiar el Grupo de Ajustes 1 y utilizarlo como base para los demás grupos de ajuste requeridos, modificando únicamente las funciones de sobrecorriente requeridas.

Dentro de la programación del relé se debe realizar la asignación de una entrada digital para la activación de cada grupo y por ejemplo en el caso de relés de motores asignar una salida que indique el arranque de la función de atascamiento (*Jam*).

En la Figura 3-10 se presenta la asignación de dos entradas digitales para activar dos grupos de un relé Multilin F60 de General Electric.

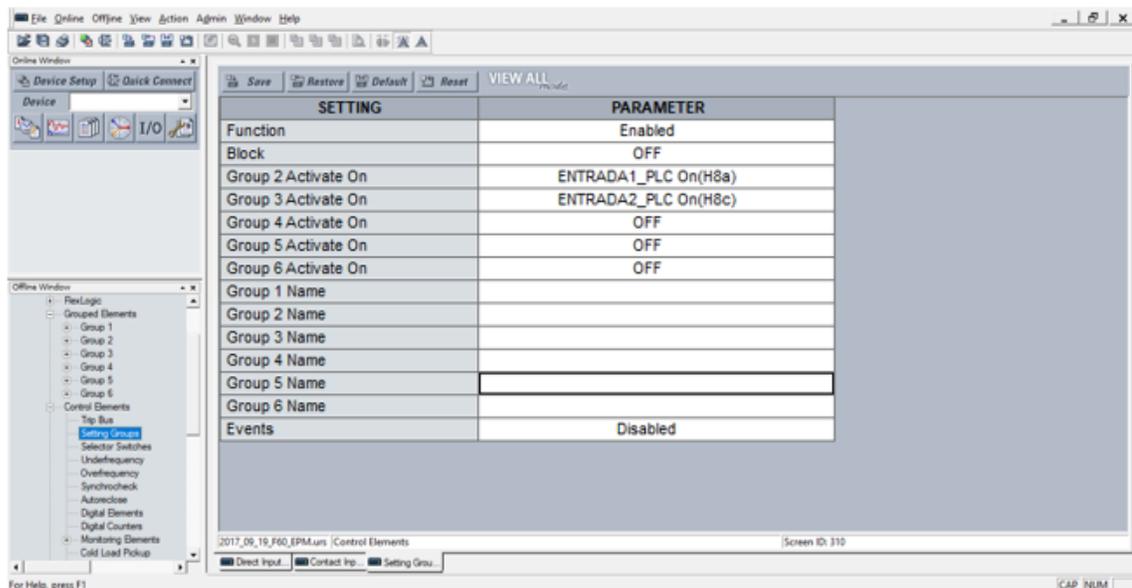


Figura 3-10: Grupos de ajustes relé Multilin F60

En el caso mostrado a manera de ejemplo el relé cuenta con seis grupos de ajuste, de los cuales se están utilizando tres grupos, el primero es el grupo por defecto y los grupos 2 y 3 se activan con las entradas provenientes del PLC.

3.5.4 Puesta en marcha (Paso 4)

Para la puesta en marcha del sistema es necesario realizar pruebas de inyección de los relés, las cuales deben permitir verificar la correcta operación de los mismos. Adicionalmente, se deben simular físicamente los escenarios con el fin de verificar la correcta operación de la lógica y del cableado.

Es posible aplicar un mecanismo de prueba, que permita monitorear inicialmente el comportamiento del sistema sin generar disparos de las protecciones. Esta verificación se puede realizar aprovechando la capacidad de algunos relés de tener varias funciones de protección duplicadas, por ejemplo algunos relés tienen tres funciones 50 y 51, con las

cuales puede simularse el comportamiento de los grupos, generando disparo por la operación de la primera función y alarma por la segunda, de esta forma puede verificarse si se presentan eventos de operación indeseada de las protecciones sin generar disparos de los interruptores.

4 Caso de estudio

Con el fin de aplicar la metodología planteada y observar el desempeño de la misma, se trabaja en un caso de estudio teórico, para el cual se aplican los tres primeros pasos de la *Metodología de evaluación e implementación de un sistema adaptable*, los cuales corresponden al *Cálculo inicial de energía incidente*, *Definición de ajustes adaptables* y *Verificación de reducción de energía incidente*. La *Evaluación de capacidad de implementación* no se realiza dado que los relés del sistema fueron seleccionados con las capacidades requeridas y la etapa de *Implementación* no aplica al ser un caso de estudio teórico.

4.1 Descripción del caso de estudio

Con el propósito de analizar los efectos de la metodología propuesta sobre un sistema eléctrico que cuente con características presentes en instalaciones industriales reales, el autor estructuró un modelo que cuenta con varios escenarios de operación, circuitos que combinan transformadores y motores con diversas potencias, así como varias fuentes de alimentación, reuniendo en un solo sistema múltiples combinaciones, lo cual no se alcanza totalmente con modelos como los presentados en las normas IEEE Std. 141, 242 y 399 [8], [9], [28].

El sistema objeto de estudio se muestra en la Figura 4-1, Este sistema es simulado en el software ETAP® con las características de los elementos presentadas en el ANEXO A, Tablas A1, A2, A3, A4 y A5. Las diferentes topologías de operación que se pueden obtener con el modelo permiten ilustrar la flexibilidad que se requiere en una gran industria para satisfacer en forma confiable la demanda de los procesos de producción. La industria analizada cuenta con una fuente de alimentación eléctrica proveniente de una red de distribución típica de 34,5 kV, la cual se conecta a un barraje desde el que se derivan dos líneas de producción, cada una de estas líneas cuenta con un transformador de 12 MVA

ONAF para reducir la tensión de 34,5 kV a 4,16 kV y alimentar, en cada caso, un barraje desde el que se derivan diferentes circuitos para suplir la demanda eléctrica de las cargas que hacen parte del proceso con las siguientes características.

Primera línea de producción (T_01): Desde el barraje principal de 4,16 kV de la primera línea de producción se derivan dos alimentadores principales y un motor de media tensión. Cada uno de los dos alimentadores llega a un barraje al que se conectan tres subalimentadores y dos motores de media tensión. Cada uno de los tres subalimentadores tiene un transformador de 4,16/0,48 kV y una carga concentrada que representa la demanda de baja tensión. Los motores, por su parte, cuentan con diferentes capacidades en cada alimentador.

Segunda línea de producción (T_02): En la segunda línea de producción se cuenta con una configuración similar a la que se tiene en la primera línea, pero en este caso hay un tercer alimentador en el cual se dispone de dos subalimentadores con transformadores reductores y de un generador de 1 MW, el cual resulta indispensable para atender las cargas críticas en momentos de contingencia en los cuales la alimentación desde la red externa sea suspendida bien sea por fallas o por labores de mantenimiento, en este escenario las cargas respaldadas son esencialmente iluminación, circuitos regulados de UPS y motores de sistemas críticos, no operan los motores de media tensión.

Para los relés se seleccionaron transformadores de corriente acordes con las características nominales de los circuitos a proteger. Las características de los diferentes elementos de protección empleados en el sistema simulado se presentan en los Anexos B, C y D.

El sistema objeto de estudio descrito, posee 3 modos o topologías de operación, denominados en adelante como escenarios, los cuales se describen a continuación:

Escenario 1: Es el escenario de operación normal, todas las cargas del sistema se encuentran energizadas, las dos líneas de producción operan con las barras 2_03 y 2_04 desacopladas. La alimentación proviene de la red de distribución externa U_01 y los transformadores T_01 y T_02 se encuentran energizados. La planta de respaldo G_01 se encuentra fuera de servicio, ver Figura 4-1.

Escenario 2: El sistema opera bajo los mismos parámetros que en el Escenario 1, con la diferencia de que en este caso el transformador T_02 se encuentra fuera de servicio y el transformador T_01 alimenta las barras 2_03 y 2_04, las cuales se encuentran acopladas con el interruptor Q_14 cerrado, ver Figura 4-2.

Escenario 3: En este caso, el sistema se encuentra desacoplado de la red de distribución externa, es decir, que la alimentación se realiza desde el generador de 1 MW. En este caso, solo se encuentran en servicio las cargas L_01, L_02, L_03, L_04, L_05, L_07, L_08, L_09, L_10, L_11, L_12, L_13 y L_14, las cuales operan a un 10% de su capacidad. En este escenario todos los motores de media tensión se encuentran fuera de servicio y únicamente se atienden cargas esenciales, ver Figura 4-3.

En los siguientes numerales se describen los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el capítulo 3.

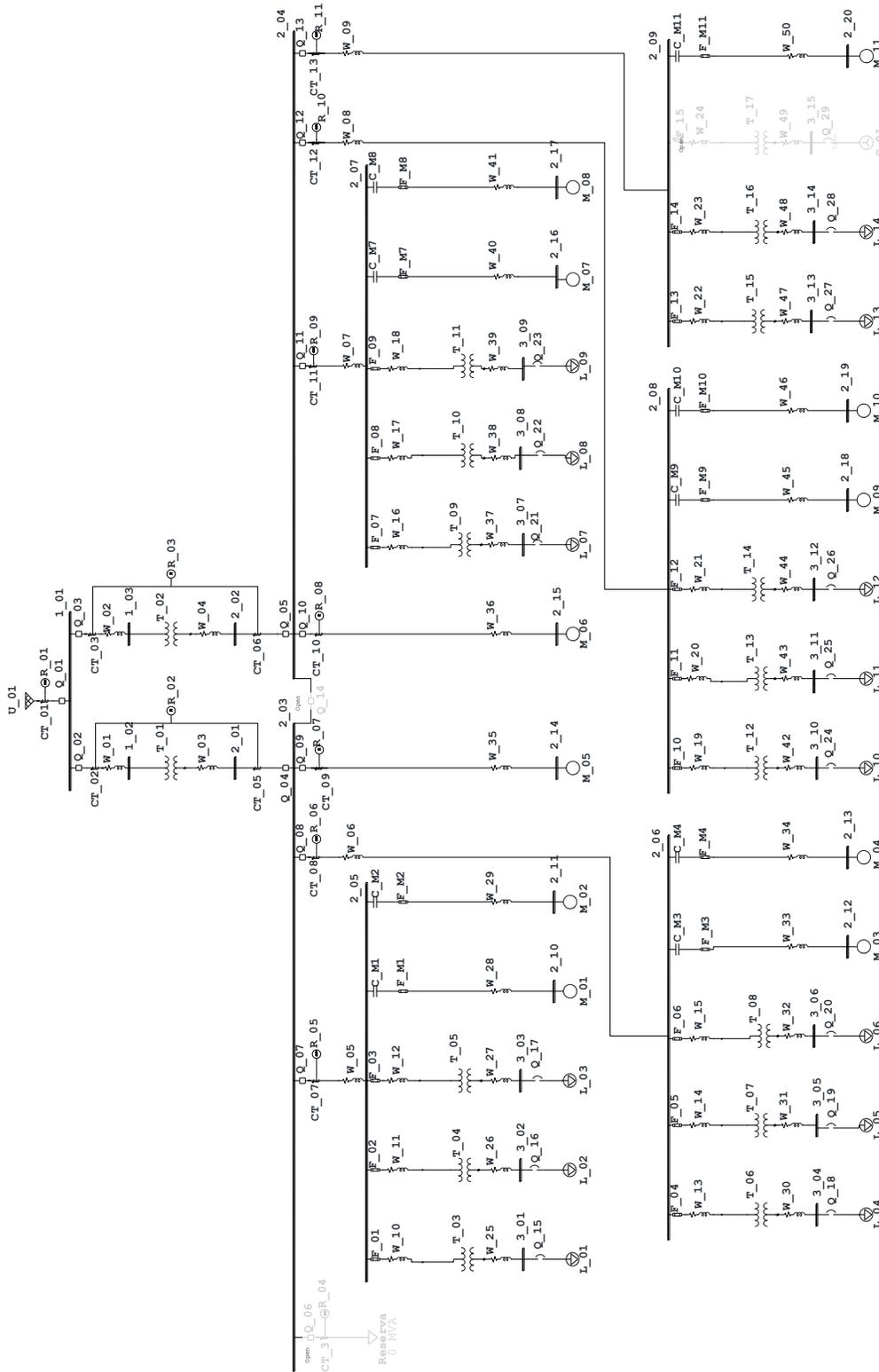


Figura 4-1: Diagrama unifilar del caso de estudio.

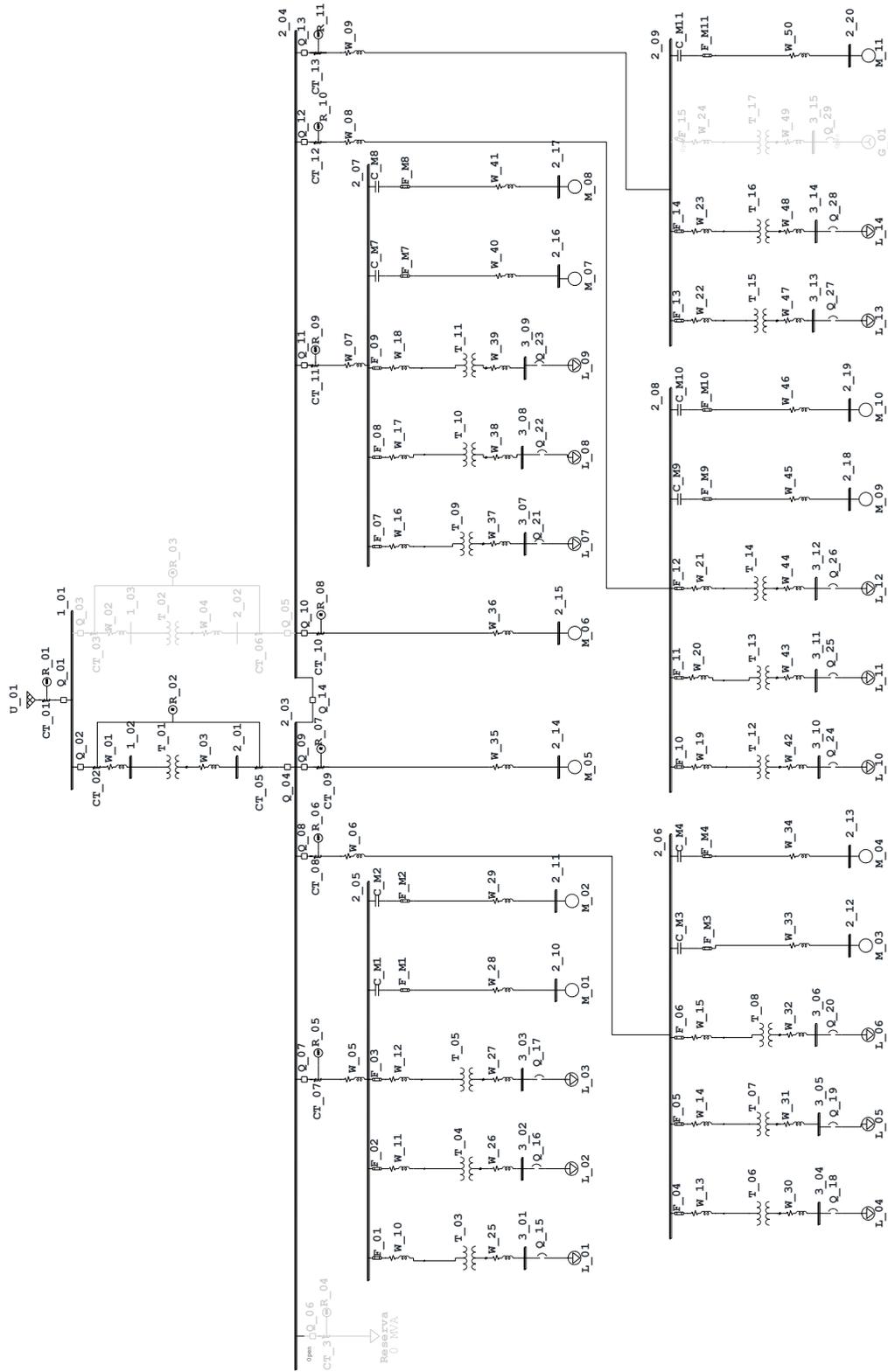


Figura 4-2: Diagrama unifilar del caso de estudio Escenario 2.

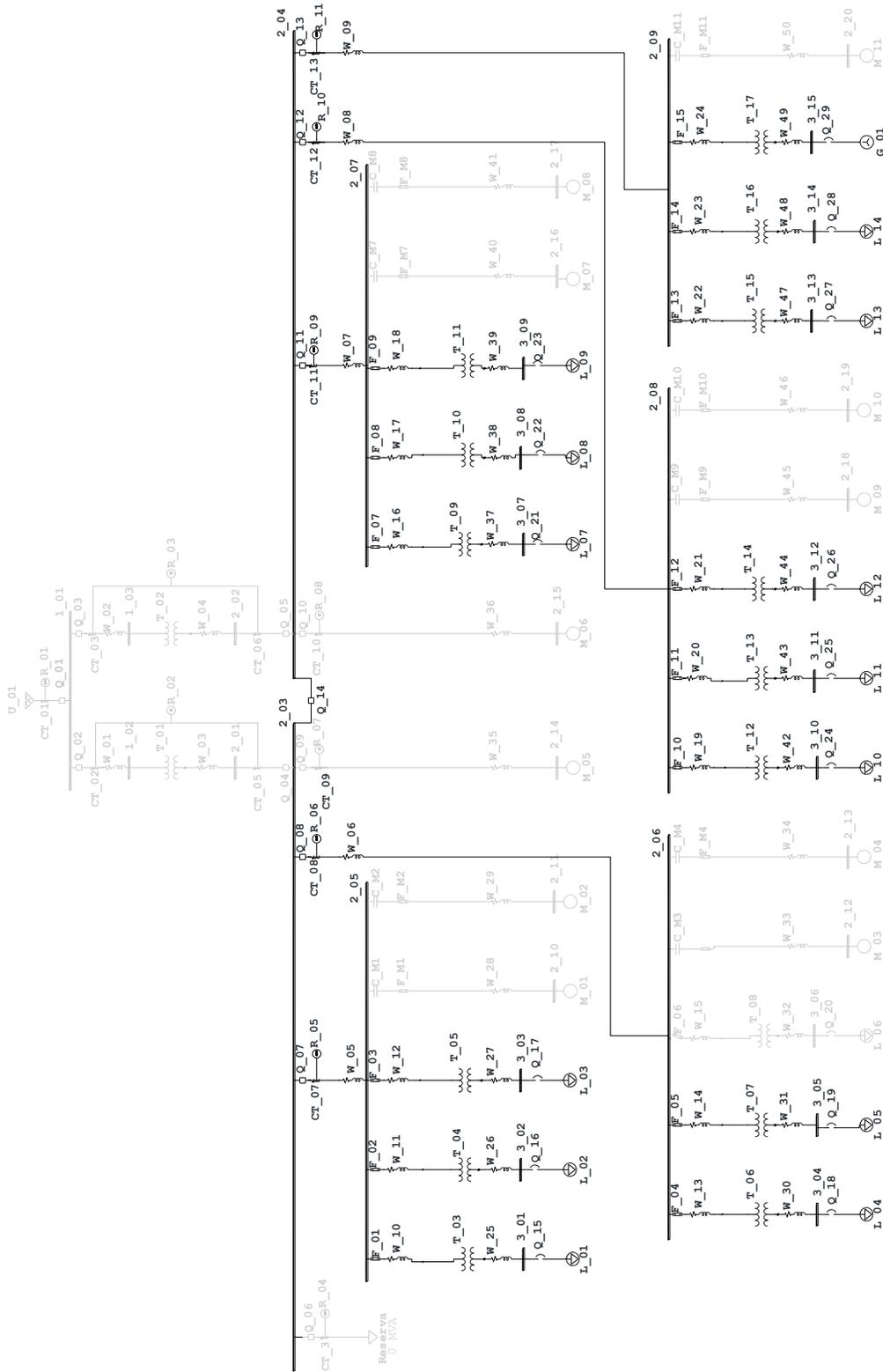


Figura 4-3: Diagrama unifilar del caso de estudio Escenario 3.

