



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Arte en Energía y Ambiente

**COORDINACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE
TRANSFORMADORES DE UNA PLANTA CEMENTERA**

Ing. Orlando José Páez Rodríguez

Asesorado por Msc. Ing. Juan Sebastián De León Regil Wald

Guatemala, marzo de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COORDINACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE
TRANSFORMADORES DE UNA PLANTA CEMENTERA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. ORLANDO JOSÉ PÁEZ RODRÍGUEZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. JUAN SEBASTIÁN DE LEÓN REGIL WALD

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, MARZO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgén Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

DIRECTOR	MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
COORDINADOR	MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	MSc. Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

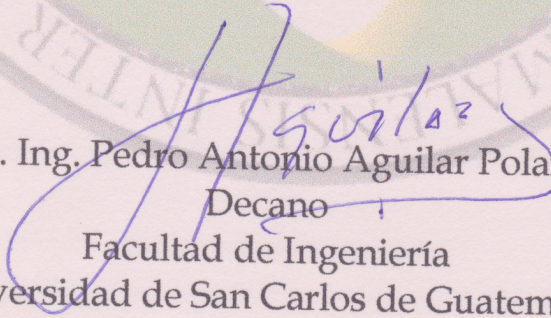
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: **"COORDINACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE TRANSFORMADORES DE UNA PLANTA CEMENTERA"** presentado por el Ingeniero Mecánico Electricista Orlando José Páez Rodríguez, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


MSc. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Doctorado: Cambio Climático y Sostenibilidad. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

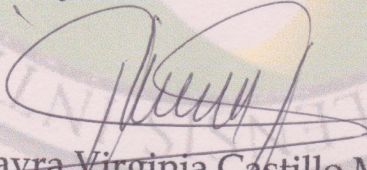
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-009

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"COORDINACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE TRANSFORMADORES DE UNA PLANTA CEMENTERA"** presentado por el Ingeniero Mecánico Electricista **Orlando José Páez Rodríguez**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora a.i.

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Doctorado: Cambio Climático y Sostenibilidad. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2018-009

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente del Trabajo de Graduación titulado **"COORDINACIÓN DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE TRANSFORMADORES DE UNA PLANTA CEMENTERA"** presentado por el Ingeniero Mecánico Electricista **Orlando José Páez Rodríguez**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Doctorado: Cambio Climático y Sostenibilidad. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la sabiduría y fuerza necesaria.
Mi madre	Por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años.
Mi hermano	Por sus consejos brindados.
Mi esposa	Por su apoyo, esfuerzo y cariño brindado.
Mis hijos	Por ser mi razón de alegrías y superación.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una importante influencia en mi carrera.

**Ing. Juan Sebastián
De León Regil Wald**

Por el apoyo prestado durante la elaboración del trabajo.

**Ing. Cristian Kin
Flores**

Por su apoyo en facilitar las pruebas eléctricas para respaldar este trabajo.

Cementos Progreso

Por el apoyo desarrollando este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. La industria del cemento.....	1
1.2. Sistema eléctrico de potencia.....	2
1.2.1. Transformador de potencia.....	3
1.2.1.1. Punto de magnetización.....	3
1.2.1.2. Curva ANSI.....	4
1.2.1.3. Corriente a plena carga.....	6
1.2.1.4. Limites NEC.....	7
1.2.2. Motor eléctrico.....	8
1.2.2.1. Curva de arranque.....	9
1.2.2.2. Curva de daño térmico.....	10
1.3. Fallas en los sistemas eléctricos de potencia.....	10
1.3.1. Falla monofásica a tierra (L-G).....	11
1.3.2. Falla bifásica a tierra (L-L-G).....	11
1.3.3. Falla bifásica aislada (L-L).....	11

1.3.4. Falla trifásica aislada (L-L-L).....	12
1.4. Sistemas de protección eléctrica.....	12
1.4.1. Medidor de energía.....	13
1.4.2. Relevador de protección.....	13
1.4.3. Coordinación de protección eléctrica.....	16
1.4.4. Software especializado en sistemas de protección.....	17
1.4.4.1. Software de coordinación de protección ETAP.....	17
2. COMPILACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS.....	19
2.1. Valores límite de transformadores.....	20
2.2. Valores críticos de operación y arranque de motores eléctricos....	21
3. INTERPRETACIÓN Y SIMULACIÓN DE NUEVOS PARÁMETROS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA.....	23
3.1. Ingreso de parámetros en software de protección eléctrica.....	28
3.2. Simulación y análisis de curva actual de protección eléctrica.....	30
3.2.1. Curva de disparo de baja tensión de equipos Multilin 745....	30
3.2.2. Curva de disparo de baja tensión de equipos Multilin 750....	31
3.2.3. Curva de disparo de alta tensión de equipos Multilin 745.....	32
4. MODIFICACIÓN Y SIMULACIÓN DE PARÁMETROS PARA NUEVA CURVA DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA.....	35
4.1. Modificación y análisis de nuevas curvas de disparo de baja tensión de equipos Multilin 745.....	35
4.2. Modificación y análisis de nuevas curvas de disparo de baja tensión de equipos Multilin 750.....	37
4.3. Modificación y análisis de nuevas curvas de disparo de alta tensión de equipos Multilin 745.....	38

4.4. Análisis de mejora y funcionamiento de nueva curva de protección eléctrica en el sistema de transformadores.....	41
5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	45
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	49
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva ANSI	5
2.	Curva de protección	16
3.	Unifilar alimentación de alta tensión de planta	19
4.	Curva de arranque de motor eléctrico	22
5.	Ingreso de un OCR en el diagrama unifilar	23
6.	Selección de librerías de equipos de protección	24
7.	Ingreso de parámetros de transformadores de medición	25
8.	Parámetros de curva de protección	26
9.	Modo Star... ..	27
10.	Representación gráfica de curva de disparo	27
11.	Curva actual de protección Multilin 745 de baja tensión	31
12.	Curva actual de protección Multilin 750 de baja tensión	32
13.	Curva actual de protección Multilin 645 de alta tensión	33
14.	Nueva curva de protección Multilin 745 de baja tensión	36
15.	Nueva curva de protección Multilin 750 de baja tensión	38
16.	Nueva curva de protección Multilin 745 de alta tensión	41
17.	Nueva curva de protección de baja tensión	42
18.	Nueva curva de protección de baja y alta tensión	43
19.	Nueva curva de protección de baja y alta tensión junto a curva destructiva de los transformadores	46

TABLAS

I.	Múltiplos de corriente para puntos de magnetización en transformadores	4
II.	Clasificación de transformadores, según su capacidad	5
III.	Ecuaciones curva ANSI	6
IV.	Carga según temperatura en transformadores	7
V.	Limites NEC para transformadores	8
VI.	Disposición de equipos de protección	20
VII.	Valores eléctricos de operación de transformadores	21
VIII.	Valores eléctricos de operación máxima de transformadores	22
IX.	Parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 lado de alta tensión	28
X.	Parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 y 750 lado de baja tensión	29
XI.	Nuevos parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 y 750 lado de baja tensión	47
XII.	Nuevos parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 lado de alta tensión	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
V	Voltios
A	Amperios
VA	Volt-amperios
h	Hora
m	Minuto
s	Segundo
pasos/s	Pasos por segundo
kVA	Kilo volt-amperios
Z_T	Impedancia del transformador en valores unitarios
Z_s	Impedancia del sistema en valores unitarios
I_{Pc}	Corriente del transformador
%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
OA	Aire y aceite
FA	Aire forzado
Z	Impedancia
HP	Caballos de fuerza
L-G	Falla monofásica a tierra
L-L-G	Falla bifásica a tierra
L-L	Falla bifásica aislada
L-L-L	Falla trifásica aislada
OCR	Relé de sobre corriente
CT	Transformador de corriente

Símbolo	Significado
PT	Transformador de voltaje
“P”	Sobre corriente
“Q”	Sobre corriente de secuencia negativa
T1	Transformador 1
T2	Transformador 2
T3	Transformador 3
Hz	Ciclos por segundo
MW	Mega watt
kWh	Kilo watt por hora

GLOSARIO

ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
Curva de disparo	Representación gráfica de parámetros de un equipo de protección eléctrica.
ETAP	Programa de computación para protecciones eléctricas.
Microsoft Excel	Paquete computacional para manejo de datos, a través de tablas.
Multilin	Equipo de protección eléctrica del fabricante General Electric.
NEC	National Electric Code.
Software	Paquete de programación para su uso en computadora.
STAR	Módulo de parametrización de dispositivos de protección virtual en el programa ETAP.
Vista View	Módulo para graficar parámetros de protecciones eléctricas en el programa ETAP.

RESUMEN

Las protecciones eléctricas que se encuentran en la industria protegen a los equipos y procesos de fallas de energía internas como externas. En una planta cementera donde ocurren cambios repentinos de energía, por arranque de equipos de gran dimensión, se debe tener una coordinación apropiada que pueda distinguir entre arranques de equipos y una falla real en el sistema eléctrico.

A través de la recopilación y análisis de mediciones eléctricas en los puntos de interés, se evaluaron los valores máximos que alcanzan los equipos durante su arranque y los valores promedio de operación continua.

Utilizando el software para coordinación eléctrica ETAP, se compilaron los parámetros e información de los equipos de protección instalados y datos técnicos de las instalaciones eléctricas de la planta. Con el software se desplegó gráficamente las curvas de disparo configuradas actualmente a los equipos, para analizar contra los valores de operación de la planta y verificar si cumplen con las especificaciones eléctricas demandas.

Se modificaron los parámetros de configuración de los dispositivos de protección, para optimizar el monitoreo de límites de las curvas de disparo, así exista una coordinación adecuada que pueda asegurar el actuar de los dispositivos de protección de forma confiable. Adicionalmente dejar un margen de tolerancia ante algún cambio en la infraestructura interna del sistema eléctrico o una variación leve que pueda ser detectada y puedan accionar la desconexión repentina de la carga monitoreada.