4.2 Cálculo inicial de energía incidente

Como se mostró en el numeral 3.1, la variable más importante para cuantificar el riesgo de arco eléctrico es la energía incidente, dado que de ella dependen las lesiones que puede sufrir una persona. Además, con base en esta se selecciona el equipo de protección personal y se define la frontera de peligro por arco eléctrico. Así pues, para evaluar la necesidad de implementar un sistema de protecciones adaptable, se debe determinar la magnitud de las energías incidentes a las que están sometidos los diferentes componentes de la instalación, usando un esquema de protecciones con ajustes fijos para diferentes escenarios de operación. De esta manera, es posible cuantificar los puntos en los cuales las energías incidentes poseen valores importantes y evaluar si ameritan la implementación de un sistema de protecciones que se adapte a los cambios operativos o de topología del sistema para reducir la energía incidente.

Siguiendo el procedimiento planteado en el numeral 3.1, se determinaron las energías incidentes de las barras del sistema usando los ajustes fijos para los tres escenarios que se describieron anteriormente. Los ajustes iniciales de las protecciones (Grupo 1 de ajustes) se definieron de acuerdo con los criterios planteados en el numeral 2.2 y se presentan en forma detallada en el Anexo C, debido a que el sistema es sólidamente conectado a tierra la magnitud de las fallas monofásicas y las trifásicas no difiere considerablemente y por lo tanto no es necesaria la habilitación de las funciones de sobrecorriente de tierra.

Los resultados obtenidos para el grupo de ajuste uno (G1) se resumen en la Tabla 4-1. Aunque es posible que una persona expuesta a un evento de arco eléctrico se retire de la fuente de calor antes de dos segundos [1] no se utiliza este criterio para calcular la energía incidente presentada en la Tabla 4-1, la cual se encuentra calculada teniendo en cuenta el tiempo total de despeje de falla.

Tabla 4-1: Energías incidentes grupo de ajustes 1.

Bus ID	Escenario 1 (cal/cm ²)	Escenario 2 (cal/cm ²)	Escenario 3 (cal/cm ²)
	Grupo 1 (G1)	Grupo 1 (G1)	Grupo 1 (G1)
1_02	16,1	16,0	-
1_03	16,1	-	-
2_01	2,5	3,0	-
2_02	2,7	-	-
2_03	11,6	13,8	38,2
2_04	12,4	13,8	38,2
2_05	3,8	4,4	31,3
2_06	3,8	4,4	38,5
2_07	4,1	4,4	38,5
2_08	4,1	4,5	38,5
2_09	3,4	3,7	114,3
2_10	0,1	0,1	-
2_11	0,2	0,3	-
2_12	1,0	0,9	-
2_13	0,3	0,3	-
2_14	3,0	3,3	-
2_15	7,3	7,7	-
2_16	0,5	0,4	-
2_17	0,1	0,1	-
2_18	0,3	0,3	-
2_19	0,3	0,3	-
2_20	0,3	0,3	-
3_01	1012,7	994,2	3239,8
3_02	2795,3	2705,2	309561,5
3_03	910,8	885,6	4349,3
3_04	1010,9	992,6	3236,7
3_05	2786,4	2697,7	249139,9
3_06	6067,9	5562,1	-
3_07	218,9	217,8	398,4
3_08	1005,2	994,8	3237,0
3_09	2757,6	2707,3	267575,5
3_10	218,8	217,7	398,4
3_11	1004,1	993,9	3237,0
3_12	2752,7	2703,0	267575,5
3_13	221,4	220,3	398,4
3_14	254,9	253,7	441,9
3_15	-	-	2535,1

Nota: En la Tabla 4-1 se utiliza el mismo código de colores aplicado en la Tabla 3-1.

La Tabla 4-2 presenta los resultados obtenidos con el grupo de ajustes 1 clasificando los equipos de acuerdo con la categoría del riesgo.

Tabla 4-2: Rangos de energía incidente grupo 1.

Cat. del riesgo	Rango energía incidente (cal/cm ²)		Descripción propuesta para el riesgo	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	>	≤		Número de Equipos activos	%	Número de Equipos activos	%	Número de Equipos activos	%
0	0	1,2	Bajo	9	25,00%	9	26,47 %	0	0,00%
1	1,2	4	Bajo	6	16,67%	3	8,82%	0	0,00%
2	4	8	Bajo	3	8,33%	5	14,71 %	0	0,00%
3	8	25	Moderado	4	11,11%	3	8,82%	0	0,00%
4	25	40	Alto	0	0,00%	0	0,00%	6	28,57 %
>4	40	-	Severo	14	38,89%	14	41,18 %	15	71,43 %
Total				36	100%	34	100%	21	100%

En la Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6, se presentan gráficamente los resultados obtenidos.

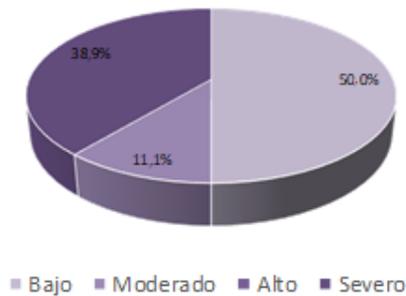


Figura 4-4: Distribución inicial de la energía incidente del Escenario 1.

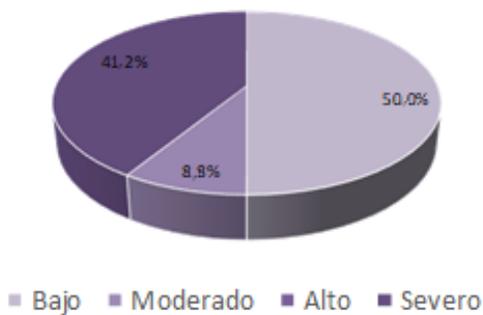


Figura 4-5: Distribución inicial de la energía incidente del Escenario 2.

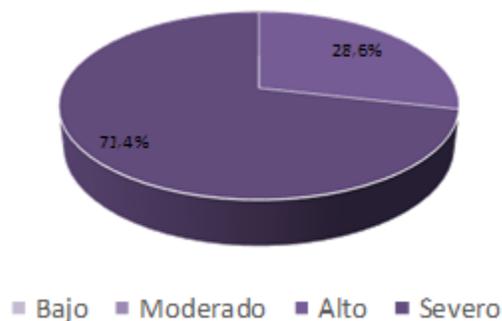


Figura 4-6: Distribución inicial de la energía incidente del Escenario 3.

Los resultados obtenidos para los escenarios 1 y 2 son similares, sin embargo en el caso del escenario 3 se presentan diferencias considerables, las cuales se deben a un cambio drástico en la magnitud de la potencia de corto circuito del sistema, generada por la operación con el generador de emergencia, adicionalmente, es importante tener en cuenta que el número de barras energizadas disminuye, lo cual genera que porcentualmente el número de equipos con riesgo severo sea mayor, dado que las barras donde se presentan las mayores energías incidentes continúan energizadas en el escenario 3.

Al analizar estos resultados de acuerdo con lo expuesto en 3.1 se concluye que el sistema tiene energías incidentes importantes y por lo tanto tiene sentido continuar con el proceso para llegar a la implementación de un esquema de protección adaptable.

4.3 Definición de ajustes adaptables

En los resultados detallados de energía incidente presentados en la Tabla 4-1 se puede observar que las barras que presentan mayores valores de energía incidente son las ubicadas en los secundarios de los transformadores, por lo cual los ajustes adaptables se enfocarán en obtener una reducción del riesgo en estos puntos.

Para las fallas ocurridas en el tramo comprendido entre los bujes secundarios de los transformadores y los bornes de entrada del interruptor principal de baja tensión se tienen altos tiempos de despeje de falla y por consiguiente altas energías incidentes. La razón de estos elevados tiempos de despeje de falla está asociada con el tipo de protección utilizada en los transformadores a nivel industrial, la cual está compuesta comúnmente por seccionadores fusibles, los cuales tienen características tiempo corriente que permiten

despejar rápidamente las fallas en media tensión, pero presentan altos tiempos de despeje para fallas secundarias, las cuales son de magnitudes relativamente bajas en media tensión debido a la relación de transformación de los transformadores.

La Figura 4-7 permite ilustrar el fenómeno de altos tiempos de despeje de falla en el secundario de los transformadores, en este caso la corriente de arco vista en el primario del transformador tiene una magnitud de 803 A, con los cuales el tiempo de despeje del fusible sería indeterminado, dado que la magnitud de la corriente no toca la curva de fusión del fusible. El interruptor principal de baja tensión no puede despejar la falla descrita, debido a que se presenta en baja tensión, pero aguas arriba de él. En este caso la protección de respaldo debe despejar la falla, pero tiene altos tiempos de operación tal como se observa en la Figura 4-8 y por consiguiente altas energías incidentes.

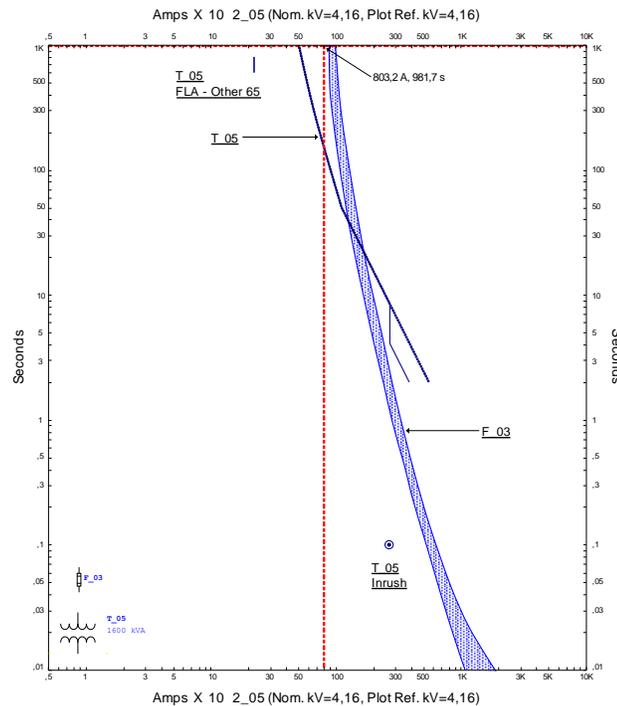


Figura 4-7: Fusible protección transformador T_05.

Dado que los resultados obtenidos en los escenarios 1 y 2 del caso de estudio son similares, puede plantearse una alternativa de solución que sea aplicable a ambos escenarios, la cual consiste en configurar las protecciones de los alimentadores de media tensión de tal forma que operen más rápidamente como protección de respaldo a los fusibles de los transformadores, conservando selectividad con los fusibles para fallas de media tensión, siendo igualmente selectivas con el interruptor principal de baja tensión,

operando más rápido que el fusible para fallas ocurridas entre los bujes de baja tensión de los transformadores y la entrada del interruptor principal de baja tensión. Con ajustes fijos de las protecciones normalmente no se puede lograr esta forma de operación, dado que los ajustes están limitados por las corrientes de arranque de los motores de media tensión, las cuales tienen magnitudes altas durante el arranque y en caso de no ser tenidas en cuenta para la configuración de las protecciones se puede generar el disparo indeseado de las mismas.

La capacidad de adaptación disponible en los grupos de ajuste de los relés, permite en este caso disminuir el riesgo, al utilizar dos grupos de ajuste, un primer grupo configurado con los ajustes por defecto obtenidos al aplicar los criterios plasmados en el capítulo 2, con el cual se obtienen altas energías incidente en los secundarios de los transformadores y un segundo grupo de ajuste que estaría activo mientras no se presente arranque de los motores de media tensión, de esta forma el segundo grupo de ajuste está activo la mayor parte del tiempo, dado que por limitaciones térmicas el arranque de los motores de media tensión normalmente está restringido a alrededor de tres arranques por hora. La efectividad de la solución propuesta depende de múltiples variables y por lo tanto será exitosa en algunos casos y en otros no, tal como se puede ver más adelante en el numeral 4.4.

En la Figura 4-8 se presenta a manera de ejemplo el caso del alimentador asociado con el relé R_05, donde el grupo de ajuste 1 permite el arranque simultáneo de los motores M_01 y M_02 y opera como protección de respaldo para el fusible F_03, despejando la falla generada por un arco eléctrico en el secundario del transformador T_05 en 64 s. Un segundo grupo de ajustes estaría activo luego de que los motores estén en marcha, este segundo grupo de ajustes cuenta con una característica de operación más rápida que permite despejar la misma corriente de falla en un segundo aproximadamente.

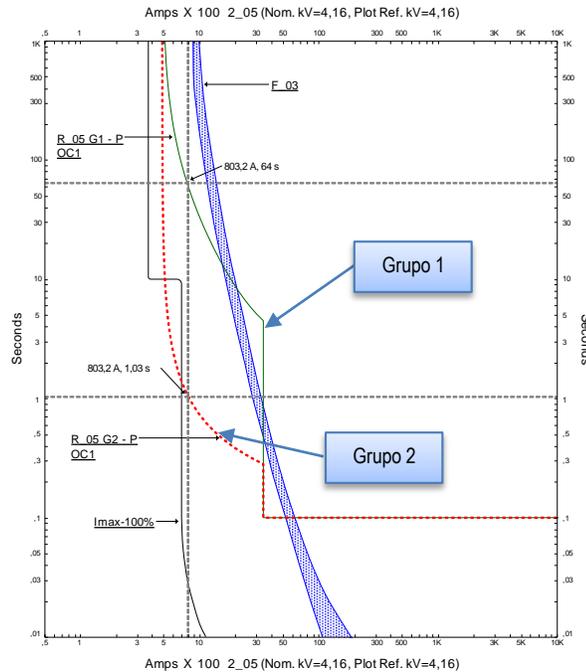


Figura 4-8: Tiempos de despeje con grupos 1 y 2.

En este caso los 100 ms de retardo aplicados a la función 50 del relé permiten que los fusibles ubicados aguas abajo despejen las fallas de media tensión ocurridas en el primario de los transformadores T_03, T_04 y T_05, dado que la magnitud de las mismas es mayor a la obtenida en el punto de cruce de las curvas del relé y el fusible del transformador T_05, 6 kA aproximadamente.

La estrategia descrita es aplicada para la definición de un segundo grupo de ajustes en todos los alimentadores que cuentan transformadores, este segundo grupo será utilizado tanto en el escenario uno como en el escenario dos. Los criterios aplicados para el ajuste de las protecciones del grupo 2 son los presentados en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Criterios de ajuste grupo 2.

Función	Parámetro	Descripción del criterio
51P Sobrecorriente de fase	<i>Pickup</i>	Se conserva en el mismo valor del grupo 1.
	<i>Delay</i>	El <i>Delay</i> de la función 51 se disminuye hasta donde sea posible sin perder la selectividad con los interruptores principales de baja tensión.
	<i>Curva</i>	La curva de la función 51 pasa de <i>ANSI Very Inverse</i> a <i>ANSI Moderately Inverse</i> .
50P Sobrecorriente instantánea de fase	<i>Pickup</i>	Continúa con los mismos ajustes que en el grupo 1.
	<i>Delay</i>	Continúa con los mismos ajustes que en el grupo 1.

Para el escenario 3 se presenta el mismo fenómeno asociado con los fusibles, pero como se verá en el numeral 4.4 el segundo grupo de ajuste no ayuda en este escenario a disminuir el riesgo. Debido a que la fuente de alimentación de la industria para el escenario 3 es el generador de emergencia, los flujos de carga y niveles de corto circuito presentan una importante disminución. En este caso los ajustes de los grupos de ajuste 1 y 2 son muy elevados y no permiten detectar con facilidad las fallas. Por esta razón se debe plantear un tercer grupo de ajuste que se adapte a las características del sistema durante la operación con el generador de emergencia, tal como se ilustra en la Figura 4-9.

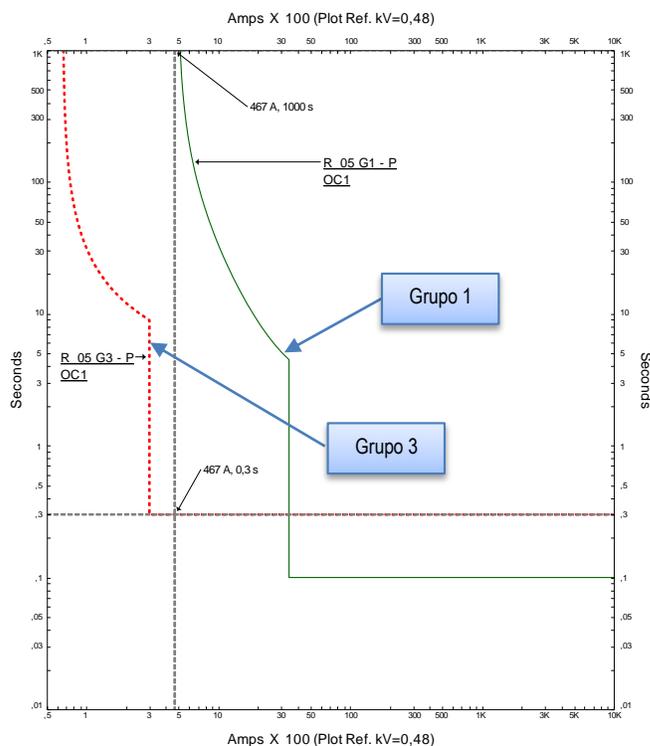


Figura 4-9: Tiempos de despeje con grupos 1 y 3.

Con los ajustes propuestos para el relé R_05 se pasa en el escenario 3 de una condición en la cual no se detecta la falla a tener un tiempo de despeje del orden de 300 ms.

Al igual que en el caso del grupo 2 de ajustes se aplica la estrategia de habilitar el grupo de ajustes 3 en todos los alimentadores con transformadores. Los criterios de ajuste aplicados para programar las protecciones en el grupo de ajuste 3 son los presentados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Criterios de ajuste grupo 3.

Función	Parámetro	Descripción
51P Sobrecorriente de fase	<i>Pickup</i>	Se define con base en el flujo de carga del escenario 3, ajustándolo en el 125% de la demanda de cada alimentador. Para el caso de estudio todas las cargas concentradas de baja tensión operan en el escenario 3 a un 10% de su capacidad.
	<i>Delay</i>	Continúa con los mismos ajustes que en el grupo 1.
	<i>Curva</i>	Continúa con los mismos ajustes que en el grupo 1.
50P Sobrecorriente instantánea	<i>Pickup</i>	Se ajusta en el 176% de máxima corriente de arranque en cada alimentador, la cual en el caso de estudio corresponde al arranque de un motor equivalente al 50% de la carga del alimentador con una corriente de rotor bloqueado del 650 %.
	<i>Delay</i>	Pasa a 300 ms con el fin de evitar disparos por eventos transitorios y magnetización de transformadores.

La activación o no de un grupo de ajuste depende de las condiciones de operación del sistema, para el sistema modelado estas condiciones son equivalentes para todos los alimentadores.

Las condiciones para activación y bloqueo de los grupos de ajuste son presentadas en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Condiciones de activación y bloqueo.

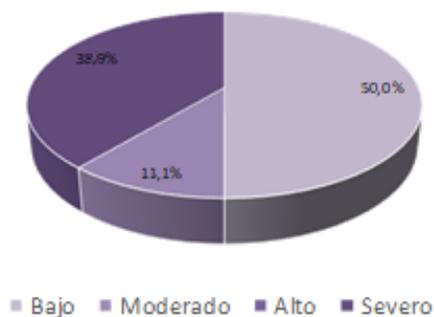
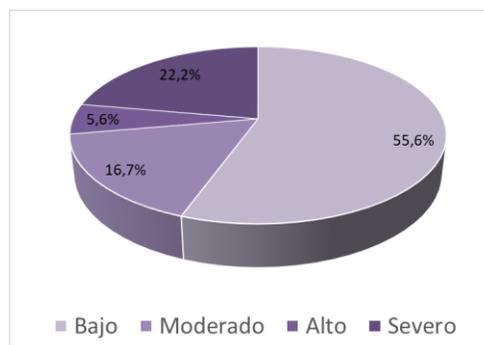
	Grupo de ajuste 1	Grupo de ajuste 2	Grupo de ajuste 3
Condiciones	-	* Generador fuera de servicio Q_29 Abierto * Red externa en servicio Q_01 Cerrado	* Generador operando Q_29 Cerrado * Red externa fuera de servicio Q_01 Abierto
Bloqueo	* Grupo 2 Activado * Grupo 3 Activado	* Arranque de motores de media tensión en el alimentador * Activación del <i>pickup</i> de la protección <i>Jam</i> asociado con alguno de los motores de media tensión del alimentador.	-

4.4 Verificación de reducción de energía incidente

Luego de implementar los ajustes adaptables definidos en el numeral 4.2, se obtuvieron mediante simulación en el software ETAP® los resultados que se presentan a continuación para los diferentes escenarios.

Tabla 4-6: Rangos de energía incidente Escenario 1 (E1).

Cat. Del riesgo	Rango energía incidente (cal/cm ²)		Descripción propuesta para el riesgo	Grupo ajustes 1 (G1)		Grupo ajustes 2 (G2)	
	>	≤		Número de Equipos activos	%	Número de Equipos activos	%
0	0	1,2	Bajo	9	25,00%	9	25,00%
1	1,2	4	Bajo	6	16,67%	9	25,00%
2	4	8	Bajo	3	8,33%	2	5,56%
3	8	25	Moderado	4	11,11%	6	16,67%
4	25	40	Alto	0	0,00%	2	5,56%
>4	40	-	Severo	14	38,89%	8	22,22%
Total				36	100,00%	36	100,00%

**Figura 4-10:** Distribución inicial de la energía incidente E1-G1.**Figura 4-11:** Distribución final de la energía incidente E1-G2.**Tabla 4-7:** Rangos de energía incidente Escenario 2 (E2).

Cat. Del riesgo	Rango energía incidente (cal/cm ²)		Descripción propuesta para el riesgo	Grupo ajustes 1 (G1)		Grupo ajustes 2 (G2)	
	>	≤		Número de Equipos activos	%	Número de Equipos activos	%
0	0	1,2	Bajo	9	26,47%	9	26,5%
1	1,2	4	Bajo	3	8,82%	6	17,65%
2	4	8	Bajo	5	14,71%	4	11,76%
3	8	25	Moderado	3	8,82%	5	14,71%
4	25	40	Alto	0	0,00%	2	5,88%
>4	40	-	Severo	14	41,18%	8	23,53%
Total				34	100%	34	100%

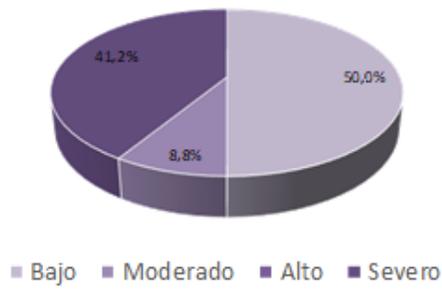


Figura 4-12: Distribución inicial de la energía incidente E2-G1.

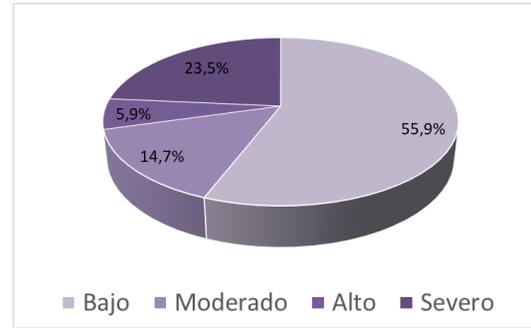


Figura 4-13: Distribución final de la energía incidente E2-G2.

Tabla 4-8: Rangos de energía incidente Escenario 3 (E3).

Cat. Del riesgo	Rango energía incidente (cal/cm²)		Descripción propuesta para el riesgo	Grupo de ajustes 1 (G1)		Grupo de ajustes 2 (G2)		Grupo de ajustes 3 (G3)	
	>	≤		Número de Equipos activos	%	Número de Equipos activos	%	Número de Equipos activos	%
0	0	1,2	Bajo	0	0,0%	6	28,6%	7	33,3%
1	1,2	4	Bajo	0	0,0%	0	0,0%	8	38,1%
2	4	8	Bajo	0	0,0%	0	0,0%	1	4,8%
3	8	25	Moderado	0	0,0%	1	4,8%	1	4,76%
4	25	40	Alto	6	28,6%	0	0,0%	1	4,8%
>4	40	-	Severo	15	71,4%	14	66,67%	3	14,3%
Total				21	100,0%	21	100,0%	21	100,0%

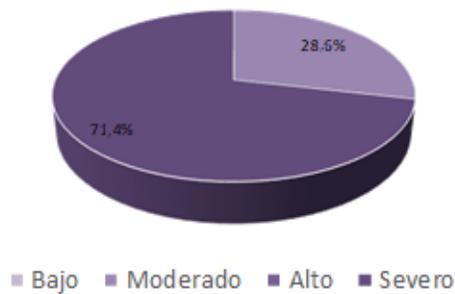


Figura 4-14: Distribución inicial de la energía incidente E3-G1.

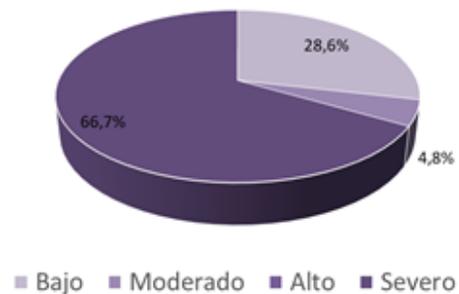


Figura 4-15: Distribución inicial de la energía incidente E3-G2.

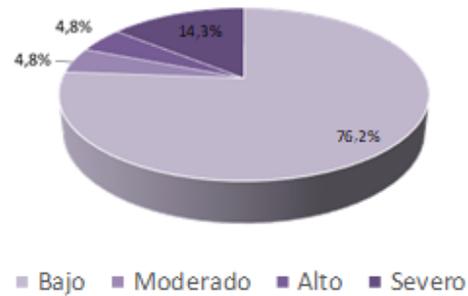


Figura 4-16: Distribución inicial de la energía incidente E3-G3.

4.4.1 Análisis de resultados

En la Tabla 4-9 se consolidan los resultados obtenidos para todos los escenarios utilizando el código de colores definido en la Tabla 3-1, lo cual se hace con el fin de facilitar el análisis de los resultados. El análisis se realiza inicialmente de forma particular, observando los casos en los cuales se obtienen mejoras, luego se analizan los resultados desde un punto de vista global, observando los cambios del sistema en todo su conjunto.

Tabla 4-9: Energía incidente para todos los escenarios y grupos de ajuste.

Bus ID	Escenario 1 (cal/cm ²)		Escenario 2 (cal/cm ²)		Escenario 3 (cal/cm ²)		
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G3
1_02	16,1	16,1	16,0	16,0	-	-	-
1_03	16,1	16,1	-	-	-	-	-
2_01	2,5	2,5	3,0	3,0	-	-	-
2_02	2,7	2,7	-	-	-	-	-
2_03	11,6	11,6	13,8	13,8	38,2	0,5	0,9
2_04	12,4	12,4	13,8	13,8	38,2	0,5	0,9
2_05	3,8	3,8	4,4	4,4	31,3	0,5	0,7
2_06	3,8	3,8	4,4	4,4	38,5	0,5	0,7
2_07	4,1	4,1	4,4	4,4	38,5	0,5	0,7
2_08	4,1	4,1	4,5	4,5	38,5	0,5	0,7
2_09	3,4	3,4	3,7	3,7	114,3	114,3	0,9
2_10	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-
2_11	0,2	0,2	0,3	0,3	-	-	-
2_12	1,0	1,0	0,9	0,9	-	-	-
2_13	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-	-
2_14	3,0	3,0	3,3	3,3	-	-	-

Bus ID	Escenario 1 (cal/cm ²)		Escenario 2 (cal/cm ²)		Escenario 3 (cal/cm ²)		
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G3
2_15	7,3	3,5	7,7	3,7	-	-	-
2_16	0,5	0,5	0,4	0,4	-	-	-
2_17	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-
2_18	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-	-
2_19	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-	-
2_20	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-	-
3_01	1012,7	1012,7	994,2	994,2	3239,8	3239,8	65,8
3_02	2795,3	39,6	2705,2	37,5	309561,5	725,7	3,6
3_03	910,8	18,1	885,6	17,9	4349,3	13,9	4,7
3_04	101,9	1010,9	992,6	992,6	3236,7	3236,7	2,5
3_05	2786,4	2786,4	2697,7	2697,7	249139,9	584,7	3,6
3_06	6067,9	34,2	5562,1	32,1	-	-	-
3_07	218,9	218,9	217,8	217,8	398,4	398,4	25,9
3_08	1005,2	1005,2	994,8	994,8	3237,0	3237,0	2,5
3_09	2757,6	20,9	2707,3	20,3	267575,5	627,7	3,6
3_10	218,8	218,8	217,7	217,7	398,4	398,4	1,5
3_11	1004,1	1004,1	993,9	993,9	3237,0	3237,0	2,5
3_12	2752,7	56,6	2703,0	49,5	267575,5	627,7	3,6
3_13	221,4	3,5	220,3	3,5	398,4	398,4	398,4
3_14	254,9	3,7	253,7	3,7	441,9	441,9	441,9
3_15	-	-	-	-	2535,1	2535,1	17,3

Nota: En la Tabla 4-9 se utiliza el mismo código de colores aplicado en la Tabla 3-1.

Los escenarios 1 y 2 presentan resultados similares, en ambos casos se obtienen mejoras al aplicar el grupo 2 de ajustes en los relés. En ambos escenarios se observa que las barras donde se obtienen mejoras más significativas son los secundarios de los transformadores, sin embargo, no en todos los casos se obtienen mejoras. Las reducciones de la energía incidente se lograron de una forma más significativa en los transformadores de mayor potencia de cada uno de los alimentadores, en todos se logró tener una reducción significativa de la energía incidente, aunque en el caso de la barra 3_12 la energía incidente no bajó de la categoría de riesgo de severo si se logró una disminución significativa, al pasar de 2753 cal/cm² a 56,6 cal/cm² y de 2703 cal/cm² a 49,5 cal/cm² en los escenarios 1 y 2 respectivamente.

El fenómeno observado se debe a que el ajuste de la protección 51 del relé principal de cada alimentador está condicionado a la máxima corriente de carga que fluye por el circuito, lo cual genera que las corrientes de arco de los secundarios de los

transformadores de menor potencia sean inferiores que el *pickup* de la protección 51 y por lo tanto sea inefectivo para estos casos la modificación del *delay* en el segundo grupo de ajuste.

En el escenario 3 las corrientes de los flujos de carga disminuyen considerablemente debido a que el generador de emergencia no tiene la suficiente capacidad para suplir toda la demanda y únicamente quedan conectadas las cargas críticas, lo cual permite que el *pickup* de la función 51 del grupo 3 de ajustes disminuya considerablemente, obteniendo mejores resultados que para los escenarios 1 y 2. Sin embargo, las reducciones menos notorias corresponden a los secundarios de los transformadores con menor capacidad de cada alimentador, siendo coincidente con lo ocurrido en los otros dos escenarios. En las barras 3_13 y 3_14 no se presenta mejora debido a que no hay un relé que pueda despejar las fallas alimentadas desde el mismo circuito por el generador de emergencia.

Para realizar un análisis global del sistema se podría utilizar un promedio aritmético de las energías incidentes, sin embargo, este promedio no representaría adecuadamente el riesgo de la instalación, dado que un solo equipo con una alta energía incidente desviaría el promedio. Con el propósito de eliminar el efecto de las altas energías incidentes, se propone el *Indicador de energía incidente del sistema* el cual se calcula aplicando la ecuación (4.1), para este indicador se asigna un valor promedio de energía incidente para cada categoría de riesgo, con un valor propuesto de 70 cal/cm² para el riesgo severo, en las demás categorías de riesgo se toma el valor medio del rango el cual se consigna en la columna 2 de la Tabla 4-10.

$$IES = \frac{\sum_{i=0}^5 Neq(i) \times Epr(i)}{Nteq} \quad (4.1)$$

La Tabla 4-10 presenta los resultados obtenidos al calcular el *Indicador de energía incidente del sistema* donde se puede observar que a nivel global del sistema se obtiene mejora en todos los escenarios con el esquema de protección adaptable.

Tabla 4-10: Indicador de energía incidente del sistema.

Cat. Del riesgo	<i>Epr</i>	Escenario 1 (cal/cm ²)		Escenario 2 (cal/cm ²)		Escenario 3 (cal/cm ²)		
		G1	G2	G1	G2	G1	G2	G3
0	0,6	9	9	9	9	0	6	7
1	2,6	6	9	3	6	0	0	8
2	6,0	3	2	5	4	0	0	1
3	16,5	4	6	3	5	0	1	1
4	32,5	0	2	0	2	6	0	1
>4	70,0	14	8	14	8	15	14	3
Número de barras (Nteq)		36	36	34	34	21	21	21
Indicador <i>E</i> del sistema (IEs)		30,1	21,2	31,6	22,1	59,3	47,6	13,8

Los resultados permiten verificar que tanto desde el punto de vista individual de algunos equipos, como desde el punto de vista global del sistema los ajustes adaptables permiten la reducción de la energía incidente en todos los escenarios de operación del sistema.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Con la revisión de las características de las protecciones eléctricas utilizadas a nivel industrial, la metodología de adaptación planteada y su implementación en un caso de estudio se cumplió con los objetivos del proyecto, llegando a las siguientes conclusiones:

- Los accidentes por arco eléctrico son eventos severos que pueden generar importantes pérdidas humanas y económicas. Tienen la mayor probabilidad de ocurrencia cuando una persona interactúa con equipos eléctricos energizados, lo cual incrementa las lesiones por la cercanía de las personas a la fuente de energía liberada por la falla.
- Los parámetros que tienen un mayor impacto en la magnitud de la energía incidente son la corriente de falla y los tiempos de operación de las protecciones. Sobre el cambio de magnitud en las corrientes de falla no se puede actuar normalmente, dado que sus modificaciones dependen de cambios topológicos de la red que son necesarios durante la operación del sistema. Sin embargo, si es posible controlar los tiempos de despeje de falla, lo cual se logra al optimizar el funcionamiento de las protecciones de sobre corriente, sin embargo, al realizar los estudios de coordinación de protecciones a nivel industrial, no se da en todos los casos prioridad a la reducción de estos tiempos, debido que en buena parte los criterios de ajuste se basan en conceptos de la era de los relés electromecánicos más orientados a la protección de los equipos que de las personas.
- Los cambios topológicos de un sistema eléctrico industrial que tienen un mayor impacto en el tiempo de operación de las protecciones y consecuentemente en la energía incidente liberada en un arco eléctrico, son los asociados con el arranque de

motores, la energización de transformadores y la operación con fuentes alternas de alimentación.

- Es fundamental que las empresas trabajen implementando medidas de protección para las personas frente al arco eléctrico, las cuales pueden ser pasivas y activas tanto pre ignición como post ignición, esto con el propósito de obtener la mayor mitigación posible del riesgo. El presente trabajo brinda herramientas que pueden contribuir a la disminución del riesgo mediante la disminución de los tiempos de operación de las protecciones constituyéndose en una medida activa post ignición.
- La opción más viable de implementación de un sistema automático es el uso de los grupos de ajuste, los cuales están presentes en la mayoría de los relés y tienen la ventaja de que en la implementación de un sistema automático se pueden aprovechar capacidades normalmente disponibles en las empresas, con el fin de disminuir los costos de implementación, facilitando además el entrenamiento del personal, la operación y el mantenimiento del sistema y permitiendo finalmente que el esquema sea aplicado tanto a instalaciones nuevas como existentes.
- En todas las instalaciones industriales no es posible o necesario implementar un esquema de protección adaptable para la reducción de la energía incidente por arco eléctrico, por lo cual se requiere evaluar la necesidad y viabilidad de la implementación del esquema de protección adaptable para cada caso.
- La clasificación propuesta en el numeral 3.1 permite cuantificar el riesgo por arco eléctrico de una instalación completa, identificando la distribución de los equipos con riesgo bajo, moderado, alto y severo. Esta cuantificación es una herramienta fundamental para determinar si es necesaria la implementación de un esquema adaptable y si con la implementación del mismo se obtienen reducciones reales del riesgo. La necesidad del esquema aplica cuando se tengan equipos con riesgo entre moderado y severo. En el caso de encontrar que todos los equipos tienen un riesgo bajo no sería necesario continuar con el proceso para implementar un esquema de protección adaptable, dado que con su implementación no se obtendrían mejoras significativas.