Se graficó una nueva configuración de curvas de disparo de los dispositivos de protección, y se presentan los nuevos parámetros a utilizar en el monitoreo de los transformadores de potencia de entrada a la planta. Se presentó las mejoras de esta nueva disposición, al optimizar el tiempo de reacción de los dispositivos ante fallas reales y una adecuada protección eléctrica en los transformadores.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

La planta industrial en cuestión tiene registros históricos de unidades que han fallado por variaciones eléctricas de gran magnitud, entre los cuales se encuentran equipos críticos de alta precisión necesarios para la producción. Se observan comportamientos errados por parte de los dispositivos de protección referente a la carga eléctrica y fallas del sistema. Al operar las mismas ante disturbios leves en el sistema eléctrico interno como externo han interrumpido la producción de la planta.

La investigación tiene como finalidad mejorar la confiabilidad y continuidad del servicio eléctrico, a fin de lograr optimizar la eficiencia energética, a través de la coordinación de las protecciones de la industria del cemento. Logra tener selectividad y rapidez en la detección de fallas consiguiendo el resguardo del sistema.

Alcanzar una coordinación adecuada de protecciones asegura que los equipos dentro de una red eléctrica se encuentran resguardados contra cualquier perturbación que pueda dañarlos de forma parcial o permanente, y protege la operación de la industria, para evitar sobrecostos que lleguen al consumidor.

El beneficio directo es para la industria del cemento en cualquier parte del mundo, donde podrá ser replicado, así mejorar sus protecciones y sus procesos. Indirectamente se contribuye al sistema eléctrico al ser más confiable ante interrupciones al ocurrir fallas.

¿Pueden modificarse los parámetros de las protecciones actuales para responder a fallas reales y asegurar la eficiencia energética de una planta cementera? Al realizar una coordinación de protecciones se toma en cuenta los diferentes parámetros y características de los equipos en operación, para lograr unificar los valores necesarios en las curvas de protecciones, afinar las desconexiones eléctricas con base a las necesidades del sistema y mejorar la eficiencia.

¿Cuáles son los principales factores técnicos a tomar en cuenta para la modificación de parámetros de las protecciones? Utilizando información del fabricante y datos históricos de mediciones eléctricas en los puntos de interés, se consigue analizar y dar a conocer el comportamiento del sistema eléctrico.

¿Cómo comparar técnicamente los equipos de protección utilizados, las configuraciones de curvas de protección y la capacidad eléctrica de los transformadores? Empleando las gráficas de las curvas de disparo de los dispositivos, se evalúa sobre las disposiciones más adecuadas a utilizar con base a las características del sistema eléctrico.

¿Cómo establecer una nueva configuración de las curvas de protección actuales con base a los equipos en operación y comprobar su efectividad utilizando software especializado? La utilización de software especializado permite el ingreso de las configuraciones de los dispositivos, a partir de ello graficar las curvas actuales de protección y comprobar las características de cada equipo. A través de este análisis, se obtiene una integración de todos los equipos disponibles y alcanzar una coordinación eléctrica efectiva. Finalmente, se concluye con una comparación entre las curvas actuales y las propuestas.

OBJETIVOS

General

Modificar los parámetros de las protecciones eléctricas actuales para responder a fallas reales y asegurar la eficiencia energética de una planta cementera.

Específicos

1. Identificar los principales factores técnicos a tomar en cuenta para la modificación de parámetros de las protecciones.
2. Comparar técnicamente los equipos de protección utilizados, las configuraciones de curvas de protección y la capacidad de los transformadores.
3. Establecer una nueva configuración de las curvas de protección actuales con base a los equipos en operación y comprobar su efectividad utilizando software especializado.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Se establece que el estudio es del tipo cuantitativo descriptivo por el tipo de variables que se utilizan, las cuales son cuantitativas y el tipo de estudio se basa en los objetivos que reflejan un alto análisis de datos. Para establecer si existe una relación entre variables se debe aislar los factores que puedan ser causa de un resultado particular y examinar los que deben ser medidos directamente.

Las variables consideradas son recopilaciones de datos históricos como corriente, potencia activa y tiempo. El comportamiento de las mismas no debe ser errático, lo cual podría indicar una mala operación en los equipos de medición o problema en la recolección de datos. Las variables dentro del proceso de investigación se encuentran:

Tabla I. **Variables**

Variable	Magnitud	Tipo variable	Uso en análisis
Voltaje	Voltios (V)	Cuantitativa	Parámetro eléctrico medido en transformadores
Corriente	Amperios (A)	Cuantitativa	Parámetro eléctrico medido en transformadores
Potencia Aparente	Volt-ampere (VA)	Cuantitativa	Parámetro eléctrico medido en transformadores
Tiempo	Día, hora (h), minutos (m), segundos (s)	Cuantitativa	Duración de eventos y respuesta de dispositivos
Pasos	Pasos por segundo (pasos/s)	Cuantitativa	Velocidad de reacción de dispositivos

Fuente: elaboración propia (2016).

La investigación se efectúa en cuatro fases, para la primera fase se recopilan datos históricos de equipos de medición con registros de un mes con intervalos de quince minutos, se toman datos de voltaje, amperaje y potencia aparente. Son descargados, a través de una interfaz por computadora directamente por un sensor óptico, obteniendo una plantilla de valores eléctricos que puede ser visualizada, a través del programa Microsoft Excel. Con los valores obtenidos se obtienen con técnicas estadísticas el promedio y máximo de cada parámetro obtenido.

En la segunda fase, se consultan los manuales técnicos del fabricante para identificar los parámetros recomendados, según el equipo, luego se extrae esta información en trabajo de campo tomando datos de placa, verificación de parámetros de los equipos de protección y verificación del estado de los

equipos. Con esta información y los datos históricos se realiza un análisis general del sistema eléctrico en cuestión.

En la tercera fase, se compara técnicamente los equipos de protección utilizados, las configuraciones de curvas de protección y la capacidad eléctrica de los transformadores, por lo cual la información recolectada se ingresa al software especializado en protecciones donde se grafica las curvas de disparo. En dicho software es necesario como mínimo los parámetros recolectados en las primeras dos fases. Se procede a integrar un nuevo proyecto de coordinación de protecciones eléctricas.

Se ingresa en el software la marca y modelo del equipo de protección a utilizar para cargar la plantilla de valores de fábrica precargados, con ello se compara con los valores nominales. Luego se procede a ingresar datos eléctricos que maneja el equipo como voltaje, corriente y potencia operacional. Con los parámetros ingresados de los equipos analizados se grafica la curva de disparo, en la cual se puede modificar sus parámetros, para mejorar su visualización y de este modo comparar los tiempos que actúan las protecciones.

La cuarta fase establece una nueva configuración de las curvas de protección actuales con base a los equipos en operación y comprobar su efectividad. Por medio del software y el análisis de las curvas de disparo, se compara con los datos históricos recopilados en la primera fase, de este modo unificar valores y verificar si existe un inadecuado dimensionamiento de los tiempos de las protecciones. Se modifican los parámetros necesarios en el software para realizar una nueva gráfica y verificar nuevamente su ajuste, según condiciones de los equipos.

INTRODUCCIÓN

La investigación perteneciente a la Maestría en Arte en Energía y Ambiente corresponde a la línea de investigación de uso eficiente de la energía, enfocado en la división energía aplicada y en la subdivisión uso eficiente en residencias y edificios. En la actualidad muchas industrias dependen de la energía eléctrica en la mayoría de sus procesos, debido a esto es un recurso que debe ser administrado de forma óptima. Al depender del suministro eléctrico para satisfacer sus requerimientos, han adecuado los sistemas para alcanzar los niveles de calidad demandados. El problema más recurrente es la falla de energía por falta de estabilidad, la cual se presenta en variaciones de voltaje y corriente, provocando que los equipos se vean dañados y se interrumpa el servicio eléctrico.

Cuando sucede una variación eléctrica, los equipos de protección son los encargados de interrumpir la falla de forma sistemática antes que afecte al resto del sistema. Entre los equipos más críticos se encuentran los transformadores de potencia, los cuales proveen la energía a la industria. Si llegan a ser afectados por una variación eléctrica pueden resultar dañados sus aislamientos e interrumpir la energía de forma indeterminada, por ello son de alta importancia al momento de coordinar las protecciones eléctricas.

Dentro de la investigación se analiza el comportamiento de operación de una planta industrial de elaboración de cemento, a través de la recopilación de historiales de mediciones eléctricas, para interpretar como influyen los equipos utilizados de grandes dimensiones en la coordinación de protecciones.

En el primer capítulo se presentan los conceptos de un sistema eléctrico y su funcionamiento. Como parte de la integración adecuada de la coordinación de protección se indican las posibles fallas que pueden presentarse en un sistema eléctrico y los equipos utilizados.

El segundo capítulo presenta los resultados de la recolección de datos históricos del sistema eléctrico y de los dispositivos de protección. Utilizando métodos estadísticos para compilar y procesar los valores obtenidos se muestran de forma coherente para interpretar el comportamiento del sistema eléctrico y sus equipos.

En el tercer capítulo, la información recopilada se examina a través del software de computación especializado en protecciones eléctricas ETAP, para el análisis gráfico de la información en donde se puede visualizar de forma más puntual.