-
- El punto central de la metodología propuesta consiste en identificar equipos donde los ajustes fijos de las protecciones no garantizan un adecuado control de la energía incidente por arco eléctrico, pero existen, bajo ciertas condiciones, ajustes alternativos que pueden disminuir los tiempos de operación de las protecciones sin generar disparos indeseados.
 - Para la determinación de la máxima energía incidente en los equipos es necesario evaluar distintos escenarios, dado que el valor máximo se puede presentar durante la operación normal del sistema o estar presentes durante espacios cortos de tiempo generados por cambios en el sistema eléctrico.
 - La implementación de un esquema de protección adaptable no depende únicamente de que exista la necesidad del mismo, es necesario verificar que con el esquema se obtendrá una reducción de la energía incidente y evaluar que existan las capacidades para su implementación.
 - Cada empresa es diferente y tendrá una valoración del riesgo particular, la cual depende de aspectos como su cultura, recursos económicos y las políticas asociadas con la seguridad industrial y la continuidad del proceso.
 - Cuando no existen las capacidades requeridas para la implementación se pueden hacer las inversiones necesarias para obtenerlas, esta decisión depende tanto de un análisis económico como del beneficio obtenido en cuanto a la reducción del riesgo.
 - A nivel industrial uno de los puntos con mayor riesgo por arco eléctrico es el secundario de los transformadores en el tramo ubicado antes de la protección principal de baja tensión, esto es debido a que en este punto la falla debe ser despejada por los fusibles ubicados en el primario del transformador, los cuales tienen altos tiempos de despeje para dichas fallas. Esta conclusión es validada por los resultados obtenidos en el caso de estudio y presentados en la Tabla 4-1, donde se puede observar que las barras que presentan mayores valores de energía incidente son las ubicadas en los secundarios de los transformadores.
 - Para el caso de estudio, el ajuste estático de las protecciones presenta deficiencias en el control del riesgo de arco eléctrico, específicamente en el secundario de los

transformadores para todos los escenarios de operación y en algunas barras adicionales para el escenario 3 (operación con generador de emergencia).

- En el caso de estudio la implementación de un sistema adaptable de protección permite reducir los niveles de energía incidente liberados durante fallas que no son despejadas rápidamente con los ajustes convencionales y estáticos. Aunque en general el riesgo de la instalación disminuye, no en todos los equipos es posible obtener mejoras, en caso de los transformadores se observó que para los transformadores de mayor potencia se obtienen mejores resultados. Los resultados fueron obtenidos al implementar dos grupos de ajuste adicionales al fijo, los cuales se adaptan a las condiciones de carga del sistema para cada escenario de operación y se activan dependiendo del estado del sistema y los comandos de arranque de motores con el fin de evitar disparos indeseados.
- El Indicador propuesto de energía incidente del sistema permite evaluar numéricamente el riesgo por arco eléctrico de una instalación, evidenciando además las mejoras que se obtienen al implementar un esquema de protección como el propuesto. Para el caso de estudio, el indicador de energía incidente del sistema tiene en el escenario 3 de operación un valor de $59,3 \text{ cal/cm}^2$ (Riesgo Severo) con el grupo de ajuste fijo y baja a $13,8 \text{ cal/cm}^2$ (Riesgo moderado) con el grupo de ajuste 3.

5.2 Recomendaciones

El manejo del riesgo por arco eléctrico se debe visualizar como una tarea integral que busque reducir al máximo la severidad de los eventos, acompañando esta actividad de una cultura de seguridad tendiente a disminuir la ocurrencia y la generación de medidas de protección que permitan proteger adecuadamente a las personas y equipos en los casos en los cuales ocurra el accidente.

El presente trabajo plantea una más de las medidas que se puede implementar para minimizar el riesgo, pero no debe visualizarse como la única salida para disminuirlo, por ejemplo en puntos críticos como los secundarios de los transformadores se podrían utilizar protecciones diferenciales, lo cual es cada vez más viable debido a la disminución de los costos de los relés y las celdas de interruptores en vacío, logrando disminuir notoriamente el riesgo por arco eléctrico.

Debe tenerse en cuenta que en una planta industrial con un esquema de protección adaptable el valor de energía incidente varía en el tiempo, por lo cual la señalización y las medidas de protección deben seleccionarse para el peor de los casos.

La principal recomendación del trabajo está orientada a que los profesionales de la ingeniería eléctrica exploren las alternativas que dan tanto los equipos antiguos como los nuevos desarrollos tecnológicos con el fin de generar cambios que permitan aprovechar de mejor manera sus capacidades para obtener instalaciones cada vez más seguras.

A. Anexo: Información del sistema industrial simulado

En las tablas A-1 a A-5 se muestran las características de los elementos que componen el caso de estudio.

Tabla A-1: Información del punto de conexión.

Punto de conexión	MVA 3 Φ	X/R 3 Φ	MVA 1 Φ	X/R 1 Φ
1_01	400	10	400	10

Tabla A-2: Información de transformadores

Transformador	Potencia nominal (kVA)	Primario		Secundario		Z1 (%)	X1/R1	Z0 (%)	X0/R0
		kV	Barra	kV	Barra				
T_01	20000	34,5	1_02	4,16	2-1	7	18,6	7	18,6
T_02	20000	34,5	1_03	4,16	2-2	7	18,6	7	18,6
T_03	500	4,16	2-3	0,48	3-1	4,8	4,7	4,8	4,7
T_04	1000	4,16	2-4	0,48	3-2	5,75	5,79	5,75	5,79
T_05	1600	4,16	2-5	0,48	3-3	5,75	7,098	5,75	7,098
T_06	500	4,16	2-6	0,48	3-4	4,8	4,7	4,8	4,7
T_07	1000	4,16	2-7	0,48	3-5	5,75	5,79	5,75	5,79
T_08	1600	4,16	2-8	0,48	3-6	5,75	7,098	5,75	7,098
T_09	225	4,16	2-9	0,48	3-7	4,8	4,7	4,8	4,7
T_10	500	4,16	2-10	0,48	3-8	4,8	4,7	4,8	4,7
T_11	1000	4,16	2-11	0,48	3-9	5,75	5,79	5,75	5,79
T_12	225	4,16	2-12	0,48	3-10	4,8	4,7	4,8	4,7
T_13	500	4,16	2-13	0,48	3-11	4,8	4,7	4,8	4,7
T_14	1000	4,16	2-14	0,48	3-12	5,75	5,79	5,75	5,79
T_15	225	4,16	2-15	0,48	3-13	4,8	4,7	4,8	4,7

Transformador	Potencia nominal (kVA)	Primario		Secundario		Z1 (%)	X1/R1	Z0 (%)	X0/R0
		kV	Barra	kV	Barra				
T_16	225	4,16	2-16	0,48	3-14	4,8	4,7	4,8	4,7
T_17	2000	4,16	2-17	0,48	3-15	5,75	7,098	5,75	7,098

Tabla A-3: Información de cables

Cable	Longitud (km)	Desde	Hasta	R1 (Ohm)	X1 (Ohm)	R0 (Ohm)	X0 (Ohm)	Calibre
W_01	0,1	1_01	1_02	0,00906	0,02582	0,01017	0,15435	3-1/C 500 kcmil
W_02	0,125	1_01	1_03	0,01082	0,03228	0,01253	0,19894	3-1/C 500 kcmil
W_03	0,03	2-1	2_01	0,0026	0,00775	0,0027	0,03834	24-1/C 500 kcmil
W_04	0,05	2-2	2_02	0,00433	0,01291	0,00461	0,06958	24-1/C 500 kcmil
W_05	0,1	2_03	2_05	0,00866	0,02582	0,00976	0,15435	12-1/C 1/0 AWG
W_06	0,1	2_03	2_06	0,00866	0,02582	0,00976	0,15435	6-1/C 500 kcmil
W_07	0,1	2_04	2_07	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	12-1/C 1/0 AWG
W_08	0,1	2_04	2_08	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	12-1/C 1/0 AWG
W_09	0,1	2_04	2_09	0,00866	0,02582	0,00976	0,15435	3-1/C 500 kcmil
W_10	0,03	2_05	2-3	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_11	0,03	2_05	2-4	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_12	0,03	2_05	2-5	0,006	0,00874	0,0061	0,03933	3-1/C 4/0 AWG
W_13	0,03	2_06	2-6	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_14	0,03	2_06	2-7	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_15	0,03	2_06	2-8	0,006	0,00874	0,0061	0,03933	3-1/C 4/0 AWG
W_16	0,03	2_07	2-9	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_17	0,03	2_07	2-10	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_18	0,03	2_07	2-11	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_19	0,03	2_08	2-12	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_20	0,03	2_08	2-13	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_21	0,03	2_08	2-14	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_22	0,03	2_09	2-15	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_23	0,03	2_09	2-16	0,01197	0,00952	0,01208	0,04012	3-1/C 1/0 AWG
W_24	0,03	2_09	2-17	0,006	0,00874	0,0061	0,03933	6-1/C 1/0 AWG
W_25	0,008	3-1	3-16	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	6-1/C 500 kcmil
W_26	0,008	3-02	3-17	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	12-1/C 500 kcmil
W_27	0,008	3-03	3-18	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	21-1/C 500 kcmil
W_28	0,1	2_05	2_10	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	3-1/C 1/0 AWG
W_29	0,1	2_05	2_11	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	3-1/C 1/0 AWG

Cable	Longitud (km)	Desde	Hasta	R1 (Ohm)	X1 (Ohm)	R0 (Ohm)	X0 (Ohm)	Calibre
W_30	0,008	3-04	3-19	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	6-1/C 500 kcmil
W_31	0,008	3-05	3-20	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	12-1/C 500 kcmil
W_32	0,008	3-06	3-21	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	21-1/C 500 kcmil
W_33	0,1	2_06	2_12	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	3-1/C 1/0 AWG
W_34	0,1	2_06	2_13	0,02	0,02912	0,02111	0,15765	3-1/C 4/0 AWG
W_35	0,1	2_03	2_14	0,02	0,02912	0,02111	0,15765	3-1/C 4/0 AWG
W_36	0,1	2_04	2_15	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	6-1/C 1/0 AWG
W_37	0,008	3-07	3-22	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	3-1/C 500 kcmil
W_38	0,008	3-08	3-23	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	6-1/C 500 kcmil
W_39	0,008	3-09	3-24	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	12-1/C 500 kcmil
W_40	0,1	2_07	2_16	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	3-1/C 1/0 AWG
W_41	0,1	2_07	2_17	0,02	0,02912	0,02111	0,15765	3-1/C 4/0 AWG
W_42	0,008	3-10	3-25	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	3-1/C 500 kcmil
W_43	0,008	3-11	3-26	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	6-1/C 500 kcmil
W_44	0,008	3-12	3-27	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	12-1/C 500 kcmil
W_45	0,1	2_08	2_18	0,02	0,02912	0,02111	0,15765	3-1/C 4/0 AWG
W_46	0,1	2_08	2_19	0,02	0,02912	0,02111	0,15765	3-1/C 4/0 AWG
W_47	0,008	3-13	3-28	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	3-1/C 500 kcmil
W_48	0,008	3-14	3-29	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	3-1/C 500 kcmil
W_49	0,008	3-15	3-30	0,00069	0,00205	0,0007	0,00783	24-1/C 500 kcmil
W_50	0,008	2_09	2_20	0,03991	0,03175	0,04102	0,16027	3-1/C 1/0 AWG

Tabla A-4: Información de motores

Motor	Barra de conexión	hp total	kVA total	RPM	Tensión nominal (kV)	X" (%)	X"/R	% Carga
M_01	2_10	200	191,2	1800	4	14,922	11,014	70
M_02	2_11	200	191,2	1800	4	14,922	11,014	70
M_03	2_12	700	606,1	1800	4	15,155	21,44	70
M_04	2_13	1250	1075,9	1800	4	15,219	26,225	70
M_05	2_14	1250	1075,9	1800	4	15,219	26,225	70
M_06	2_15	2000	1713,4	1800	4	15,257	30,8	70
M_07	2_16	700	606,1	1800	4	15,155	21,44	70
M_08	2_17	1250	1075,9	1800	4	15,219	26,225	70
M_09	2_18	1250	1075,9	1800	4	15,219	26,225	70
M_10	2_19	1250	1075,9	1800	4	15,219	26,225	70

Motor	Barra de conexión	hp total	kVA total	RPM	Tensión nominal (kV)	X" (%)	X"/R	% Carga
M_11	2_20	700	606,1	1800	4	15,155	21,44	70

Tabla A-5: Información de cargas concentradas

Carga	Barra de conexión	Potencia nominal (kVA)	Tensión nominal (kV)	X/R	% Carga	Modelo de carga
L_01	3_01	400	0,48	2,38	100	80% Motor 20% Estático
L_02	3_02	800	0,48	2,38	100	
L_03	3_03	1280	0,48	2,38	100	
L_04	3_04	400	0,48	2,38	100	
L_05	3_05	800	0,48	2,38	100	
L_06	3_06	1280	0,48	2,38	100	
L_07	3_07	200	0,48	2,38	100	
L_08	3_08	400	0,48	2,38	100	
L_09	3_09	800	0,48	2,38	100	
L_10	3_10	200	0,48	2,38	100	
L_11	3_11	400	0,48	2,38	100	
L_12	3_12	800	0,48	2,38	100	
L_13	3_13	200	0,48	2,38	100	
L_14	3_14	200	0,48	2,38	100	

Tabla A-6: Información del generador de respaldo.

Motor	Barra de conexión	MW total	MVA total	RPM	Tensión nominal (kV)	Xd" (%)	X2 (%)	X0 (%)	Xd (%)
G_01	3_15	1	1,176	1800	0,48	19	18	7	155
	Xdu (%)	Xd' (%)	XL (%)	Xq (%)	Xqu (%)	Ra (%)	R2 (%)	R0 (%)	-
	165	28	15	155	165	1	2	1	-

B. Anexo: Ajuste de los relés de protección

En las siguientes Tablas se presentan los ajustes seleccionados para los diferentes grupos de los relés instalados en el sistema de potencia analizado. Estos se realizaron de acuerdo con los criterios definidos en el capítulo 2.

Tabla B-1: Ajuste de los relés de protección (Grupo 1).

Relay ID		R_01	R_02	R_03	R_04	R_05	R_06
Manufacturer		Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton
Model		EDR-5000	ETR-4000	ETR-4000	EDR-4000	EDR-4000	EDR-4000
CT Ratio		500:5	3000:5	3000:5	1000:5	1000:5	1000:5
Device Function		Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent
Trip Element		Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	Phase
Level		OC1	OC1	OC1	OC1	OC1	OC1
Curve		ANSI Very Inverse					
<i>Pickup</i>	Setting	0,65	0,42	0,43	0,487	0,49	0,64
	Primary	325	1260	1290	487	490	640
<i>Time Dial</i>	Setting	5	5	5	5	5	10,5
Instantaneous	Settings	10,71	3,74	3,74	3,442	3,44	3,44
	Primary	5355	11220	11220	3442	3440	3440
<i>Delay</i>	Setting	0,6 s	0,4 s	0,4 s	0,1 s	0,1 s	0,1 s
Relay ID		R_07	R_08	R_09	R_10	R_11	-
Manufacturer		Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	-
Model		EMR-3000	EMR-3000	EDR-4000	EDR-4000	EDR-4000	-
CT Ratio		250:5	400:5	600:5	800:5	500:5	-
Device Function		Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	-
Trip Element		Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	-
Level		OC1	OC1	OC1	OC1	OC1	-
Curve		ANSI Very Inverse	-				
<i>Pickup</i>	Setting	0,46	0,47	0,75	0,63	0,28	-
	Primary	115	188	450	504	140	-
<i>Time Dial</i>	Setting	9	10	12,5	14	13,5	-

Instantaneous	Settings	7,11	7,08	4,74	4,46	2	-
	Primary	1777.5	2832	2844	3568	1000	-
Delay	Setting	0,1 s	0,1 s	0,1 s	0,1 s	0,1 s	-

Tabla B-2: Ajuste de los relés de protección (Grupo 2).

Relay ID		R_01	R_02	R_03	R_04	R_05	R_06
Manufacturer		Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton
Model		EDR-5000	ETR-4000	ETR-4000	EDR-4000	EDR-4000	EDR-4000
CT Ratio		500:5	3000:5	3000:5	1000:5	1000:5	1000:5
Device Function		Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent
Trip Element		Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	Phase
Level		OC1	OC1	OC1	OC1	OC1	OC1
Curve		ANSI Very Inverse	ANSI Very Inverse	ANSI Very Inverse	ANSI Very Inverse	ANSI Moderately Inverse	ANSI Moderately Inverse
Pickup	Setting	0,65	0,42	0,43	0,487	0,487	0,64
	Primary	325	1260	1290	487	487	640
Time Dial	Setting	5	5	5	5	0,2	0,17
Instantaneous	Settings	10,71	3,74	3,74	3,442	3,44	3,44
	Primary	5355	11220	11220	3442	3440	3440
Delay	Setting	0,6 s	0,4 s	0,4 s	0,1 s	0,1 s	0,1 s
Relay ID		R_07	R_08	R_09	R_10	R_11	-
Manufacturer		Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	-
Model		EMR-3000	EMR-3000	EDR-4000	EDR-4000	EDR-4000	-
CT Ratio		250:5	400:5	600:5	800:5	500:5	-
Device Function		Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	-
Trip Element		Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	-
Level		OC1	OC1	OC1	OC1	OC1	-
Curve		ANSI Very Inverse	ANSI Very Inverse	ANSI Moderately Inverse	ANSI Moderately Inverse	ANSI Moderately Inverse	-
Pickup	Setting	0,46	0,46	0,75	0,63	0,28	-
	Primary	115	184	450	504	140	-
Time Dial	Setting	9	10	0,14	0,13	0,12	-
Instantaneous	Settings	7,11	7,08	4,74	4,46	2	-
	Primary	1777,5	2832	2844	3568	1000	-
Delay	Setting	0,1 s	0,1 s	0,1 s	0,1 s	0,1 s	-

Tabla B-3: Ajuste de los relés de protección (Grupo 3).