En el cuarto capítulo se despliega un incremento en la eficiencia energética al mejorar la coordinación de curvas de disparo actual, brindando un análisis más detallado a los equipos que se utilizan en esta industria y presentar gráficas de curvas de protección más adecuadas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. La industria del cemento

El proceso de fabricación de cemento es muy similar en cualquier lugar, primero se extrae de la cantera piedra caliza que es la principal materia prima. Estas piedras de gran tamaño son transportadas a la planta de trituración. La caliza se tritura y se traslada por cintas transportadoras donde se almacena en tolvas de molino. La caliza se muele junto con otros componentes minoritarios para formar un polvo llamado harina cruda. La harina cruda obtenida se lleva a los silos donde es homogeneizada y posteriormente transportada al horno. (Lejarraga, 2008, p. 85)

La problemática que plantean las cementeras ante paradas de sus procesos por perturbaciones eléctricas es diversa. Por una parte disponen de controles estrictos de calidad de su producto, así como de seguridad medioambiental por control de emisiones de polvo a la atmosfera. El problema principal viene determinado con largos tiempos de arranque del proceso y la necesidad de trabajar en períodos donde el costo de energía es superior para cumplir plazos de entrega. (Lejarraga, 2008, p. 85)

Son industrias con consumos muy importantes con suministro en la red de alta tensión. La principal perturbación que les afecta son variaciones de tensión. Ante interrupciones largas de suministro las partículas en suspensión de la harina cruda se depositan en el material refractario y su solidificación que puede resultar en su contracción y rotura del horno. El proceso de arranque es

complejo, ya que los equipos de grandes dimensiones demandan grandes cantidades de energía en cortos periodos de tiempo. (Lejarraga, 2008, p. 85)

1.2. Sistema eléctrico de potencia

Un sistema eléctrico de potencia está constituido por las centrales de generación, líneas de transmisión interconectadas entre sí, sistemas de distribución y comercialización, esenciales para el consumo de energía eléctrica, los cuales deben ser operados eficazmente para el cumplimiento de la regulación y estándares de calidad. (Quintero Crespo, 2010, p. 8)

Las centrales de generación se encuentran situadas cerca de la fuente de energía primaria y lejana de los centros de consumo, es aquí donde se lleva a cabo la producción de energía eléctrica. Las centrales generadoras se construyen de tal forma, que por las características del terreno se adaptan para su mejor funcionamiento, rendimiento y rentabilidad. (Mendoza, 2003)

Las líneas de transmisión están compuestas por torres metálicas cuando son aéreas, que soportan los cables que transportan la energía eléctrica desde los centros de generación hasta zonas de distribución más cercanas a los consumidores. Para un transporte eficiente se eleva el voltaje, por medio de un transformador de potencia en la subestación de generación y se reduce el nivel, a través de un transformador reductor en la subestación de distribución. (Quintero Crespo, 2010, p. 8)

“En los sistemas de distribución se reducen más el nivel de voltaje a medida que el sistema eléctrico se acerca a los poblados, para facilitar el transporte de la energía eléctrica a los grandes centros industriales y ciudades”. (Quintero Crespo, 2010, p.9)

1.2.1. Transformador de potencia

Los transformadores de potencia permiten originar varios niveles de voltaje, a través del sistema, por razones económicas, técnicas y de eficiencia no es correcto transportar la energía a grandes distancias en un nivel de voltaje bajo. Se define al transformador como un dispositivo electromagnético que permite transformar la magnitud del voltaje, a través de inducción magnética. (Aguirre Cardenas, 2008, p. 71, 72)

La potencia nominal de un transformador depende de los niveles de corriente y voltaje que puedan tolerar sus elementos, y por ende, de las características eléctricas de los materiales con los cuales se construye. De sus elementos se puede mencionar los devanados donde se puede obtener la corriente máxima que circula por ellos, la refrigeración necesaria para los devanados y el nivel de aislamiento que evita que exista un arco eléctrico entre los devanados, la coraza del transformador y entre espiras. (Aguirre Cardenas, 2008, p. 71, 72)

Para conocer la protección eléctrica de un transformador de potencia se considera su protección mecánica, a partir de estos elementos mecánicos se deriva su capacidad eléctrica final. Tres parámetros básicos a considerar son el punto de magnetización, la curva ANSI y la corriente a plena carga. (Mendoza Ventura, 2009, p. 45)

1.2.1.1. Punto de magnetización

Es un parámetro que depende del magnetismo residual del transformador, la corriente de magnetización depende de la capacidad del transformador y se identifica en 0.1 segundos. Este valor de corriente es

calculado con un múltiplo de la corriente nominal del transformador y varía según la capacidad del mismo como lo muestra la Tabla I. (Mendoza Ventura, 2009, p. 45)

Tabla I. **Múltiplos de corriente para punto de magnetización en transformadores**

Capacidad del transformador	Múltiplo de corriente
< 1 500	8
> 1 500 kVA y < 3 750 kVA	10
> 3 750 kVA	12

Fuente: (Mendoza Ventura, 2009, p. 45).

1.2.1.2. Curva ANSI

La curva ANSI representa el límite máximo de protección del transformador, establece las características que deben cumplir los devanados para soportar esfuerzos térmicos y mecánicos sin resultar dañados causados por un cortocircuito. Se debe clasificar los transformadores, según su capacidad para el cálculo de la curva ANSI como se muestra en la Tabla II. (Mendoza Ventura, 2009, p 45)

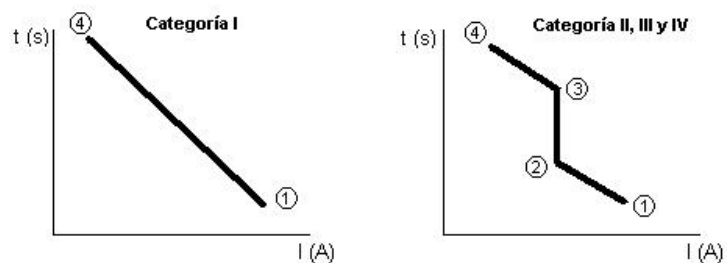
Tabla II. **Clasificación de transformadores, según su capacidad**

Categoría	Capacidad (kVA)	
	Monofásico	Trifásico
I	5 - 500	15 - 500
II	501 - 1 667	501 - 5 000
III	1 668 - 10 000	5 001 - 30 000
IV	> 10 000	> 30 000

Fuente: (Mendoza Ventura, 2009, p. 46).

Se obtienen los valores de tiempo y corriente por medio de la ecuación correspondiente a la clasificación del transformador como muestra la Tabla III y se representa en la Figura 1 sus valores. Donde Z_T es la impedancia del transformador en valores unitarios, Z_s la impedancia del sistema en valores unitarios, I_{PC} la corriente del transformador y luego se incluye el factor de multiplicación ANSI, el cual depende de la conexión de devanados del transformador. (Mendoza Ventura, 2009, p. 46)

Figura 1. **Curva ANSI**



Fuente: (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p. 63).

Tabla III. Ecuaciones curva ANSI

Punto	Categoría del transformador	Tiempo (s)	Corriente (A)
1	I	$1\ 250 (Zt^2)$	I_{pc}/Zt
	II	2	I_{pc}/Zt
	III, IV	2	$I_{pc}/(Zt + Zs)$
2	II	4.08	$0.7 I_{pc}/Zt$
	III, IV	8.0	$0.5 I_{pc}/(Zt + Zs)$
3	II	$2\ 251 (Zt^2)$	$0.7 I_{pc}/Zt$
	III, IV	$5\ 000 (Zt + Zs)^2$	$0.5 I_{pc}/(Zt + Zs)$
4	I, II, III, IV	50	$0.5 I_{pc}$

Fuente: (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p. 64).

1.2.1.3. Corriente a plena carga

La capacidad de sobrecarga del transformador depende del tipo de enfriamiento que utilice, siendo los más comunes OA, FA y OA/FA. Esta capacidad de sobrecarga también depende del factor de diseño por temperatura, ya sea de 55 °C o 65 °C. La Tabla IV muestra el porcentaje de carga a reducir o aumentar por °C, según el tipo de enfriamiento a utilizar. (Mendoza Ventura, 2009, p. 48)

Tabla IV. **Carga según temperatura en transformadores**

Tipo de enfriamiento	% en kVA	
	Reducir carga por cada °C más alto	Aumentar carga por cada °C más abajo
OA	1.5	1.0
OW	1.5	1.0
OA/FA	1.0	0.75
FOW	1.0	0.75

Fuente: (Mendoza Ventura, 2009, p. 47).

1.2.1.4. Límites NEC

“El National Electric Code (NEC) proporciona los límites máximos requeridos para protección contra sobre corriente de transformadores, la Tabla V muestra los límites en porcentaje, tomando como base la corriente nominal del transformador”. (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p.65)

Tabla V. **Límites NEC para transformadores**

Impedancia del transformador	Primario			Secundario		
				Arriba de 600 V		600 V o menos
	Tension V	Ajuste interruptor %	Capacidad del fusible %	Ajuste interruptor %	Capacidad fusible %	Interruptor o fusible %
Z % <6	Arriba de 600	500	300	300	250	125
6 < Z % < 10		400	300	250	250	125

Fuente: (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p. 65).

1.2.2. **Motor eléctrico**

Transforma la energía eléctrica en mecánica, la acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa de energía eléctrica, que interacción con el campo magnético produciendo un movimiento en la máquina. La potencia mecánica de los motores se expresa en caballos de fuerza (HP) o kilowatts, medidas que cuantifican la cantidad de trabajo que un motor eléctrico es capaz de realizar en un período específico de tiempo. (Contreras Villamizar y Sanchez Rodríguez, 2010, p.69)

Dos factores importantes que determinan la potencia mecánica son el par y la velocidad de rotación. El par es una medida de la fuerza que tiende a producir la rotación, la velocidad del motor se establece en revoluciones por minuto. Por tanto, la potencia del motor eléctrico es igual a la velocidad por el par. (Contreras Villamizar y Sanchez Rodríguez, 2010, p.69)

El motor más común en la industria es el de tres fases de inducción, se compone principalmente del rotor y estator. El estator es la parte estacionaria del circuito electromagnético, se compone de láminas de metal delgado que se apilan formando un cilindro hueco, en las ranuras se insertan bobinas de cable aislado. Esta disposición se convierte en un electroimán al entrar en operación el motor. El rotor es la parte giratoria del circuito electromagnético. (Contreras Villamizar y Sanchez Rodríguez, 2010, p. 80)

En los motores eléctricos es necesario considerar sus características de operación, en especial en los de gran capacidad. Características como su curva de arranque y curva de daño térmico son proporcionadas por los fabricantes, existen normas eléctricas establecidas que se emplean para la obtención de las mismas. (Mendoza Ventura, 2009, p. 47, p. 48)

1.2.2.1. Curva de arranque

Está compuesta por diversos parámetros que indican el estado que se encuentra la corriente del motor eléctrico, a través del proceso de arranque. Entre ellos se encuentra la corriente de magnetización que existe en los devanados del motor cuando es energizado, a partir de un estado en reposo. (Mendoza Ventura, 2009, p. 47, p. 48)

La corriente de rotor bloqueado representa la magnitud del motor a velocidad cero, se obtiene del fabricante o a partir de la letra correspondiente a la característica del motor. Otro parámetro es la corriente nominal que se presenta cuando el motor está a plena carga, siendo el segmento final de la curva de arranque de un motor eléctrico. Este depende de la capacidad nominal y nivel de tensión que se encuentra conectado. (Mendoza Ventura, 2009, p. 47, p. 48)

1.2.2.2. Curva de daño térmico

Esta representa tres curvas distintas, la primera es la porción de la corriente más alta que indica el tiempo en que el motor puede permanecer en reposo, después que fue energizado, antes que ocurra daño térmico en el rotor y anillos. La segunda es la curva límite térmico de aceleración de la corriente de rotor bloqueado a la corriente de par de arranque del motor. Por último, la curva de límite térmico de operación que representa la capacidad de sobrecarga del motor durante operaciones de emergencia. (Mendoza Ventura, 2009, p. 48)

1.3. Fallas en los sistemas eléctricos de potencia

Existe balance cuando la magnitud de la corriente y voltaje en sus tres fases presentan un nivel similar, y los ángulos entre estas es de 120° . El ángulo entre ellas en cada fase depende del flujo de potencia en el instante en que se mide. Asimismo, se puede decir que se encuentra en estado estable si las variables eléctricas del sistema permanecen constantes con el tiempo y en un rango de valores aceptable. (García Gonzalez, 2000)

Cuando se presenta una falla generalmente, las subestaciones más cercanas tienen aumento de corriente y una caída de voltaje en las fases que presentan el problema, que depende de la impedancia en la subestación, lo que conlleva cambios en los flujos de potencia, posibles oscilaciones de frecuencia y presencia de armónicos de corriente y voltaje. (García Gonzalez, 2000)

En un sistema eléctrico se pueden presentar varios tipos de falla que pueden ocasionar perturbaciones en el sistema, entre las cuales se destacan por su frecuencia las fallas monofásicas a tierra, presentes en aproximadamente 90% de eventos totales. También existen otras no menos

importantes como las fallas bifásicas a tierra, bifásicas aisladas y trifásicas aisladas. (García Gonzalez, 2000)

1.3.1. Falla monofásica a tierra (L-G)

Este tipo de falla afecta una sola fase del sistema, presentando un aumento de corriente y caída de voltaje donde presenta el problema. Puede ser de baja impedancia con valores cercanos a 0 ohmios o de alta impedancia con valores mayores a 60 ohmios. Las fallas de alta impedancia no presentan gran desviación en la variable corriente de la fase fallada, por lo que no se detecta fácilmente, ya que pueden ser vistas como un aumento en la demanda energía del sistema. (Quintero Crespo, 2010, p.11, p. 12)

1.3.2. Falla bifásica a tierra (L-L-G)

Esta falla afecta dos fases del sistema, generalmente por la caída de una de ellas, haciendo contacto con otro cable y con un elemento externo que conduce a tierra. Cuando se presenta aumenta la corriente en ambas fases y disminuye el voltaje. (Quintero Crespo, 2010, p.11, p. 12)

1.3.3. Falla bifásica aislada (L-L)

Esta presenta características similares a la falla bifásica a tierra, sin embargo, esta se presenta entre dos fases de forma aislada de la tierra. Este tipo es frecuente que se presente cuando suceden incendios debajo de la línea, lo que ocasiona cambios en la rigidez dieléctrica del aire y en sus propiedades de conducción. (Quintero Crespo, 2010, p.12, p. 13)

1.3.4. Falla trifásica aislada (L-L-L)

“Se presenta cuando las tres fases entran en contacto, con caídas de voltaje y aumento de corriente similar para las tres fases. No obstante, esta falla ocurre con poca frecuencia en los sistemas eléctricos”. (Quintero Crespo, 2010, p. 12, p. 13)

1.4. Sistemas de protección eléctrica

“Los equipos de distribución de potencia son susceptibles a daños involuntarios, mala operación y deterioro de los mismos. Esto hace necesario implantar un sistema capaz de detectar valores anormales de corriente, voltaje y frecuencia, un sistema de protección”. (Leon Carrera y Villon, 2002, p. 1)

El sistema de protección supervisa la corriente de los alimentadores y al detectar valores muchos mayores a la normal, abre el circuito, con el fin de aislar y minimizar el área con problemas. Un sistema de protección eléctrica debe mantener el servicio a pesar de una falla permanente en una parte de la red. También debe distinguir entre fallas temporales y permanentes, para evitar una salida permanente ante una falla temporal. (Leon Carrera y Villon, 2002, p. 1)

El uso de la tecnología para aplicaciones en sistemas eléctricos de potencia es creciente, en la planificación, operación y mantenimiento. La automatización de sistemas de distribución, la incorporación de centros de control de motores, tableros de distribución industrial provistos de equipos de monitoreo y control remoto, presenta desafíos en la protección y coordinación de los sistemas eléctricos. (García A., 1993)

1.4.1. Medidor de energía

Mediante el uso de instrumentos eléctricos de medición es posible indicar magnitudes eléctricas como corriente, carga, potencial y energía, o las características eléctricas de los circuitos, como la resistencia, la capacitancia y la inductancia. La información que suministran se da normalmente en una unidad eléctrica del sistema internacional de unidades. (Gonzalez Jiménez, 2011, p. 4)

La medición se realiza mediante sensores que calculan el voltaje y la corriente en la línea de suministro, dichas variables son adquiridas por un controlador que se encarga de hacer los cálculos correspondientes al consumo. Ofrece una enorme flexibilidad, ya que puede registrar y visualizar información adicional como el voltaje, la corriente, la potencia aparente, la potencia real y la potencia reactiva por mencionar algunos parámetros además de la capacidad de comunicación por múltiples vías. (Ortega, 2003)

1.4.2. Relevador de protección

Es un dispositivo que detecta una falla o condición anormal eléctrica y lo separa del sistema en forma automática. Es un equipo de medición que compara cuando una señal de entrada es mayor a una señal de ajuste, cuando esto ocurre se dice que opera o dispara y se manifiesta físicamente abriendo y cerrando contactos eléctricos propios o de relevadores auxiliares para desconectar automáticamente la falla. (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p. 16)

Proporcionan una indicación de su operación mediante banderas o señales luminosas, según el fabricante. El dispositivo de entrada es por lo

genera un transformador de intensidad de corriente y tensión, los cuales realizan la doble función de adaptar las señales procedentes de una perturbación en la instalación a valores aptos para los relevadores de protección y a la vez sirven de separación eléctrica de las partes de tensión alta y baja. (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p. 16)

Los relevadores de acuerdo a sus características Hernández, Rosas Reyes y García (2009) los clasifican de la siguiente manera:

- Por su tiempo de operación.
 - Relevadores de sobre corriente instantáneo, ANSI número 50.
 - Relevadores de sobre corriente con retardo de tiempo, ANSI número 51.

- Por su construcción.
 - Relevadores electromecánicos.
 - Relevadores estáticos.
 - Relevadores digitales.

- Por sus características de tiempo corriente.
 - Tiempo definido.
 - Tiempo inverso.
 - Tiempo muy inverso.
 - Tiempo extremadamente inverso.

- Por su nivel de corriente y forma de conexión.
 - Relevadores de sobre corriente de fase.
 - Relevadores de sobre corriente de neutro.
 - Relevadores trifásicos. (p.17)

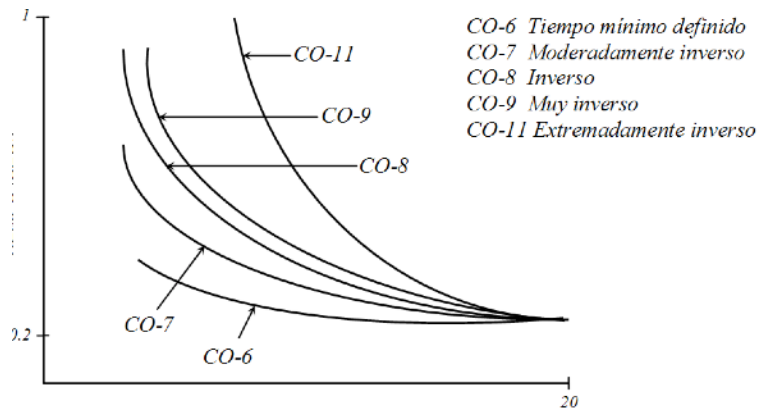
El relevador de sobre corriente con retardo de tiempo (51), tiene una respuesta, la cual se ajusta a una curva característica de tiempo corriente definida o inversa que funciona cuando en el circuito excede de un valor predeterminado. Se conoce como tiempo inverso a la característica en que, a mayor corriente, menor es el tiempo de respuesta; y consecuentemente a menor corriente, mayor será el tiempo de operación. (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p. 18)

El relevador de sobre corriente instantáneo (50), es un equipo con respuesta instantánea para un valor predeterminado, su tiempo de respuesta es menor a tres ciclos. Este no debe usarse en circuitos en donde se encuentren conectados en serie relevadores del mismo tipo y con los cuales se debe de coordinar. (Hernández, Rosas Reyes y García, 2009, p. 18)

Ante disturbios eléctricos los relevadores de protección registran un evento y los cambios de sus variables analógicas. Estos pueden analizar detalladamente los eventos de oscilación y notificar, a través de su sincronización mediante una red de comunicación al usuario final del sistema. (Guzmán Carranza, 2000)

“Los relevadores se construyen con características de operación inversa, muy inversa y extremadamente inversa, para que sea más fácil la coordinación con el sistema eléctrico y sus características”. (Segovia Albarrasin, 2010, p. 12)

Figura 2. **Curva de protección**



Fuente: (Segovia Albarrasin, 2010, p.13).