Relay ID		R_01	R_02	R_03	R_04	R_05	R_06
Manufacturer		Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton
Model		EDR-5000	ETR-4000	ETR-4000	EDR-4000	EDR-4000	EDR-4000
CT Ratio		500:5	3000:5	3000:5	1000:5	1000:5	1000:5
Device Function		Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent
Trip Element		Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	Phase
Level		OC1	OC1	OC1	OC1	OC1	OC1
Curve		ANSI Very Inverse					
<i>Pickup</i>	Setting	0,65	0,42	0,43	0,487	0,066	0,021
	Primary	325	1260	1290	487	66	21
<i>Time Dial</i>	Setting	5	5	5	5	5	5
Instantaneous	Settings	10,71	3,74	3,74	3,442	0,3	0,0967
	Primary	5355	11220	11220	3442	300	96,7
<i>Delay</i>	Setting	0,6 s	0,4 s	0,4 s	0,1 s	0,3 s	0,3 s
Relay ID		R_07	R_08	R_09	R_10	R_11	-
Manufacturer		Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	Eaton	-
Model		EMR-3000	EMR-3000	EDR-4000	EDR-4000	EDR-4000	-
CT Ratio		250:5	400:5	600:5	800:5	500:5	-
Device Function		Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	Overcurrent	-
Trip Element		Phase	Phase	Phase	Phase	Phase	-
Level		OC1	OC1	OC1	OC1	OC1	-
Curve		ANSI Very Inverse	-				
<i>Pickup</i>	Setting	0,46	0,46	0,06	0,03	0,294	-
	Primary	115	184	36	24	147	-
<i>Time Dial</i>	Setting	9	10	5	5	5	-
Instantaneous	Settings	7,11	7,08	0,27	0,14	1,35	-
	Primary	1777,5	2832	162	112	675	-
<i>Delay</i>	Setting	0,1 s	0,1 s	0,3 s	0,3 s	0,3 s	-

C. Anexo: Ajuste de los interruptores de baja tensión

A continuación, se presentan los ajustes seleccionados para los interruptores principales de baja tensión ubicados aguas abajo de los transformadores.

Tabla C-1: Ajuste de los interruptores de baja tensión

LVCB ID		Q_15	Q_15	Q_16	Q_16	Q_17
Adjacent Bus		3-16	3-16	3-17	3-17	3-18
Manufacturer		GE	GE	GE	GE	GE
Model		EGH-08	EGH-08	EGH-16	EGH-16	EGH-32
Max Voltage		0,48 kV				
Size/Frame		800	800	1600	1600	3200
Amps		800	800	1600	1600	2500
SC Rating		50 kA @ 0,48 kV	50 kA @ 0,48 kV	65 kA @ 0,48 kV	65 kA @ 0,48 kV	130 kA @ 0,48 kV
Model		Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard
Sensor/Frame		800 (LSIG)	800 (LSIG)	1600 (LSIG)	1600 (LSIG)	3200 (LSIG)
Rating Plug		800	800	1600	1600	2500
Function		Phase	Ground	Phase	Ground	Phase
Long-Time	Pickup Label	LT Pickup		LT Pickup		LT Pickup
	Pickup Setting	0,95		0,95		0,95
	Trip (Amps)	760		1520		2375
	Band Label	LT Band		LT Band		LT Band
	Band	1		1		1
Short-Time / Ground	Pickup Label	ST Pickup	Ground Pickup	ST Pickup	Ground Pickup	ST Pickup
	Pickup Setting	2	0,3	2	0,3	1,5
	Trip (Amps)	1520	240	3040	480	3562
	Band Label	ST Band	Ground Band	ST Band	Ground Band	ST Band
	Band	6	5	6	5	6
	Inst	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
Instantaneous / Maintenance	Pickup Label	Inst. Pickup		Inst. Pickup		Inst. Pickup
	Pickup	6,5		5,5		6
	Trip (Amps)	5200		8800		15000
Base kV		0,480	0,480	0,480	0,480	0,480
LVCB ID		Q_17	Q_21	Q_21	Q_18	Q_18
Adjacent Bus		3-18	3-22	3-22	3-19	3-19
Manufacturer		GE	GE	GE	GE	GE
Model		EGH-32	EGH-08	EGH-08	EGH-08	EGH-08
Max Voltage		0,48 kV				

Size/Frame		3200	800	800	800	800
Amps		2500	800	800	800	800
SC Rating		130 kA @ 0,48 kV	50 kA @ 0,48 kV			
Model		Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard
Sensor/Frame		3200 (LSIG)	400 (LSIG)	400 (LSIG)	800 (LSIG)	800 (LSIG)
Rating Plug		2500	400	400	800	800
Function		Ground	Phase	Ground	Phase	Ground
Long-Time	Pickup Label		LT Pickup		LT Pickup	
	Pickup Setting		0,95		0,95	
	Trip (Amps)		380		760	
	Band Label		LT Band		LT Band	
	Band		1		1	
Short-Time / Ground	Pickup Label	Ground Pickup	ST Pickup	Ground Pickup	ST Pickup	Ground Pickup
	Pickup Setting	0,3	2	0,27	2	0,3
	Trip (Amps)	960	760	108	1520	240
	Band Label	Ground Band	ST Band	Ground Band	ST Band	Ground Band
	Band	5	6	5	6	5
	I_{st}	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
Instantaneous / Maintenance	Pickup Label		Inst. Pickup		Inst. Pickup	
	Pickup		5,5		6,5	
	Trip (Amps)		2200		5200	
Base kV		0.480	0.480	0.480	0.480	0.480
LVCB ID		Q_22	Q_22	Q_25	Q_25	Q_19
Adjacent Bus		3-23	3-23	3-26	3-26	3-20
Manufacturer		GE	GE	GE	GE	GE
Model		EGH-08	EGH-08	EGH-08	EGH-08	EGH-16
Max Voltage		0,48 kV	0,48 kV	0,48 kV	0,48 kV	0,48 kV
Size/Frame		800	800	800	800	1600
Amps		800	800	800	800	1600
SC Rating		50 kA @ 0,48 kV	50 kA @ 0,48 kV	50 kA @ 0,48 kV	50 kA @ 0,48 kV	65 kA @ 0,48 kV
Model		Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard
Sensor/Frame		800 (LSIG)	800 (LSIG)	800 (LSIG)	800 (LSIG)	1600 (LSIG)
Rating Plug		800	800	800	800	1600
Function		Phase	Ground	Phase	Ground	Phase
Long-Time	Pickup Label	LT Pickup		LT Pickup		LT Pickup
	Pickup Setting	0,95		0,95		0,95
	Trip (Amps)	760		760		1520
	Band Label	LT Band		LT Band		LT Band
	Band	1		1		1
Short-Time / Ground	Pickup Label	ST Pickup	Ground Pickup	ST Pickup	Ground Pickup	ST Pickup
	Pickup Setting	2	0,3	2	0,3	2

	Trip (Amps)	1520	240	1520	240	3040
	Band Label	ST Band	Ground Band	ST Band	Ground Band	ST Band
	Band	6	5	6	5	6
	I_t	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
Instantaneous / Maintenance	Pickup Label	Inst. Pickup		Inst. Pickup		Inst. Pickup
	Pickup	6,5		6,5		5,5
	Trip (Amps)	5200		5200		8800
Base kV		0,480	0,480	0,480	0,480	0,480
LVCB ID		Q_19	Q_26	Q_26	Q_23	Q_23
Adjacent Bus		3-20	3-27	3-27	3-24	3-24
Manufacturer		GE	GE	GE	GE	GE
Model		EGH-16	EGH-16	EGH-16	EGH-16	EGH-16
Max Voltage		0,48 kV				
Size/Frame		1600	1600	1600	1600	1600
Amps		1600	1600	1600	1600	1600
SC Rating		65 kA @ 0,48 kV				
Model		Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard
Sensor/Frame		1600 (LSIG)				
Rating Plug		1600	1600	1600	1600	1600
Function		Ground	Phase	Ground	Phase	Ground
Long-Time	Pickup Label		LT Pickup		LT Pickup	
	Pickup Setting		0,95		0,95	
	Trip (Amps)		1520		1520	
	Band Label		LT Band		LT Band	
	Band		1		1	
Short-Time / Ground	Pickup Label	Ground Pickup	ST Pickup	Ground Pickup	ST Pickup	Ground Pickup
	Pickup Setting	0,3	2	0,3	2	0,3
	Trip (Amps)	480	3040	480	3040	480
	Band Label	Ground Band	ST Band	Ground Band	ST Band	Ground Band
	Band	5	6	5	6	5
	I_t	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
Instantaneous / Maintenance	Pickup Label		Inst. Pickup		Inst. Pickup	
	Pickup		5,5		5,5	
	Trip (Amps)		8800		8800	
Base kV		0,480	0,480	0,480	0,480	0,480
LVCB ID		Q_20	Q_20	Q_29	Q_29	Q_24
Adjacent Bus		3-21	3-21	3-30	3-30	3-25
Manufacturer		GE	GE	GE	GE	GE
Model		EGH-32	EGH-32	EGH-32	EGH-32	EGH-08
Max Voltage		0,48 kV				
Size/Frame		3200	3200	3200	3200	800
Amps		3200	3200	3200	3200	800

SC Rating		130 kA @ 0,48 kV	50 kA @ 0,48 kV			
Model		Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard
Sensor/Frame		3200 (LSIG)	3200 (LSIG)	3200 (LSIG)	3200 (LSIG)	400 (LSIG)
Rating Plug		2500	2500	3200	3200	400
Function		Phase	Ground	Phase	Ground	Phase
Long-Time	Pickup Label	LT <i>Pickup</i>		LT <i>Pickup</i>		LT <i>Pickup</i>
	Pickup Setting	0,95		1		0,95
	Trip (Amps)	2375		3200		380
	Band Label	LT Band		LT Band		LT Band
	Band	1		1		1
Short-Time / Ground	Pickup Label	ST <i>Pickup</i>	Ground <i>Pickup</i>	ST <i>Pickup</i>	Ground <i>Pickup</i>	ST <i>Pickup</i>
	Pickup Setting	1,5	0,3	1,5	0,3	2
	Trip (Amps)	3562	960	4800	960	760
	Band Label	ST Band	Ground Band	ST Band	Ground Band	ST Band
	Band	6	5	5	5	6
	I_t	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
Instantaneous / Maintenance	Pickup Label	Inst. <i>Pickup</i>		Inst. <i>Pickup</i>		Inst. <i>Pickup</i>
	Pickup	6		3		5,5
	Trip (Amps)	15000		9600		2200
Base kV		0,480	0,480	0,480	0,480	0,480
LVCB ID		Q_24	Q_27	Q_27	Q_28	Q_28
Adjacent Bus		3-25	3-28	3-28	3-29	3-29
Manufacturer		GE	GE	GE	GE	GE
Model		EGH-08	EGH-08	EGH-08	EGH-08	EGH-08
Max Voltage		0,48 kV				
Size/Frame		800	800	800	800	800
Amps		800	800	800	800	800
SC Rating		50 kA @ 0,48 kV				
Model		Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard	Entelliguard
Sensor/Frame		400 (LSIG)				
Rating Plug		400	400	400	400	400
Function		Ground	Phase	Ground	Phase	Ground
Long-Time	Pickup Label		LT <i>Pickup</i>		LT <i>Pickup</i>	
	Pickup Setting		0,95		0,95	
	Trip (Amps)		380		380	
	Band Label		LT Band		LT Band	
	Band		1		1	
Short-Time / Ground	Pickup Label	Ground <i>Pickup</i>	ST <i>Pickup</i>	Ground <i>Pickup</i>	ST <i>Pickup</i>	Ground <i>Pickup</i>
	Pickup Setting	0,27	2	0,27	2	0,27
	Trip (Amps)	108	760	108	760	108
	Band Label	Ground Band	ST Band	Ground Band	ST Band	Ground Band

	Band	5	6	5	6	5
	Ist	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
Instantaneous / Maintenance	Pickup Label		<i>Inst. Pickup</i>		<i>Inst. Pickup</i>	
	Pickup		5,5		5,5	
	Trip (Amps)		2200		2200	
Base kV		0,480	0,480	0,480	0,480	0,480

D. Anexo: Características de los fusibles

En la tabla que se presenta a continuación se tienen las características técnicas de los diferentes fusibles empleados como protección para los motores de media tensión y para los transformadores.

Tabla D-1: Características de los fusibles

Fuse ID	Adjacent Bus	Manufacturer	Model	Max Voltage	Speed	Size	Cont. Amp	Base kV
F_01	2_05	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	125E	125	4,160
F_M1	2_05	Bussmann	JCL (2/03)	5,08 kV	Standard	4R	130	4,160
F_04	2_06	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	125E	125	4,160
F_05	2_06	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	200E	200	4,160
F_14	2_09	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	65E	65	4,160
F_13	2_09	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	65E	65	4,160
F_15	2_09	Bussmann	JCY (Form 329-330)	5,5 kV	Standard	250E	250	4,160
F_M2	2_05	Bussmann	JCG	5,08 kV	Standard	4R	130	4,160
F_M3	2_06	Bussmann	JCG	5,08 kV	Standard	18R	390	4,160
F_06	2_06	Bussmann	JCY (Form 329-330)	5,5 kV	Standard	350X	350	4,160
F_M4	2_06	Bussmann	JCR	7,2 kV	Standard	12R	230	4,160
F_07	2_07	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	65E	65	4,160
F_08	2_07	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	125E	125	4,160
F_M8	2_07	Bussmann	JCR	7,2 kV	Standard	12R	230	4,160
F_M7	2_07	Bussmann	JCG	5,08 kV	Standard	18R	390	4,160
F_09	2_07	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	200E	200	4,160
F_10	2_08	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	65E	65	4,160
F_11	2_08	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	125E	125	4,160
F_12	2_08	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	200E	200	4,160
F_M9	2_08	Bussmann	JCR	7,2 kV	Standard	12R	230	4,160
F_M10	2_08	Bussmann	JCR	7,2 kV	Standard	18R	390	4,160
F_02	2_05	Bussmann	JCY (2/71)	5,5 kV	Standard	200E	200	4,160
F_03	2_05	Bussmann	JCY (Form 329-330)	5,5 kV	Standard	350X	350	4,160
F_M11	2_09	Bussmann	JCR	7,2 kV	Standard	18R	390	4,160

E. Anexo: Resumen de flujo de carga

En las siguientes tablas, se presentan los resultados del Flujo de carga para los diferentes escenarios de operación del sistema.

Tabla E-1: Reporte de Flujo de Carga Escenario 1.

Bus ID	Nominal kV	Type	Voltage	kW Loading	kvar Loading	Amp Loading
1_01	34,5	SWNG	100,00	14160,30	6310,40	259,40
1_02	34,5	Load	99,97	6958,30	3102,30	127,50
1_03	34,5	Load	99,97	7199,30	3203,60	131,90
2_1	4,16	Load	103,74	6945,20	2858,10	1005,00
2_2	4,16	Load	103,69	7185,20	2942,30	1039,00
2_3	4,16	Load	102,90	392,90	156,60	57,04
2_4	4,16	Load	102,58	783,90	319,30	114,50
2_5	4,16	Load	102,66	1252,10	506,60	182,60
2_6	4,16	Load	102,80	392,70	156,50	57,08
2_7	4,16	Load	102,48	783,60	319,20	114,60
2_8	4,16	Load	102,56	1251,60	506,60	182,70
2_9	4,16	Load	102,82	196,40	79,10	28,58
2_01	4,16	Load	103,54	6934,60	2845,20	1005,00
2_02	4,16	Load	103,48	7173,90	2928,50	1039,00
2_03	4,16	Load	103,54	6934,60	2845,20	1005,00
2_04	4,16	Load	103,48	7173,90	2928,50	1039,00
2_05	4,16	Load	103,22	2687,30	1095,10	390,20
2_06	4,16	Load	103,12	3531,50	1440,80	513,30
2_07	4,16	Load	102,98	2469,60	1009,60	359,60
2_08	4,16	Load	102,91	2775,10	1133,20	404,20
2_09	4,16	Load	103,30	783,70	322,50	113,90
2_10	4,16	Load	102,66	392,50	156,50	57,13
2_10	4,16	Load	103,12	122,80	53,36	18,02
2_11	4,16	Load	102,34	783,20	319,20	114,70
2_11	4,16	Load	103,12	122,80	53,36	18,02
2_12	4,16	Load	102,75	196,30	79,10	28,59
2_12	4,16	Load	102,80	391,30	164,10	57,28
2_13	4,16	Load	102,59	392,40	156,50	57,15
2_13	4,16	Load	102,81	696,40	286,90	101,70
2_14	4,16	Load	102,27	783,00	319,20	114,70

Bus ID	Nominal kV	Type	Voltage	kW Loading	kvar Loading	Amp Loading
2_14	4,16	Load	103,23	696,40	286,90	101,30
2_15	4,16	Load	103,14	196,60	79,12	28,52
2_15	4,16	Load	103,03	1111,30	451,00	161,60
2_16	4,16	Load	103,14	194,80	79,02	28,29
2_16	4,16	Load	102,66	391,30	164,10	57,36
2_17	4,16	Load	102,66	696,40	286,90	101,80
2_18	4,16	Load	102,60	696,40	286,90	101,90
2_19	4,16	Load	102,60	696,40	286,90	101,90
2_20	4,16	Load	103,20	391,30	164,10	57,06
3_1	0,48	Load	103,45	389,70	141,50	482,00
3_2	0,48	Load	102,84	777,60	282,60	967,70
3_3	0,48	Load	103,06	1243,80	448,10	1543,00
3_4	0,48	Load	103,35	389,50	141,40	482,30
3_5	0,48	Load	102,73	777,30	282,50	968,30
3_6	0,48	Load	102,96	1243,40	448,00	1544,00
3_7	0,48	Load	103,12	194,60	70,69	241,50
3_8	0,48	Load	103,20	389,30	141,40	482,70
3_9	0,48	Load	102,58	776,80	282,40	969,20
3_01	0,48	Load	99,71	379,60	124,80	482,00
3_02	0,48	Load	99,07	757,20	248,90	967,70
3_03	0,48	Load	99,64	1214,20	399,10	1543,00
3_04	0,48	Load	99,60	379,40	124,70	482,30
3_05	0,48	Load	98,97	756,90	248,80	968,30
3_06	0,48	Load	99,53	1213,70	398,90	1544,00
3_07	0,48	Load	99,37	189,50	62,29	241,50
3_08	0,48	Load	99,44	379,20	124,60	482,70
3_09	0,48	Load	98,81	756,40	248,60	969,20
3_10	0,48	Load	103,06	194,50	70,68	241,60
3_10	0,48	Load	99,30	189,50	62,28	241,60
3_11	0,48	Load	103,13	389,20	141,40	482,90
3_11	0,48	Load	99,38	379,10	124,60	482,90
3_12	0,48	Load	102,52	776,70	282,40	969,60
3_12	0,48	Load	98,74	756,20	248,60	969,60
3_13	0,48	Load	103,46	194,80	70,74	241,00
3_13	0,48	Load	99,71	189,80	62,38	241,00
3_14	0,48	Load	100,76	192,90	70,35	245,10
3_14	0,48	Load	96,95	187,70	61,70	245,10

Tabla E-2: Reporte de Flujo de Carga Escenario 2.