1.4.3. **Coordinación de protecciones eléctricas**

La selectividad es desconectar de la red una falla, para conseguir la continuidad del servicio. Si no se realiza un estudio previo o éste está mal realizado, un defecto eléctrico puede producir el disparo de varios dispositivos de protección, es por ello que un único defecto puede provocar la falta de tensión errónea. (Gonzalez Jiménez, 2011, p. 130)

Para garantizar una continuidad de servicio es necesario emplear dispositivos de protección coordinados entre sí. A cada tipo de defecto corresponde un dispositivo específico de protección, contra las corrientes de sobrecarga, de cortocircuito, de defecto a tierra o de ausencia de tensión; pero un solo defecto puede solicitar simultáneamente a varios tipos. (Gonzalez Jiménez, 2011, p. 130)

Para una red determinada, el estudio de coordinación de protecciones de una instalación, se basa en las características de los dispositivos publicadas por

los fabricantes. Este estudio se inicia por el análisis de las necesidades en equipos específicos para cada tipo de efecto y sigue un análisis de la coordinación de las diferentes protecciones que pueden verse solicitadas. (Gonzalez Jimenez, 2011, p. 130)

En un sistema eléctrico que ha experimentado gran número de cambios, una falla o variación ocasiona que los elementos de protección que ya estaban instalados y coordinados en el sistema puedan tener problemas operativos como pérdida de selectividad o velocidad de disparo, debido a que los valores con los que se ajustaron y coordinaron previamente cambiaron. (Tuta y Hincapie, 2011)

1.4.4. Software especializado en sistemas de protección

El desarrollo de software especializado ha evolucionado la forma de realizar estudios e investigación en muchos campos de la ingeniería, y en especial en los sistemas eléctricos de potencia. La simulación digital de los sistemas eléctricos de potencia es un tema que ha venido evolucionando a la par con la tecnología informática. Los programas actuales poseen varias herramientas de análisis que combinan criterios técnicos y económicos, además la interfaz gráfica facilita la interpretación de los datos. (Aguirre Cardenas, 2008, p. 1)

1.4.4.1. Software de coordinación de protección ETAP

“ETAP ofrece soluciones de software de ingeniería eléctrica totalmente integradas incluyendo arco eléctrico, flujo de carga, cortocircuito, estabilidad transitoria, coordinación de protecciones, capacidad del cable, flujo de potencia óptima, entre otros”. (ETAP, 2015)

ETAP brinda una coordinación de los dispositivos de protección totalmente integrada y selectividad para el estudio de estado estable y dinámico. Las funciones inteligentes incorporadas de este módulo proporcionan recomendaciones confiables respecto a la viabilidad de los dispositivos de protección que se consideran, alcanzando posibles problemas de diseño y toma de decisiones, para mejorar la fiabilidad del sistema, aumentar la estabilidad del sistema, e impulsar el ahorro financiero. (ETAP, 2015)

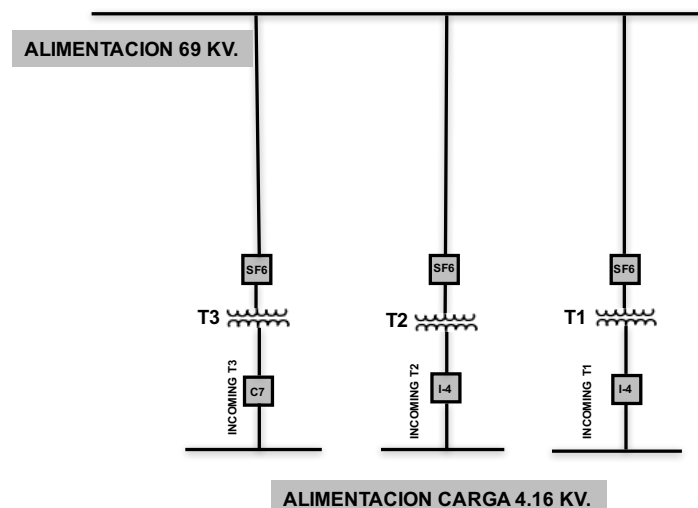
El uso de diagramas inteligentes de una sola línea, bibliotecas completas de dispositivos de protección, y una base de datos en tres dimensiones, ETAP es una herramienta esencial a la hora de realizar el análisis de coordinación de los dispositivos de protección contra sobrecargas, junto con el trazado de las curvas de funcionamiento del dispositivo de protección. (ETAP, 2015)

2. COMPILACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

El sistema analizado consiste en tres transformadores de similar capacidad que dan energía a la planta de producción de cemento. La carga de cada transformador es similar y puede ser conmutada de uno hacia otro permitiendo una maniobrabilidad en casos de necesidad. Por dicha razón, las protecciones eléctricas deben asimilar la carga nominal como también cargas especiales que puedan ser agregadas en un tiempo determinado.

Cada transformador tiene arraigado un interruptor en el lado de baja tensión que permite la desconexión de la carga conectada. La disposición final del sistema de alta potencia que supe la planta de cemento se muestra en la Figura 3.

Figura 3. **Unifilar alimentación de alta tensión de planta**



Fuente: elaboración propia (2016).

Cada transformador tiene un equipo de protección que monitorea sobre corrientes en el lado primario y secundario de los devanados de marca General Electric Multilin 745 que abren un interruptor de alta tensión que desconecta el transformador de la red. Los interruptores del lado de baja tensión poseen un equipo de protección de marca General Electric Multilin 750 que monitorea la corriente circulante a la carga. Dicha disposición se resume en la Tabla VI.

Tabla VI. **Disposición de equipos de protección**

Equipo	Equipo de protección	Monitoreo
Transformador 1	Multilin 745	Alta / Baja tensión
Transformador 2		
Transformador 3		
Celda 6 (Transformador 1)	Multilin 750	Baja tensión
Celda i4 (Transformador 2)		
Celda 7 (Transformador 3)		

Fuente: elaboración propia (2016).

2.1. Valores límites de transformadores

Los tres transformadores son trifásicos de 22.4 MVA inmersos en aceite y refrigeración con aire forzado, manejan un voltaje de transformación de $69 \pm 2.5 \%$ / $4.16 \pm 0.625 \%$ kV. Los tres poseen diferentes fechas de fabricación e impedancias de entre 7.5 a 8.6 % a 85° C, según la capacidad de los transformadores se ubican en categoría III.

Como corriente máxima nominal que se recomienda para el manejo de los transformadores es de 3 200 amperios para conservar la integridad, evitar

daños eléctricos como mecánicos y conservación del aislamiento. Por tanto, este valor será el máximo a tomar como operacional y un máximo de 3 700 amperios por un tiempo de 2 segundos, según lo recomendado por las ecuaciones de la curva ANSI.

Los valores eléctricos de corriente de los transformadores se resumen en la Tabla VII. Se recopiló datos de 1 mes, se omitieron fallas de energía para no afectar el promedio y conocer valores nominales de operación, se analizó con mayor detalle las fallas de energía para sacar las máximas corrientes que ocurren durante el evento, y por último, se analizan los arranques de motores eléctricos y los picos de corriente que demandan durante este tiempo.

Tabla VII. **Valores eléctricos de operación de transformadores**

Operación	Variable	Transformador		
		1	2	3
Nominal de dos cargas conmutadas	Corriente promedio (A)	2 940	3 020	3 012
Falla	Corriente máxima (A)	3 325	3 580	3 489
Arranque de equipos	Corriente máxima (A)	589	560	535

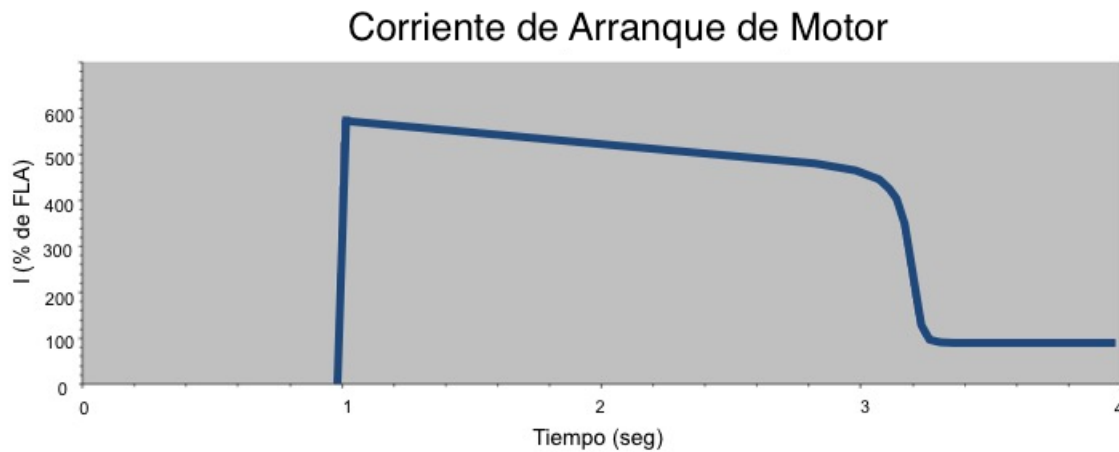
Fuente: elaboración propia (2016).

2.2. **Valores críticos de operación y arranque de motores eléctricos**

Por medio de un monitoreo de alta precisión se obtuvo una curva de arranque del motor eléctrico de mayor capacidad que existe en la planta para tomarlo como referencia y registrar la máxima corriente que demanda. Se

registra un máximo de 580% la cual desciende a 480% durante 2.15 segundos, antes de caer abruptamente como lo muestra la Figura 4. Con referencia de los valores nominales de la Tabla VII mas los valores de corriente de la Figura 4 nos da como resultado la corriente máxima momentánea la cual es inferior a la máxima permitida de 3 700 amperios como se muestra en la Tabla VIII.

Figura 4. **Curva de arranque de motor eléctrico**



Fuente: elaboración propia (2016).

Tabla VIII. **Valores eléctricos de operación máxima de transformadores**

Operación	Variable	Transformador			Corriente máxima
		1	2	3	
Nominal de dos cargas conmutadas	Corriente promedio (A)	2 940	3 020	3 012	< 3 700
Arranque de equipos	Corriente máxima (A)	589	560	535	
Corriente máxima medida	Corriente máxima (A)	3 529	3580	3 547	

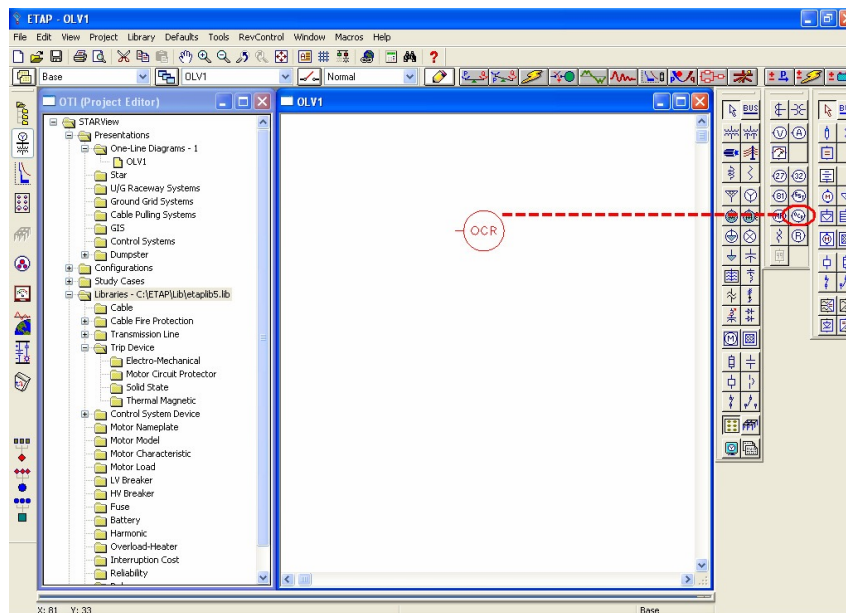
Fuente: elaboración propia.

3. INTERPRETACIÓN Y SIMULACIÓN DE PARÁMETROS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA

Mediante la utilización del software para coordinación de protecciones eléctricas ETAP, se analizan los parámetros de configuración actual de los equipos de protección, para lo cual se utilizan los datos críticos necesarios para la realización de la curva de disparo. Como primer paso, se accede al módulo Coordinación de Dispositivos de Protección Star.

Se elabora un diagrama unifilar del sistema analizado, utilizando la barra de herramientas se ingresa un relé de sobre corriente OCR, el cual representará el equipo de protección eléctrica como lo muestra la Figura 5.

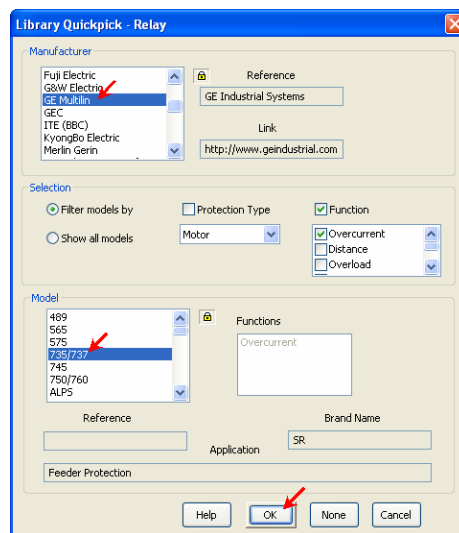
Figura 5. Ingreso de un OCR en el diagrama unifilar



Fuente: (ETAP, 2015).

Al insertar el OCR al diagrama unifilar abre el editor del relé donde tiene una base de datos de equipos de protección de diferentes fabricantes como muestra la Figura 6, en nuestro caso son marca GE Multilin de modelos 745 y 750 especializados para protección de transformadores e interruptores.

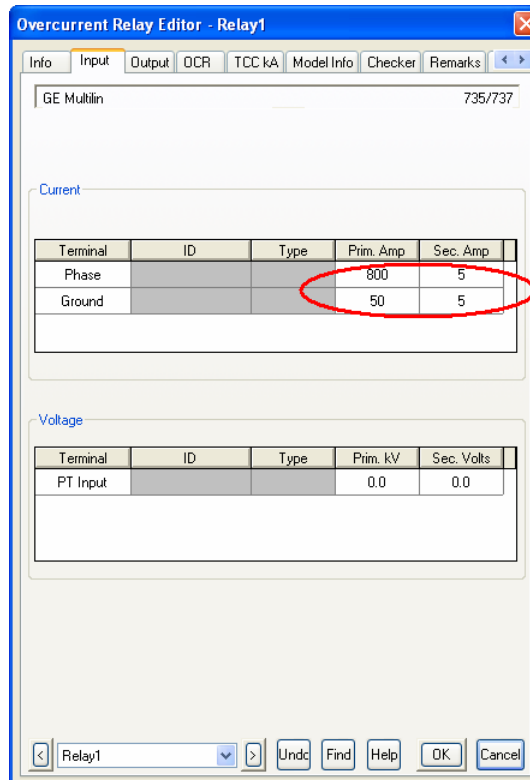
Figura 6. Selección de librerías de equipos de protección



Fuente: (ETAP, 2015).

Seleccionada la librería se avanza a la pestaña de introducción de parámetros de configuración del sistema como muestra la Figura 7, como primer parámetros se introduce los datos nominales primarios y secundarios para los transformadores de corriente (CT), los equipos utilizan una relación de 3 000 : 5 en CT de fase y 50 : 5 en CT de tierra. También se ingresa la relación de voltaje que manejan los equipos de medición (PT), la cual es un voltaje primario de 4 160 V y secundario de 120 V.

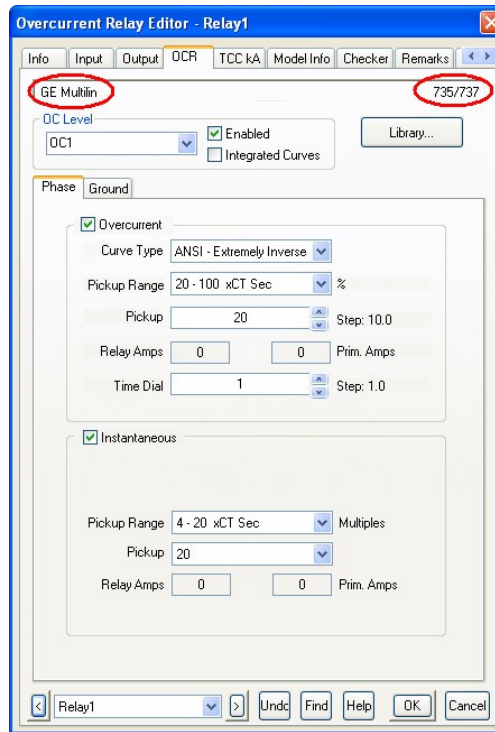
Figura 7. Ingreso de parámetros de transformadores de medición



Fuente: (ETAP, 2015).

La siguiente pestaña a configurar que muestra la Figura 8 es la configuración propia de los parámetros de la curva de protección seleccionada por el usuario, en la sub pestaña de la ventana se introduce las características de sobre corriente, entre los datos necesarios están tipo de curva, el porcentaje de medida requerida por parte de los transformadores de corriente, medida de monitoreo y tiempo de respuesta.

Figura 8. **Parámetros de curva de protección**

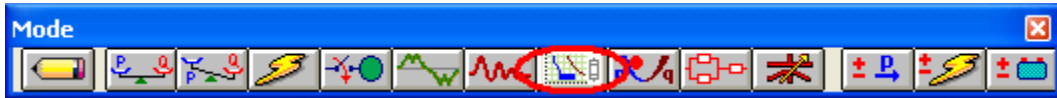


Fuente: (ETAP, 2015).

En la parte inferior se ingresan los datos para la protección instantánea contra sobre corrientes ingresando los datos de valor máximo permitido en múltiplos de 4 a 20 del transformador de corriente y el tiempo de retardo.

Con la configuración ingresada se pasa al modo Star – Coordinación de dispositivos de protección que se muestra en la Figura 9, en este modo de trabajo se selecciona uno o varios dispositivos de protección para la creación de una curva de disparo, esto se hace seleccionando desde la barra de herramientas el botón Crear Vista View.

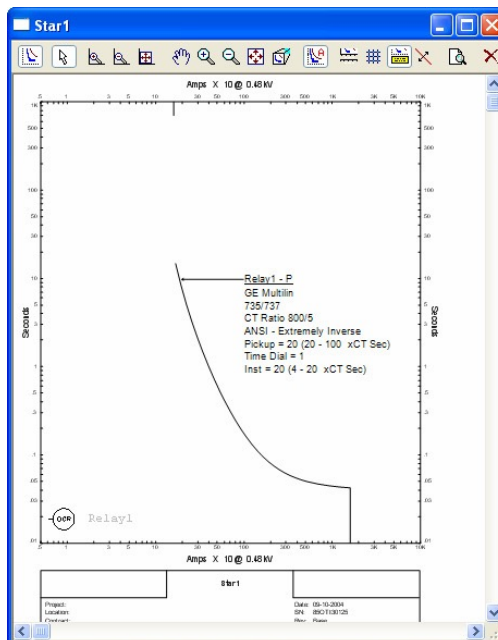
Figura 9. **Modo Star**



Fuente: (ETAP, 2015).