Bus ID	Nominal kV	Type	Voltage	kW Loading	kvar Loading	Amp Loading
1_01	34,5	SWNG	100,00	14162,20	6879,50	263,50
1_02	34,5	Load	99,94	14156,70	6870,30	263,50
2_1	4,16	Load	102,01	14100,60	5827,80	2076,00
2_3	4,16	Load	100,94	390,10	156,40	57,78
2_4	4,16	Load	100,62	778,30	319,10	116,00
2_5	4,16	Load	100,70	1243,00	506,20	185,00
2_6	4,16	Load	100,84	389,90	156,30	57,82
2_7	4,16	Load	100,52	778,10	319,10	116,10
2_8	4,16	Load	100,60	1242,60	506,10	185,10
2_9	4,16	Load	100,91	195,00	79,03	28,94
2_01	4,16	Load	101,59	14055,40	5772,80	2076,00
2_03	4,16	Load	101,59	14055,40	5772,80	2076,00
2_04	4,16	Load	101,59	7154,20	2928,30	1056,00
2_05	4,16	Load	101,27	2670,30	1094,40	395,50
2_06	4,16	Load	101,17	3514,60	1440,20	521,10
2_07	4,16	Load	101,08	2460,40	1009,30	365,20
2_08	4,16	Load	101,01	2766,00	1132,90	410,70
2_09	4,16	Load	101,40	781,10	322,50	115,70
2_10	4,16	Load	100,75	389,80	156,30	57,85
2_10	4,16	Load	101,16	122,80	53,36	18,36
2_11	4,16	Load	100,43	777,80	319,10	116,20
2_11	4,16	Load	101,16	122,80	53,36	18,36
2-12	4,16	Load	100,85	195,00	79,03	28,95
2_12	4,16	Load	100,84	391,30	164,10	58,39
2_13	4,16	Load	100,69	389,70	156,30	57,88
2_13	4,16	Load	100,85	696,40	286,90	103,60
2_14	4,16	Load	100,36	777,60	319,10	116,20
2_14	4,16	Load	101,27	696,40	286,90	103,20
2_15	4,16	Load	101,24	195,30	79,04	28,88
2_15	4,16	Load	101,13	1111,30	451,00	164,60
2_16	4,16	Load	101,24	193,50	79,00	28,66
2_16	4,16	Load	100,75	391,30	164,10	58,44
2_17	4,16	Load	100,76	696,40	286,90	103,70
2_18	4,16	Load	100,69	696,40	286,90	103,80
2_19	4,16	Load	100,69	696,40	286,90	103,80
2_20	4,16	Load	101,30	391,30	164,10	58,13

Bus ID	Nominal kV	Type	Voltage	kW Loading	kvar Loading	Amp Loading
3_1	0,48	Load	101,41	386,80	140,90	488,20
3_2	0,48	Load	100,79	771,80	281,40	980,50
3_3	0,48	Load	101,02	1234,60	446,10	1563,00
3_4	0,48	Load	101,31	386,60	140,90	488,60
3_5	0,48	Load	100,68	771,50	281,40	981,10
3_6	0,48	Load	100,91	1234,10	446,00	1564,00
3_7	0,48	Load	101,14	193,20	70,40	244,60
3_8	0,48	Load	101,21	386,50	140,80	488,90
3_9	0,48	Load	100,59	771,30	281,30	981,80
3_01	0,48	Load	97,61	376,40	123,70	488,20
3_02	0,48	Load	96,97	750,90	246,80	980,50
3_03	0,48	Load	97,54	1204,20	395,80	1563,00
3_04	0,48	Load	97,51	376,30	123,70	488,60
3_05	0,48	Load	96,86	750,60	246,70	981,10
3_06	0,48	Load	97,44	1203,70	395,60	1564,00
3_07	0,48	Load	97,33	188,00	61,79	244,60
3_08	0,48	Load	97,41	376,10	123,60	488,90
3_09	0,48	Load	96,77	750,30	246,60	981,80
3_10	0,48	Load	101,07	193,20	70,40	244,70
3_10	0,48	Load	97,26	187,90	61,78	244,70
3_11	0,48	Load	101,15	386,40	140,80	489,10
3_11	0,48	Load	97,34	376,00	123,60	489,10
3_12	0,48	Load	100,52	771,10	281,30	982,20
3_12	0,48	Load	96,70	750,10	246,60	982,20
3_13	0,48	Load	101,47	193,40	70,45	244,00
3_13	0,48	Load	97,68	188,30	61,88	244,00
3_14	0,48	Load	98,83	191,60	70,10	248,30
3_14	0,48	Load	94,96	186,30	61,22	248,30

Tabla E-3: Reporte de Flujo de Carga Escenario 3.

Bus ID	Nominal kV	Type	Voltage	kW Loading	kvar Loading	Amp Loading
2_3	4,16	Load	100,26	38,48	12,91	5,62
2_4	4,16	Load	100,23	76,94	25,88	11,24
2_5	4,16	Load	100,18	246,30	84,67	36,08
2_6	4,16	Load	100,29	38,48	12,91	5,62
2_7	4,16	Load	100,26	76,95	25,89	11,24

Bus ID	Nominal kV	Type	Voltage	kW Loading	kvar Loading	Amp Loading
2_9	4,16	Load	100,26	38,52	13,23	5,64
2_03	4,16	Load	100,33	477,70	162,60	69,80
2_04	4,16	Load	100,33	805,10	273,50	117,60
2_05	4,16	Load	100,29	362,00	123,60	52,94
2_06	4,16	Load	100,32	115,50	38,82	16,86
2_07	4,16	Load	100,29	192,60	65,54	28,15
2_08	4,16	Load	100,31	134,70	45,28	19,67
2_09	4,16	Load	100,52	844,60	287,80	123,20
2_10	4,16	Load	100,23	77,04	26,39	11,28
2_11	4,16	Load	100,23	76,94	25,88	11,24
2_12	4,16	Load	100,29	19,24	6,47	2,81
2_13	4,16	Load	100,27	38,48	12,91	5,62
2_14	4,16	Load	100,24	76,94	25,88	11,24
2_15	4,16	Load	100,50	19,26	6,47	2,81
2_16	4,16	Load	100,50	19,06	6,41	2,78
2_17	4,16	Load	100,89	847,50	289,50	123,20
3_1	0,48	Load	102,64	38,45	12,77	47,48
3_2	0,48	Load	102,58	76,88	25,53	94,98
3_3	0,48	Load	102,34	246,00	82,39	304,90
3_4	0,48	Load	102,67	38,45	12,77	47,47
3_5	0,48	Load	102,61	76,89	25,53	94,96
3_7	0,48	Load	102,40	38,45	12,90	47,64
3_8	0,48	Load	102,41	76,91	25,80	95,28
3_9	0,48	Load	102,59	76,88	25,53	94,98
3_01	0,48	Load	102,27	38,35	12,60	47,48
3_02	0,48	Load	102,22	76,68	25,20	94,98
3_03	0,48	Load	101,67	244,80	80,47	304,90
3_04	0,48	Load	102,30	38,35	12,61	47,47
3_05	0,48	Load	102,25	76,69	25,21	94,96
3_07	0,48	Load	101,67	38,26	12,57	47,64
3_08	0,48	Load	101,68	76,51	25,15	95,28
3_09	0,48	Load	102,22	76,68	25,20	94,98
3_10	0,48	Load	102,65	19,22	6,38	23,74
3_10	0,48	Load	102,28	19,18	6,30	23,74
3_11	0,48	Load	102,65	38,45	12,77	47,47
3_11	0,48	Load	102,29	38,35	12,61	47,47
3_12	0,48	Load	102,60	76,88	25,53	94,97

Bus ID	Nominal kV	Type	Voltage	kW Loading	kvar Loading	Amp Loading
3_12	0,48	Load	102,23	76,69	25,21	94,97
3_13	0,48	Load	102,87	19,24	6,39	23,71
3_13	0,48	Load	102,50	19,19	6,31	23,71
3_14	0,48	Load	100,29	19,04	6,33	24,07
3_14	0,48	Load	99,92	18,99	6,24	24,07
3_15	0,48	Load	97,75	852,20	322,50	1121,00
3_15	0,48	SWNG	100,00	865,80	345,10	1121,00

F. Anexo: Resumen de cortocircuito

A continuación, se reportan las corrientes de cortocircuito presentes en cada una de las barras del sistema para los 3 escenarios de simulación.

Tabla F-1: Reporte de cortocircuito Escenario 1.

ID	Nominal kV	Symm, kA	Asymm, kA	Peak kA	X/R Ratio
1_02	34,5	7,84	11,13	18,98	9,25
1_03	34,5	7,85	11,14	19,00	9,27
2_01	4,16	23,28	33,44	56,92	9,93
2_02	4,16	25,27	36,43	61,98	10,17
2_03	4,16	23,28	33,44	56,92	9,93
2_04	4,16	25,27	36,43	61,98	10,17
2_05	4,16	20,05	25,15	43,54	5,03
2_06	4,16	20,39	26,34	45,51	5,74
2_07	4,16	21,84	25,17	43,40	3,47
2_08	4,16	22,00	25,92	44,82	3,83
2_09	4,16	18,22	21,49	37,15	3,84
2_10	4,16	10,95	11,00	16,51	1,15
2_11	4,16	10,95	11,00	16,51	1,15
2_12	4,16	11,24	11,52	18,44	1,71
2_13	4,16	14,08	16,15	27,82	3,40
2_14	4,16	15,56	17,80	30,65	3,36
2_15	4,16	18,20	21,54	37,25	3,91
2_16	4,16	11,14	11,32	17,74	1,52
2_17	4,16	14,28	15,86	27,09	2,92
2_18	4,16	14,37	16,02	27,39	2,97
2_19	4,16	14,37	16,02	27,39	2,97
2_20	4,16	15,12	16,19	27,17	2,41
3_01	0,48	7,06	7,50	12,52	2,29
3_02	0,48	12,88	13,75	23,02	2,36
3_03	0,48	20,68	22,40	37,87	2,57
3_04	0,48	7,07	7,51	12,53	2,29
3_05	0,48	12,89	13,76	23,05	2,36
3_06	0,48	20,70	22,45	37,96	2,58
3_07	0,48	3,49	3,73	6,24	2,37
3_08	0,48	7,08	7,51	12,52	2,27

ID	Nominal kV	Symm, kA	Asymm, kA	Peak kA	X/R Ratio
3_09	0,48	12,92	13,76	23,02	2,33
3_10	0,48	3,49	3,73	6,25	2,37
3_11	0,48	7,08	7,51	12,52	2,28
3_12	0,48	12,92	13,77	23,04	2,34
3_13	0,48	3,48	3,72	6,23	2,37
3_14	0,48	3,48	3,72	6,24	2,38

Tabla F-2: Reporte de cortocircuito Escenario 2.

ID	Nominal kV	Symm, kA	Asymm, kA	Peak kA	X/R Ratio
1_02	34,5	7,69	10,94	18,65	9,40
2_01	4,16	29,48	42,35	72,09	9,96
2_03	4,16	29,48	42,35	72,09	9,96
2_04	4,16	29,48	42,35	72,09	9,96
2_05	4,16	24,31	29,76	51,54	4,52
2_06	4,16	24,72	31,14	53,89	5,12
2_07	4,16	24,59	27,61	47,32	3,08
2_08	4,16	24,76	28,39	48,91	3,40
2_09	4,16	20,19	23,35	40,28	3,53
2_10	4,16	11,81	11,84	17,46	1,01
2_11	4,16	11,81	11,84	17,46	1,01
2_12	4,16	12,09	12,28	19,20	1,50
2_13	4,16	15,72	17,53	29,98	2,98
2_14	4,16	17,73	19,65	33,55	2,90
2_15	4,16	19,83	22,84	39,37	3,46
2_16	4,16	11,57	11,69	18,04	1,38
2_17	4,16	15,18	16,54	28,03	2,65
2_18	4,16	15,27	16,69	28,33	2,70
2_19	4,16	15,27	16,69	28,33	2,70
2_20	4,16	16,31	17,22	28,58	2,20
3_01	0,48	7,09	7,53	12,56	2,28
3_02	0,48	12,97	13,83	23,15	2,34
3_03	0,48	20,92	22,63	38,21	2,55
3_04	0,48	7,10	7,53	12,57	2,28
3_05	0,48	12,98	13,85	23,17	2,35
3_06	0,48	20,95	22,67	38,29	2,56
3_07	0,48	3,49	3,73	6,25	2,37

ID	Nominal kV	Symm, kA	Asymm, kA	Peak kA	X/R Ratio
3_08	0,48	7,09	7,52	12,54	2,27
3_09	0,48	12,97	13,81	23,08	2,32
3_10	0,48	3,49	3,73	6,25	2,37
3_11	0,48	7,09	7,53	12,54	2,27
3_12	0,48	12,98	13,82	23,10	2,33
3_13	0,48	3,49	3,72	6,24	2,37
3_14	0,48	3,49	3,73	6,25	2,37

Tabla F-3: Reporte de cortocircuito Escenario 3.

ID	Nominal kV	Symm, kA	Asymm, kA	Peak kA	X/R Ratio
2_03	4,16	3,26	3,64	6,23	3,01
2_04	4,16	3,26	3,64	6,23	3,01
2_05	4,16	3,22	3,58	6,13	2,94
2_06	4,16	3,19	3,55	6,06	2,92
2_07	4,16	3,20	3,51	5,97	2,76
2_08	4,16	3,20	3,51	5,97	2,76
2_09	4,16	3,15	3,52	6,03	3,02
3_01	0,48	6,27	6,68	11,17	2,34
3_02	0,48	10,55	11,31	19,00	2,42
3_03	0,48	15,17	16,46	27,84	2,59
3_04	0,48	6,26	6,67	11,16	2,34
3_05	0,48	10,53	11,29	18,96	2,42
3_07	0,48	3,28	3,51	5,88	2,39
3_08	0,48	6,26	6,66	11,14	2,32
3_09	0,48	10,53	11,27	18,91	2,40
3_10	0,48	3,28	3,51	5,88	2,39
3_11	0,48	6,26	6,66	11,14	2,32
3_12	0,48	10,53	11,27	18,91	2,40
3_13	0,48	3,28	3,51	5,89	2,40
3_14	0,48	3,29	3,52	5,91	2,40
3_15	0,48	17,37	24,62	42,02	9,19

G. Anexo: Curvas tiempo-corriente

Las gráficas que se muestran a continuación, contienen las curvas tiempo-corriente de los equipos de protección presentes en los alimentadores principales del sistema analizado, las cuales varían de acuerdo con el grupo de ajustes seleccionado para un escenario de operación específico.

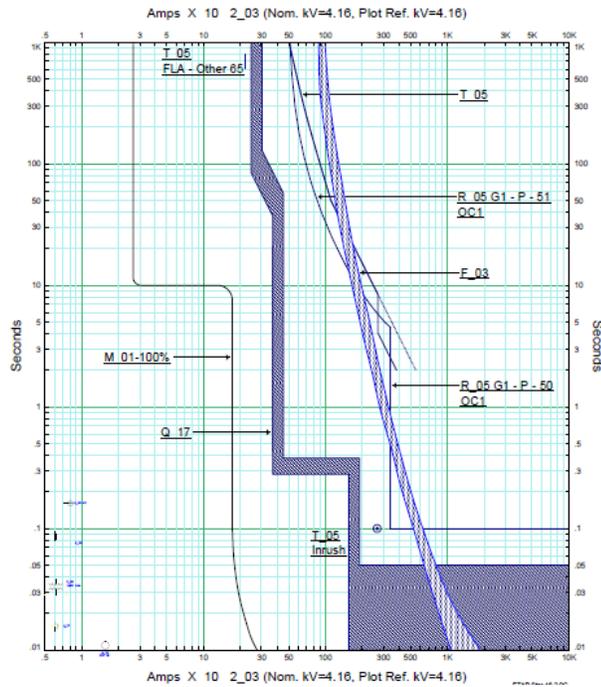


Figura G-1: Curvas tiempo-corriente R_05-G1.

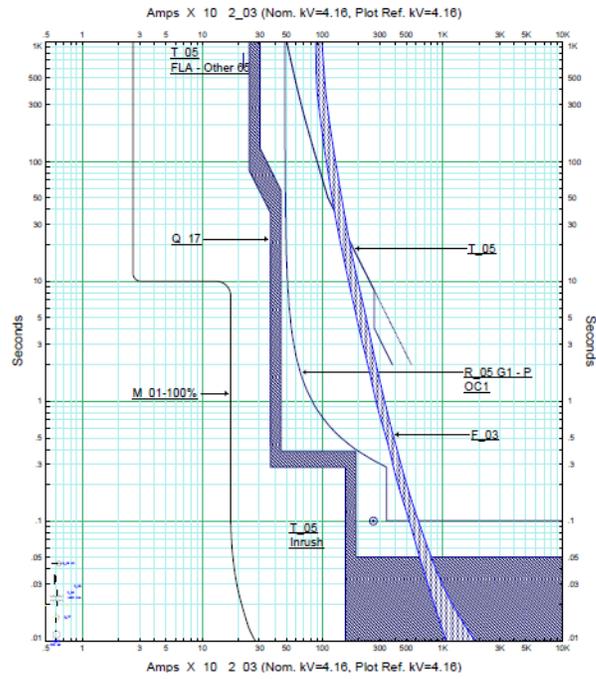


Figura G-2: Curvas tiempo-corriente R_05-G2.

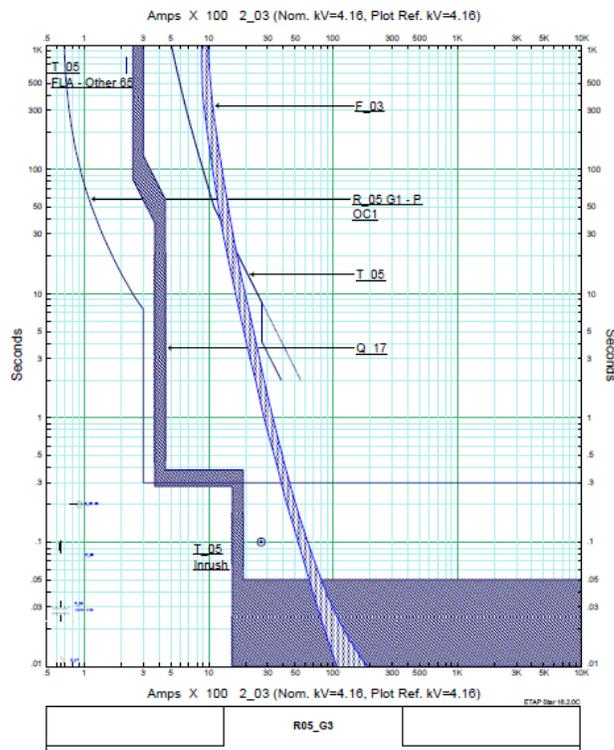


Figura G-3: Curvas tiempo-corriente R_05-G3.

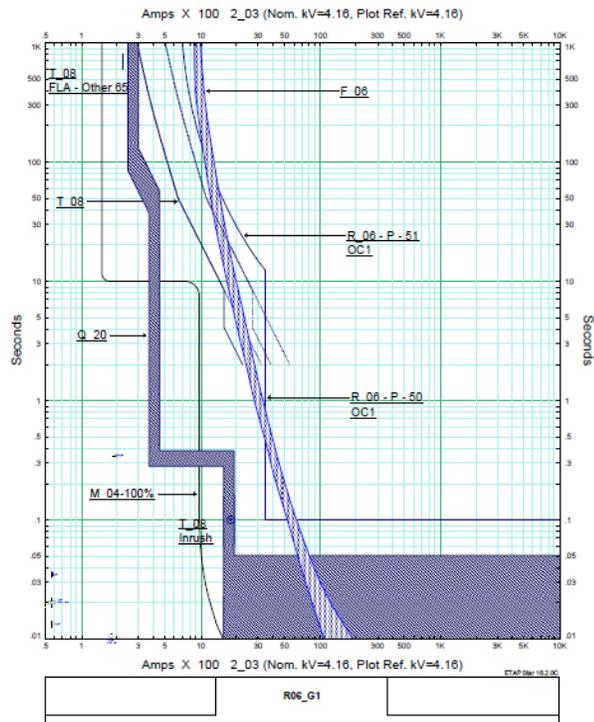


Figura G-4: Curvas tiempo-corriente R_06-G1.

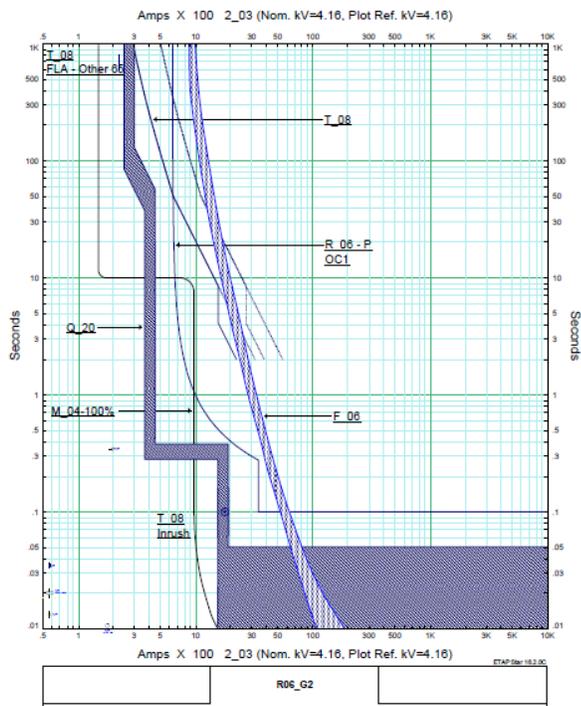


Figura G-5: Curvas tiempo-corriente R_06-G2.

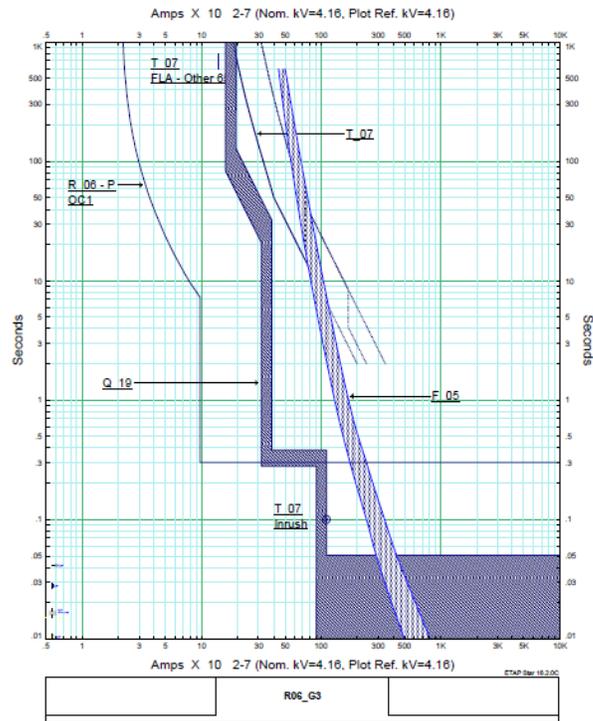


Figura G-6: Curvas tiempo-corriente R_06-G3.

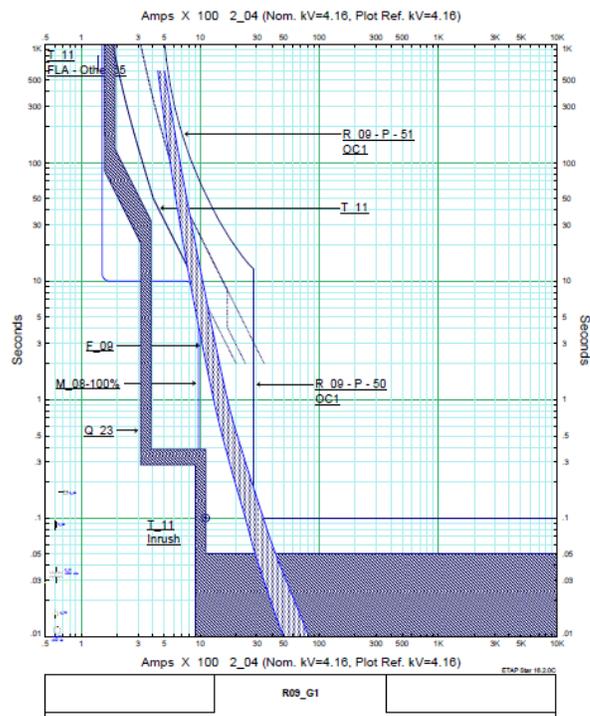


Figura G-7: Curvas tiempo-corriente R_09-G1.

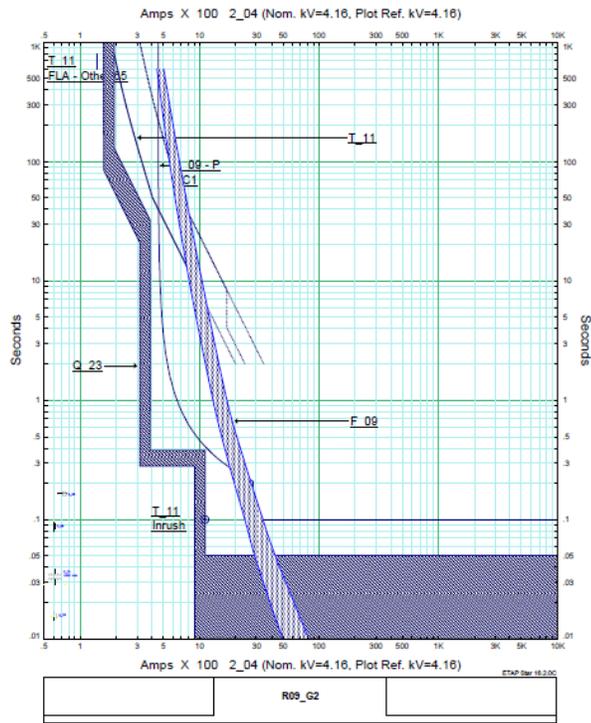


Figura G-8: Curvas tiempo-corriente R_09-G2.

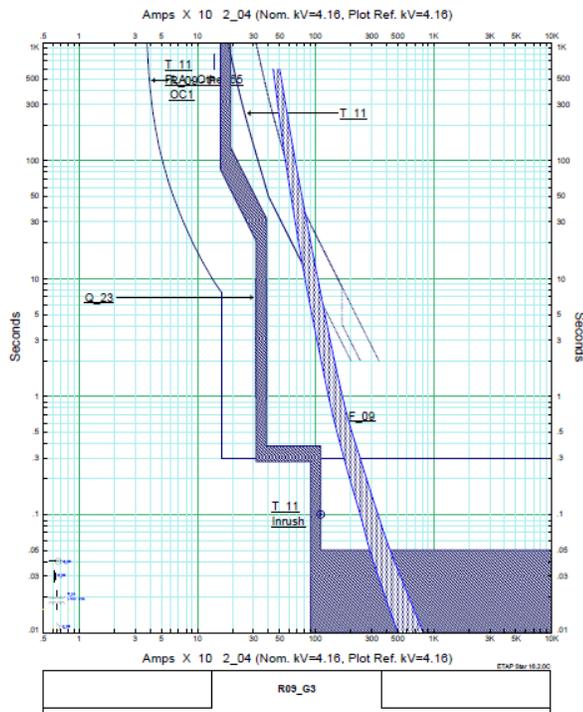


Figura G-9: Curvas tiempo-corriente R_09-G3.

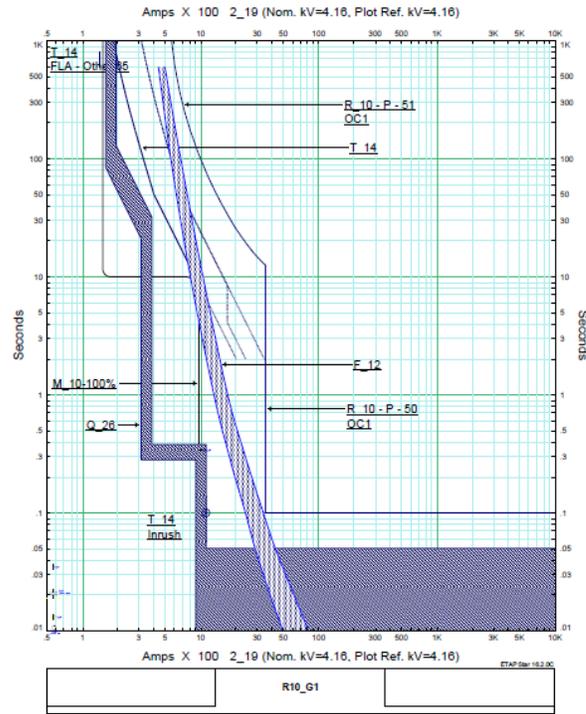


Figura G-10: Curvas tiempo-corriente R_10-G1.

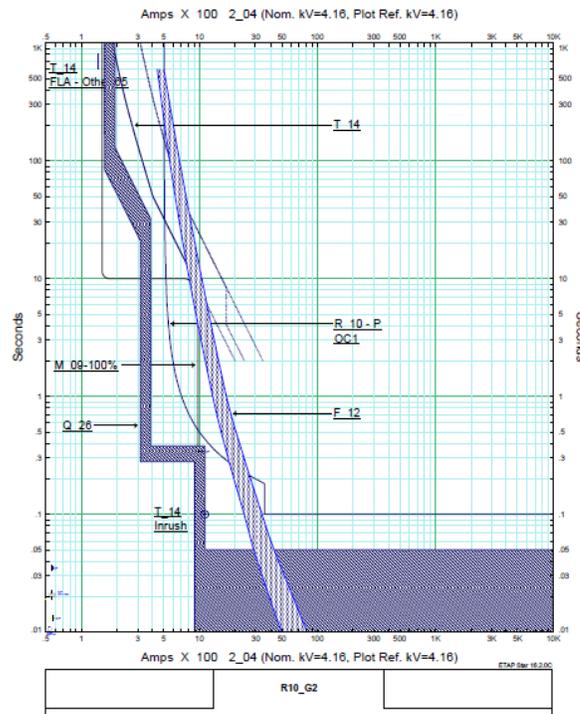


Figura G-11: Curvas tiempo-corriente R_10-G2.

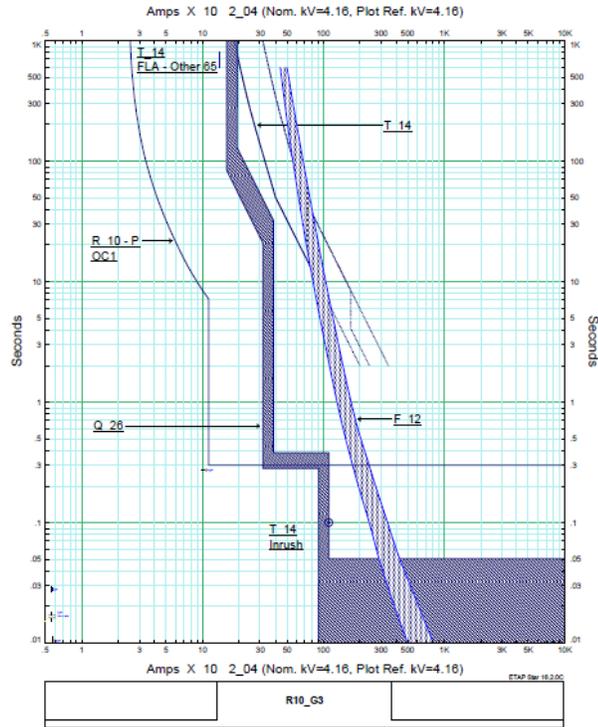


Figura G-12: Curvas tiempo-corriente R_10-G3.

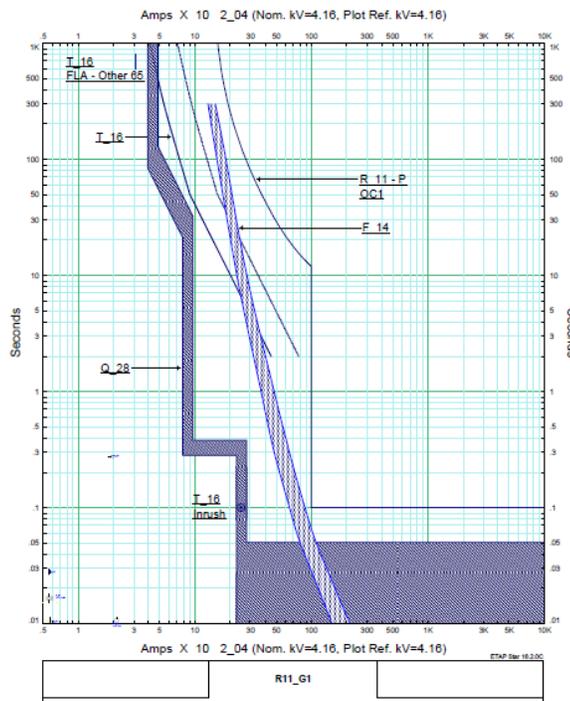


Figura G-13: Curvas tiempo-corriente R_11-G1.

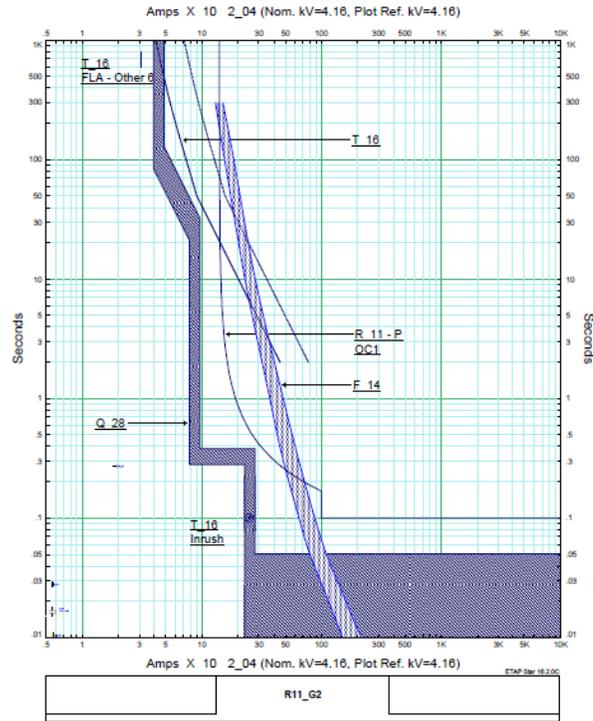


Figura G-14: Curvas tiempo-corriente R_11-G2.

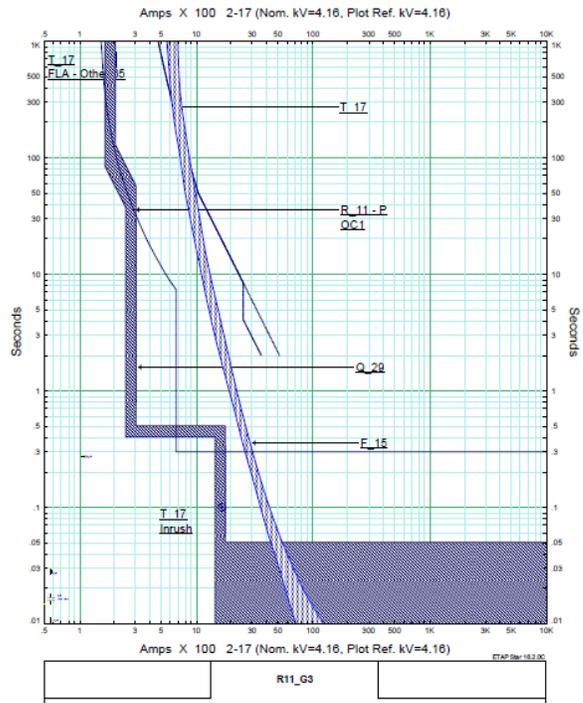


Figura G-15: Curvas tiempo-corriente R_11-G3.

H. Anexo: Energías incidentes

En las siguientes Tablas se reportan las variables eléctricas obtenidas en las simulaciones de arco eléctrico para los diferentes escenarios de operación del sistema analizado.

Tabla H-1: Energías incidentes E1-G1.

ESCENARIO 1 CON GRUPO DE AJUSTES 1							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD Ia' (kA)
1_02	34,5	91,4	16,1	3,4	0,103	Q_02	7,055
1_03	34,5	91,4	16,11	3,4	0,103	Q_03	6,896
2_01	4,16	91,4	2,48	1,9	0,103	Q_02	2,235
2_02	4,16	91,4	2,66	2,1	0,103	Q_03	2,215
2_03	4,16	91,4	11,61	9,4	0,483	Q_04	17,608
2_04	4,16	91,4	12,43	10,1	0,483	Q_05	17,449
2_05	4,16	91,4	3,78	3	0,183	Q_07	16,878
2_06	4,16	91,4	3,82	3	0,183	Q_08	16,337
2_07	4,16	91,4	4,08	3,2	0,183	Q_11	17,653
2_08	4,16	91,4	4,11	3,2	0,183	Q_12	17,307
2_09	4,16	91,4	3,43	2,7	0,183	Q_13	15,669
2_10	4,16	45,7	0,10068	0,1	0,004	F_M1	10,086
2_11	4,16	45,7	0,241653	0,2	0,01	F_M2	10,086
2_12	4,16	45,7	0,963717	0,4	0,039	F_M3	10,119
2_13	4,16	45,7	0,254637	0,2	0,008	F_M4	11,979
2_14	4,16	91,4	2,97	2,3	0,183	Q_09	13,328
2_15	4,16	45,7	7,26	1,1	0,183	Q_10	15,057
2_16	4,16	91,4	0,463394	0,3	0,04	F_M7	10,046
2_17	4,16	91,4	0,122564	0,1	0,008	F_M8	12,178
2_18	4,16	45,7	0,259895	0,2	0,008	F_M9	12,25
2_19	4,16	45,7	0,259895	0,2	0,008	F_M10	12,25
2_20	4,16	45,7	0,273922	0,2	0,008	F_M11	13,298
3_01	0,48	61	1012,72	59,1	149,928	F_01	0,364
3_02	0,48	61	2795,3	117,7	245,143	F_02	0,581
3_03	0,48	61	910,78	55	52,248	Q_07	0,845
3_04	0,48	61	1010,88	59	149,604	F_04	0,364
3_05	0,48	61	2786,39	117,5	244,218	F_05	0,582
3_06	0,48	61	6067,89	199,3	347,768	Q_08	0,81

ESCENARIO 1 CON GRUPO DE AJUSTES 1							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD I _a ' (kA)
3_07	0,48	61	218,89	20,9	61,238	F_07	0,202
3_08	0,48	61	1005,17	58,8	148,606	F_08	0,365
3_09	0,48	61	2757,57	116,7	241,233	F_09	0,583
3_10	0,48	61	218,78	20,9	61,204	F_10	0,202
3_11	0,48	61	1004,14	58,8	148,425	F_11	0,365
3_12	0,48	61	2752,67	116,5	240,725	F_12	0,583
3_13	0,48	61	221,41	21,1	62,082	F_13	0,201
3_14	0,48	61	254,87	23,2	71,378	F_14	0,196

Tabla H-2: Energías incidentes E2-G1.