Se abrirá una nueva ventana donde se mostrará la gráfica del dispositivo de protección seleccionado, los ejes representan tiempo por amperaje en múltiplos de mil. Se muestra la información resumida del dispositivo de protección y por medio de la barra de herramienta se puede modificar la visualización de la curva mostrada como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. **Representación gráfica de curva de disparo**



Fuente: (ETAP, 2015).

3.1. Ingreso de parámetros en software de protección eléctrica

De los valores recopilados del sistema se procederá al ingreso de la configuración de los Multilin 745 para lado de baja y alta tensión de los transformadores y los Multilin 750 de lado de baja tensión para graficar, la curva de sobre corriente “P” y la curva de secuencia negativa “Q”. Los datos a ingresar al software se detallan en las Tablas IX y X.

Tabla IX. **Parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 lado de alta tensión**

Multilin	Equipo	Protección de sobre corriente	Relación de CT	Curva ANSI	Rango de medición	Tiempo de retardo
745	Transformador 1 (T1)	“P”	300 : 5	Extremadamente inversa	0.82	3.5
	Transformador 2 (T2)	“P”	300 : 5	Muy inversa	1	2
		“Q”	300 : 5	Extremadamente inversa	0.25	4
	Transformador 3 (T3)	“P”	200 : 5	Extremadamente inversa	1.5	12
		“Q”	200 : 5	Extremadamente inversa	0.25	4

Fuente: elaboración propia (2016).

Tabla X. **Parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 y 750 lado de baja tensión**

Multilin	Equipo	Protección de sobre corriente	Relación de CT	Curva ANSI	Rango de medición	Tiempo de retardo
745	Transformador 1 (T1)	“P”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	1.35	3.5
	Transformador 2 (T2)	“P”	3 000 : 5	Muy inversa	1.2	2
		“Q”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	0.2	3
	Transformador 3 (T3)	“P”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	1.2	9
		“Q”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	0.2	3
	750	Celda 6	“P”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	1.35
“Q”			3 000 : 5	Extremadamente inversa	0.2	1
Celda 7		“P”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	1.21	2
		“Q”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	0.2	1
Celda i4		“P”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	1.11	1.3
		“Q”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	0.2	1

Fuente: elaboración propia (2016).

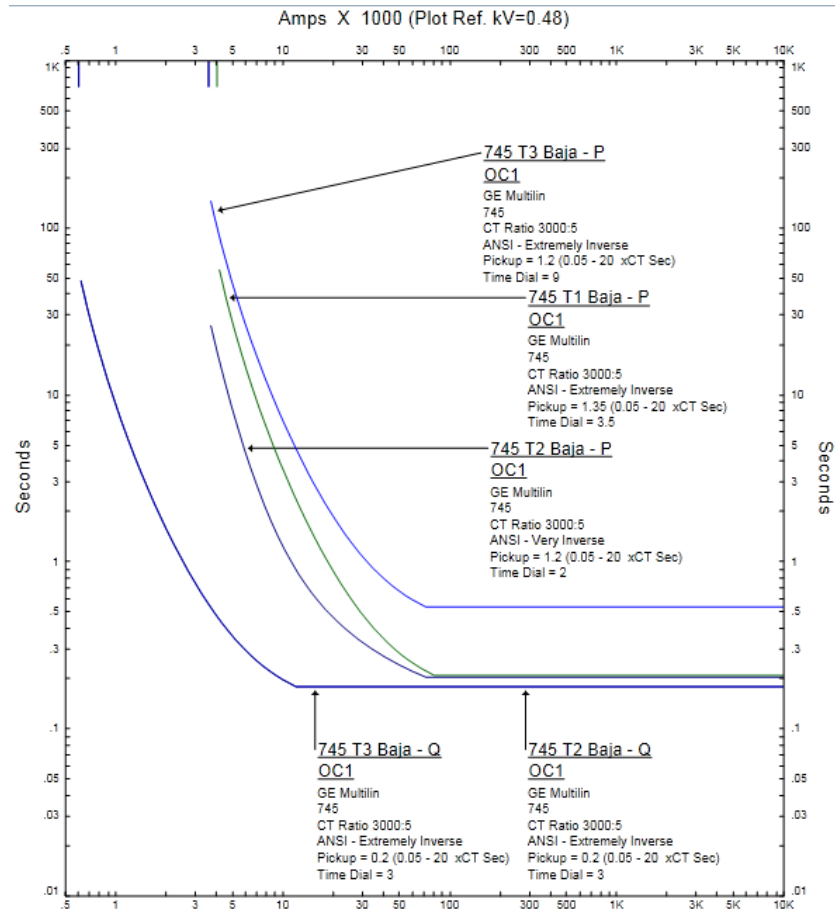
3.2. Simulación y análisis de curva actual de protección eléctrica

Se utiliza la función Star para crear una nueva coordinación de dispositivos y se grafican las curvas utilizando la opción Crear Vista View de los Multilin 745 y 750 de baja tensión y 745 lado de alta tensión. Para agrupar las curvas de similares funciones se grafican las curvas de baja tensión separadas por tipo de equipo y agrupando la curva de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de un mismo dispositivo. Luego se grafica la curva de alta tensión de los equipos de protección.

3.2.1. Curvas de disparo de baja tensión de equipos Multilin 745

Con las curvas de protecciones del lado de baja, se observa diferencias en los parámetros de sobre corriente “P”, las curvas de secuencia negativa “Q” ya se encuentran con el mismo parámetro como lo muestra la Figura 11.

Figura 11. Curva actual de protección Multilin 745 de baja tensión

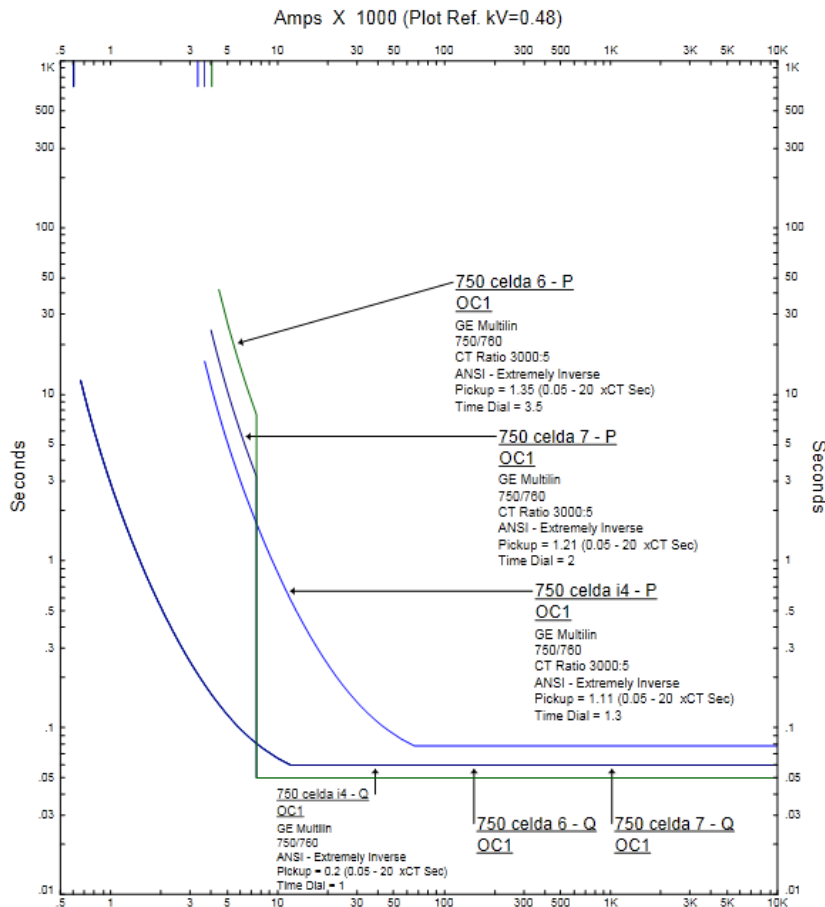


Fuente: elaboración propia (2016).

3.2.2. Curvas de disparo de baja tensión de equipos Multilin 750

Los Multilin 750 tiene una supervisión de protección contra sobre corrientes en el lado de baja tensión de los transformadores arraigada a las celdas correspondientes. Se observa que los parámetros de sobre corriente “P” difieren y los de secuencia negativa “Q” se encuentran iguales como lo muestra la Figura 12.