ESCENARIO 2 CON GRUPO DE AJUSTES 1							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD I _a ' (kA)
1_02	34,5	91,4	15,97	3,3	0,103	Q_02	6,591
2_01	4,16	91,4	2,95	2,3	0,103	Q_02	2,175
2_03	4,16	91,4	13,78	11,2	0,483	Q_04	17,139
2_04	4,16	91,4	13,78	11,2	0,483	Q_04	17,139
2_05	4,16	91,4	4,37	3,4	0,183	Q_07	19,375
2_06	4,16	91,4	4,42	3,5	0,183	Q_08	18,862
2_07	4,16	91,4	4,44	3,5	0,183	Q_11	19,166
2_08	4,16	91,4	4,47	3,5	0,183	Q_12	18,834
2_09	4,16	91,4	3,69	2,9	0,183	Q_13	16,78
2_10	4,16	45,7	0,107287	0,1	0,004	F_M1	10,701
2_11	4,16	45,7	0,257512	0,2	0,01	F_M2	10,701
2_12	4,16	45,7	0,857679	0,4	0,033	F_M3	10,738
2_13	4,16	45,7	0,278459	0,2	0,008	F_M4	13,077
2_14	4,16	91,4	3,29	2,6	0,183	Q_09	14,741
2_15	4,16	45,7	7,74	1,2	0,183	Q_10	16,053
2_16	4,16	91,4	0,437111	0,3	0,037	F_M7	10,347
2_17	4,16	91,4	0,128478	0,1	0,008	F_M8	12,758
2_18	4,16	45,7	0,272379	0,2	0,008	F_M9	12,831
2_19	4,16	45,7	0,272379	0,2	0,008	F_M10	12,831
2_20	4,16	45,7	0,289782	0,2	0,008	F_M11	14,021

ESCENARIO 2 CON GRUPO DE AJUSTES 1							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD Ia' (kA)
3_01	0,48	61	994,15	58,4	146,674	F_01	0,365
3_02	0,48	61	2705,2	115,2	235,815	F_02	0,585
3_03	0,48	61	885,64	54	50,305	Q_07	0,856
3_04	0,48	61	992,59	58,3	146,402	F_04	0,366
3_05	0,48	61	2697,74	114,9	235,046	F_05	0,586
3_06	0,48	61	5562,06	187,8	315,672	Q_08	0,825
3_07	0,48	61	217,79	20,8	60,875	F_07	0,202
3_08	0,48	61	994,79	58,4	146,788	F_08	0,365
3_09	0,48	61	2707,27	115,2	236,032	F_09	0,585
3_10	0,48	61	217,7	20,8	60,844	F_10	0,202
3_11	0,48	61	993,88	58,4	146,63	F_11	0,365
3_12	0,48	61	2702,97	115,1	235,588	F_12	0,585
3_13	0,48	61	220,3	21	61,711	F_13	0,201
3_14	0,48	61	253,66	23,1	70,972	F_14	0,197

Tabla H-3: Energías incidentes E3-G1.

ESCENARIO 3 CON GRUPO DE AJUSTES 1							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD Ia' (kA)
2_03	4,16	91,4	38,23	32,1	21,284	Q_13	0,613
2_04	4,16	91,4	38,23	32,1	21,284	Q_13	0,613
2_05	4,16	91,4	31,34	26,1	17,586	Q_07	1,343
2_06	4,16	91,4	38,5	32,3	21,702	Q_13	0,605
2_07	4,16	91,4	38,51	32,3	21,684	Q_13	0,605
2_08	4,16	91,4	38,51	32,3	21,684	Q_13	0,605
2_09	4,16	91,4	114,32	98,8	64,421	Q_29	4,98
3_01	0,48	61	3239,81	130,1	599,991	F_01	0,285
3_02	0,48	61	309561,47	2876	38957,438	Q_13	0,14
3_03	0,48	61	4349,3	159	423,578	Q_13	0,179
3_04	0,48	61	3236,74	130,1	599,991	F_04	0,284
3_05	0,48	61	249139,89	2481,8	31397,947	Q_13	0,141
3_07	0,48	61	398,39	31,4	125,377	F_07	0,177
3_08	0,48	61	3236,99	130,1	599,991	F_08	0,284
3_09	0,48	61	267575,5	2605,1	33715,418	Q_13	0,141

ESCENARIO 3 CON GRUPO DE AJUSTES 1							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
3_10	0,48	61	398,39	31,4	125,377	F_10	0,177
3_11	0,48	61	3236,99	130,1	599,991	F_11	0,284
3_12	0,48	61	267575,5	2605,1	33715,418	Q_13	0,141
3_13	0,48	61	398,4	31,4	125,381	F_13	0,177
3_14	0,48	61	441,91	33,7	138,185	F_14	0,174
3_15	0,48	45,7	2535,13	21	87,523	Q_29	4,272

Tabla H-4: Energías incidentes E1-G2.

ESCENARIO 1 CON GRUPO DE AJUSTES 2							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
1_02	34,5	91,4	16,1	3,4	0,103	Q_02	7,055
1_03	34,5	91,4	16,11	3,4	0,103	Q_03	6,896
2_01	4,16	91,4	2,48	1,9	0,103	Q_02	2,235
2_02	4,16	91,4	2,66	2,1	0,103	Q_03	2,215
2_03	4,16	91,4	11,61	9,4	0,483	Q_04	17,608
2_04	4,16	91,4	12,43	10,1	0,483	Q_05	17,449
2_05	4,16	91,4	3,78	3	0,183	Q_07	16,878
2_06	4,16	91,4	3,82	3	0,183	Q_08	16,337
2_07	4,16	91,4	4,08	3,2	0,183	Q_11	17,653
2_08	4,16	91,4	4,11	3,2	0,183	Q_12	17,307
2_09	4,16	91,4	3,43	2,7	0,183	Q_13	15,669
2_10	4,16	45,7	0,10068	0,1	0,004	F_M1	10,086
2_11	4,16	45,7	0,241653	0,2	0,01	F_M2	10,086
2_12	4,16	45,7	0,963717	0,4	0,039	F_M3	10,119
2_13	4,16	45,7	0,254637	0,2	0,008	F_M4	11,979
2_14	4,16	91,4	2,97	2,3	0,183	Q_09	13,328
2_15	4,16	91,4	3,45	2,7	0,183	Q_10	15,057
2_16	4,16	91,4	0,463394	0,3	0,04	F_M7	10,046
2_17	4,16	91,4	0,122564	0,1	0,008	F_M8	12,178
2_18	4,16	45,7	0,259895	0,2	0,008	F_M9	12,25
2_19	4,16	45,7	0,259895	0,2	0,008	F_M10	12,25
2_20	4,16	45,7	0,273922	0,2	0,008	F_M11	13,298

ESCENARIO 1 CON GRUPO DE AJUSTES 2							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
3_01	0,48	61	1012,72	59,1	149,928	F_01	0,364
3_02	0,48	61	39,56	6,5	3,47	Q_07	0,567
3_03	0,48	61	18,06	3,8	1,036	Q_07	0,845
3_04	0,48	61	1010,88	59	149,604	F_04	0,364
3_05	0,48	61	2786,39	117,5	244,218	F_05	0,582
3_06	0,48	61	34,17	5,9	1,958	Q_08	0,81
3_07	0,48	61	218,89	20,9	61,238	F_07	0,202
3_08	0,48	61	1005,17	58,8	148,606	F_08	0,365
3_09	0,48	61	20,92	4,2	1,83	Q_11	0,554
3_10	0,48	61	218,78	20,9	61,204	F_10	0,202
3_11	0,48	61	1004,14	58,8	148,425	F_11	0,365
3_12	0,48	61	56,59	8,3	4,949	Q_12	0,54
3_13	0,48	61	3,5	1,3	0,98	Q_13	0,198
3_14	0,48	61	3,73	1,3	1,046	Q_13	0,194

Tabla H-5: Energías incidentes E2-G2.

ESCENARIO 2 CON GRUPO DE AJUSTES 2							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
1_02	34,5	91,4	15,97	3,3	0,103	Q_02	6,591
2_01	4,16	91,4	2,95	2,3	0,103	Q_02	2,175
2_03	4,16	91,4	13,78	11,2	0,483	Q_04	17,139
2_04	4,16	91,4	13,78	11,2	0,483	Q_04	17,139
2_05	4,16	91,4	4,37	3,4	0,183	Q_07	19,375
2_06	4,16	91,4	4,42	3,5	0,183	Q_08	18,862
2_07	4,16	91,4	4,44	3,5	0,183	Q_11	19,166
2_08	4,16	91,4	4,47	3,5	0,183	Q_12	18,834
2_09	4,16	91,4	3,69	2,9	0,183	Q_13	16,78
2_10	4,16	45,7	0,107287	0,1	0,004	F_M1	10,701
2_11	4,16	45,7	0,257512	0,2	0,01	F_M2	10,701
2_12	4,16	45,7	0,857679	0,4	0,033	F_M3	10,738
2_13	4,16	45,7	0,278459	0,2	0,008	F_M4	13,077
2_14	4,16	91,4	3,29	2,6	0,183	Q_09	14,741
2_15	4,16	91,4	3,68	2,9	0,183	Q_10	16,053

ESCENARIO 2 CON GRUPO DE AJUSTES 2							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
2_16	4,16	91,4	0,437111	0,3	0,037	F_M7	10,347
2_17	4,16	91,4	0,128478	0,1	0,008	F_M8	12,758
2_18	4,16	45,7	0,272379	0,2	0,008	F_M9	12,831
2_19	4,16	45,7	0,272379	0,2	0,008	F_M10	12,831
2_20	4,16	45,7	0,289782	0,2	0,008	F_M11	14,021
3_01	0,48	61	994,15	58,4	146,674	F_01	0,365
3_02	0,48	61	37,49	6,3	3,268	Q_07	0,573
3_03	0,48	61	17,85	3,8	1,014	Q_07	0,856
3_04	0,48	61	992,59	58,3	146,402	F_04	0,366
3_05	0,48	61	2697,74	114,9	235,046	F_05	0,586
3_06	0,48	61	32,05	5,7	1,819	Q_08	0,825
3_07	0,48	61	217,79	20,8	60,875	F_07	0,202
3_08	0,48	61	994,79	58,4	146,788	F_08	0,365
3_09	0,48	61	20,25	4,2	1,766	Q_11	0,558
3_10	0,48	61	217,7	20,8	60,844	F_10	0,202
3_11	0,48	61	993,88	58,4	146,63	F_11	0,365
3_12	0,48	61	49,54	7,6	4,318	Q_12	0,546
3_13	0,48	61	3,48	1,3	0,975	Q_13	0,199
3_14	0,48	61	3,72	1,3	1,04	Q_13	0,194

Tabla H-6: Energías incidentes E3-G2.

ESCENARIO 3 CON GRUPO DE AJUSTES 2							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
2_03	4,16	91,4	0,544614	0,4	0,303	Q_13	0,613
2_04	4,16	91,4	0,544614	0,4	0,303	Q_13	0,613
2_05	4,16	91,4	0,543253	0,4	0,305	Q_13	0,606
2_06	4,16	91,4	0,541343	0,4	0,305	Q_13	0,605
2_07	4,16	91,4	0,541793	0,4	0,305	Q_13	0,605
2_08	4,16	91,4	0,541793	0,4	0,305	Q_13	0,605
2_09	4,16	91,4	114,32	98,8	64,421	Q_29	4,98
3_01	0,48	61	3239,81	130,1	599,991	F_01	0,285
3_02	0,48	61	725,72	47,1	91,33	Q_13	0,14
3_03	0,48	61	13,87	3,2	1,351	Q_13	0,179

ESCENARIO 3 CON GRUPO DE AJUSTES 2							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
3_04	0,48	61	3236,74	130,1	599,991	F_04	0,284
3_05	0,48	61	584,66	40,7	73,683	Q_13	0,141
3_07	0,48	61	398,39	31,4	125,377	F_07	0,177
3_08	0,48	61	3236,99	130,1	599,991	F_08	0,284
3_09	0,48	61	627,7	42,7	79,092	Q_13	0,141
3_10	0,48	61	398,39	31,4	125,377	F_10	0,177
3_11	0,48	61	3236,99	130,1	599,991	F_11	0,284
3_12	0,48	61	627,7	42,7	79,092	Q_13	0,141
3_13	0,48	61	398,4	31,4	125,381	F_13	0,177
3_14	0,48	61	441,91	33,7	138,185	F_14	0,174
3_15	0,48	45,7	2535,13	21	87,523	Q_29	4,272

Tabla H-7: Energías incidentes E3-G3.

ESCENARIO 3 CON GRUPO DE AJUSTES 3							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD la' (kA)
2_03	4,16	91,4	0,8981	0,7	0,5	Q_29	4,93
2_04	4,16	91,4	0,8981	0,7	0,5	Q_29	4,93
2_05	4,16	91,4	0,683164	0,5	0,383	Q_07	1,343
2_06	4,16	91,4	0,680113	0,5	0,383	Q_08	1,577
2_07	4,16	91,4	0,680862	0,5	0,383	Q_11	1,541
2_08	4,16	91,4	0,680862	0,5	0,383	Q_12	1,541
2_09	4,16	91,4	0,88726	0,7	0,5	Q_29	4,98
3_01	0,48	61	65,83	9,2	12,192	Q_07	0,22
3_02	0,48	61	3,63	1,3	0,383	Q_07	0,366
3_03	0,48	61	4,69	1,5	0,383	Q_07	0,467
3_04	0,48	61	2,47	1	0,383	Q_08	0,305
3_05	0,48	61	3,63	1,3	0,383	Q_08	0,431
3_07	0,48	61	25,9	4,9	8,152	Q_11	0,155
3_08	0,48	61	2,47	1	0,383	Q_11	0,298
3_09	0,48	61	3,63	1,3	0,383	Q_11	0,421
3_10	0,48	61	1,45	0,7	0,383	Q_12	0,182
3_11	0,48	61	2,47	1	0,383	Q_12	0,298
3_12	0,48	61	3,63	1,3	0,383	Q_12	0,421

ESCENARIO 3 CON GRUPO DE AJUSTES 3							
ID	kV (kV)	Working Distance (cm)	Total Energy (cal/cm ²)	AFB (m)	Final FCT (sec)	Source PD ID	Source PD Ia' (kA)
3_13	0,48	61	398,4	31,4	125,381	F_13	0,177
3_14	0,48	61	441,91	33,7	138,184	F_14	0,174
3_15	0,48	45,7	17,26	1,7	0,5	Q_29	5,026

Bibliografía

- [1] IEEE Std 1584, *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*. 2002.
- [2] NFPA 70E, *Standard for Electrical Safety in the Workplace*. 2015.
- [3] Ministerio de Minas y Energía, *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*. 2013.
- [4] J. Simms and G. Johnson, "Protective Relaying Methods for Reducing Arc Flash Energy," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 2, pp. 803–813, 2013.
- [5] A. Soares and J. Vieira, "Case Study: Adaptative Overcurrent Protection Scheme Applied to an Industrial Plant with Cogeneration Units," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008, p. 5.
- [6] J. Das, *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*. IEEE Press, 2012.
- [7] R. Campbell and D. Dini, *Occupational Injuries From Electrical Shock and Arc Flash Events*. The Fire Protection Research Foundation, 2016.
- [8] IEEE Std 141, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. 1999.
- [9] IEEE Std 242, *IEEE Recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems*. 2001.
- [10] R. Lee, "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-18, no. 3, pp. 246–251, 1982.
- [11] R. Doughty, T. Neal, and H. L. Floyd, "Predicting Incident Energy to Better Manage the Electric Arc Hazard on 600-V Power Distribution Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 257–269, 2000.
- [12] ANSI/IEEE C2, *National Electrical Safety Code*. 2007.
- [13] L. Kumpulainen, A. Hussain, M. Lehtonen, and J. Kay, "Preemptive Arc Fault Detection Techniques in Switchgear and Controlgear," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 4, pp. 1911–1919, 2013.
- [14] IEC 61850, *Communication networks and systems for power utility automation*. 2017.

- [15] S. Horowitz and A. Phadke, *Power System Relaying*, Third Edit. Wiley, 2008.
- [16] IEC 60255-3, *Electrical relays - Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time*. 1989.
- [17] IEEE Std C37.91, *IEEE Guide for protecting Power Transformers*. 2008.
- [18] R. Nylén, *Power Transformer Protection Application Guide*. ABB Relays, 1988.
- [19] G. Rockefeller, *Transformer Protection Application Guide*. Basler Electric, 2007.
- [20] *NFPA 70 National Electrical Code*. 2014.
- [21] T. Smith, *The ABC's of Overcurrent Coordination*. EPowerEngineering, 2006.
- [22] IEEE Std C37.96, *IEEE Guide for AC Motor Protection*. 2012.
- [23] D. Reimert, *Protective Relaying for Power Generation Systems*. 2006.
- [24] IEEE Std 3004.8, *Recommended Practice for Motor Protection in Industrial and Commercial Power Systems*. 2016.
- [25] J. Kay, "Selection, Application, and Interchangeability of Medium-Voltage Power Fuses in Motor Control Centers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 6, pp. 1574–1581, 2006.
- [26] IEEE Std C37.46, *IEEE Standard Specifications for High-Voltage (>1000 V) Expulsion and Current-Limiting Power Class Fuses and Fuse Disconnecting Switches*. 2010.
- [27] IEEE Std 1584.1, *IEEE Guide for the Specification of Scope and Deliverable Requirements for an Arc-Flash Hazard Calculation Study in Accordance with IEEE Std 1584(TM)*. 2013.
- [28] IEEE Std 399, *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*. 1997.
- [29] Baldor, *Large Frame AC Induction Motors*. .