Figura 12. Curva actual de protección Multilin 750 de baja tensión



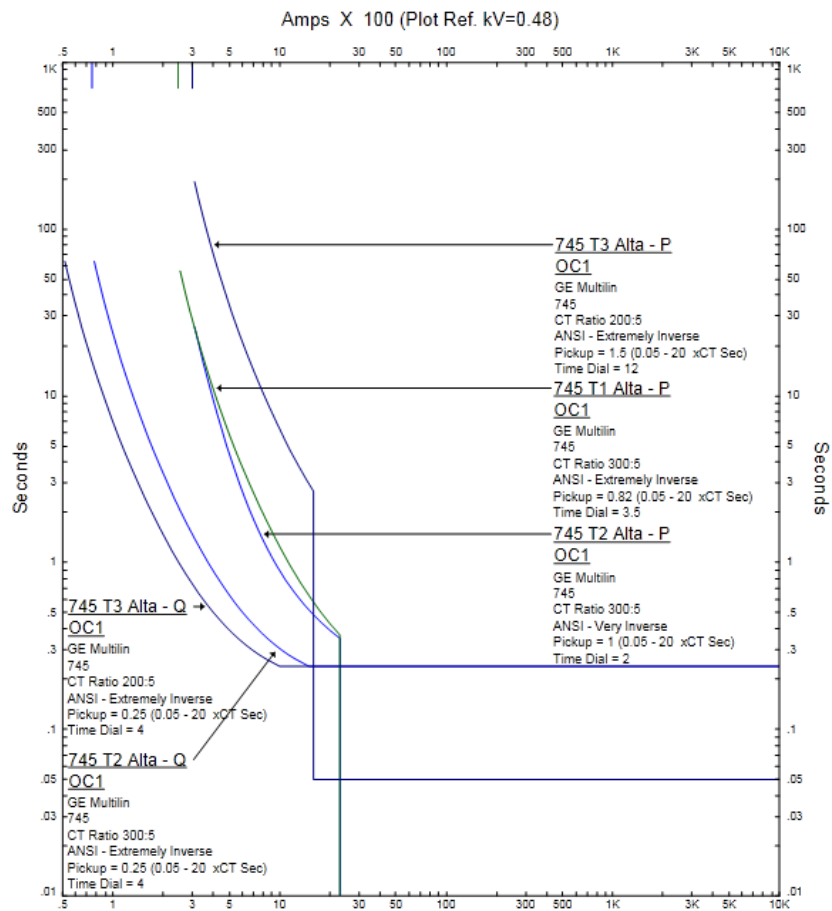
Fuente: elaboración propia (2016).

3.2.3. Curvas de disparo de alta tensión de equipos Multilin 745

El monitoreo del lado de alta de los transformadores se encuentra con diferentes parámetros entre ellos. Actualmente, se tiene un disparo por sobre corriente en un rango entre 250 y 300 amperios. Los tiempos de reacción del disparo tienen una demora de entre 56 a 196 segundos como lo muestra la

Figura 13, cantidades muy amplias para lograr una protección real de los equipos.

Figura 13. **Curva actual de protección Multilin 745 de alta tensión**



Fuente: elaboración propia (2016).

4. MODIFICACIÓN Y SIMULACIÓN DE PARÁMETROS PARA NUEVA CURVA DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA

Se actualizan los parámetros para igualar las condiciones y operaciones actuales de carga en la planta de cemento, utilizando el análisis gráfico de las curvas de disparo y los valores establecidos como máximos para operación de los transformadores de potencia.

4.1. Modificación y análisis de nuevas curvas de disparo de baja tensión de equipos Multilin 745

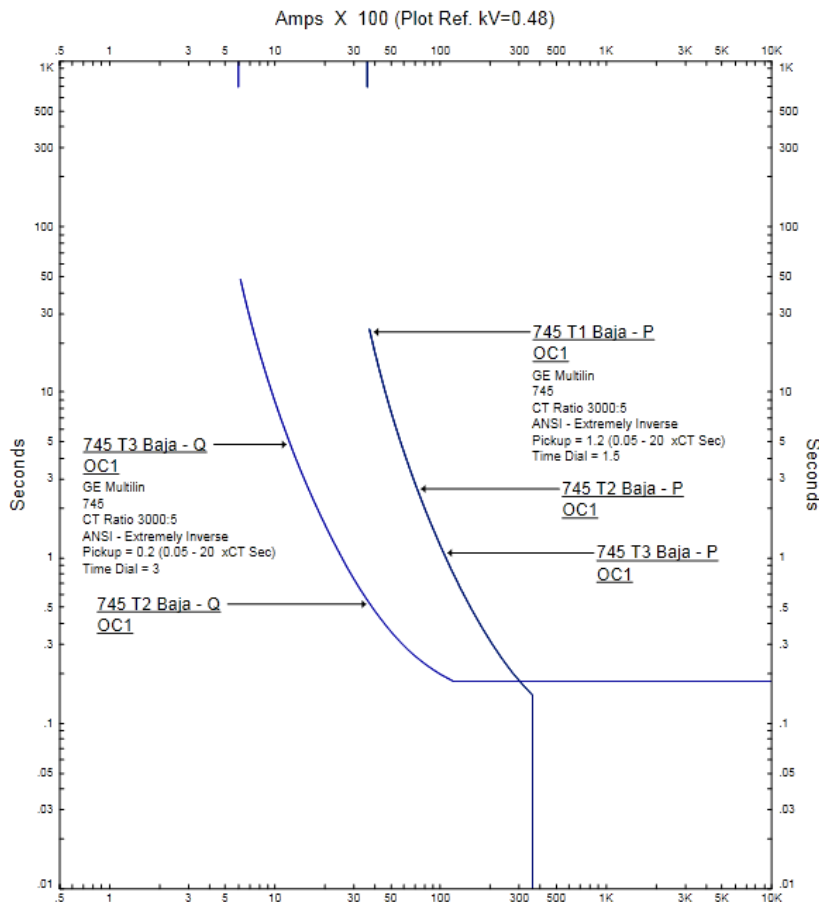
- Nuevos parámetros de disparo sobre corriente:
 - Medida de monitoreo: 1.2 x CT
 - Tipo de curva: extremadamente inversa
 - Tiempo de respuesta: 1.5

Con esta configuración se obtiene un rango de supervisión capaz de soportar la carga máxima permisible, según la capacidad del transformador, pensado para trabajos especiales, se recarga un transformador con la carga de dos transformadores, se obtiene un valor mínimo de disparo permitido en la curva de protección de 3 700 amperios con un retardo de 2 segundos. Adecuada para una situación con un transformador con alta carga y arranque de equipos con una alta demanda de corriente y poca duración.

- Nuevo parámetro de disparo sobre corriente instantánea:
 - Medida de monitoreo: 12 x CT
 - Tiempo de respuesta: 0 ms

Con esta configuración se agrega un disparo instantáneo por sobre corriente de alta magnitud a la curva, la cual protegerá los equipos de planta y los transformadores ante una falla severa del sistema. Con este parámetro se tiene un valor máximo de 10 veces la sobre corriente mínima permitida siendo 36 000 amperios con un retardo de 0 ms, supervisara este nivel de corriente durante 0.147 segundos o 8.8 Hz hasta converger con la curva extremadamente inversa de sobre corriente. La nueva curva de disparo se representa en la Figura 14.

Figura 14. Nueva curva de protección Multilin 745 de baja tensión



Fuente: elaboración propia (2016).

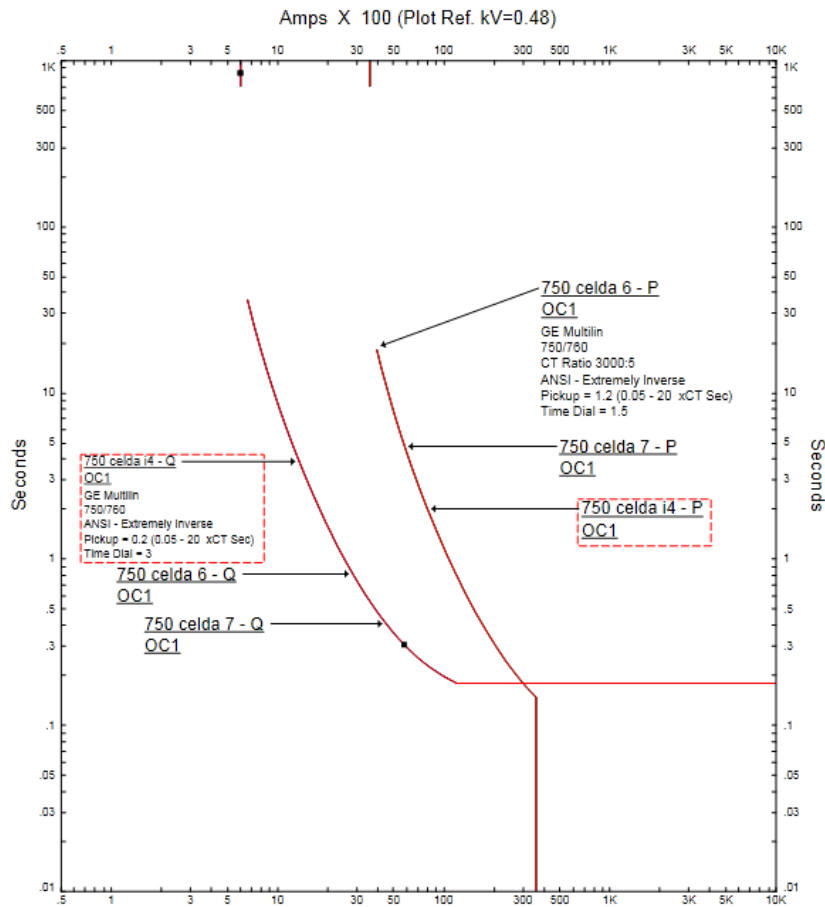
4.2. Modificación y análisis de nuevas curvas de disparo de baja tensión de equipos Multilin 750

Se actualiza los parámetros para adecuarlos a las cargas y operaciones actuales, utilizan los mismos valores de supervisión de los transformadores, se logra una redundancia en protección eléctrica en los equipos de planta. El retardo de disparo de la protección por secuencia negativa se halla en dos segundos, por lo cual se extiende hasta 3 segundos para estar acorde a los arranques de equipos. Los cambios se presentan en la curva de disparo de la Figura 15.

- Nuevo parámetro de disparo sobre corriente:
 - Medida de monitoreo: 1.2 x CT
 - Tipo de curva: extremadamente inversa
 - Tiempo de respuesta: 1.5

- Nuevo parámetro de disparo sobre corriente instantánea:
 - Medida de monitoreo: 12 x CT
 - Tiempo de respuesta: 0 ms

Figura 15. Nueva curva de protección Multilin 750 de baja tensión



Fuente: elaboración propia (2016).

4.3. Modificación y análisis de nuevas curvas de disparo de alta tensión de equipos Multilin 745

Se debe tener valores afines con los ingresados al lado de baja del transformador, coincidiendo los tiempos y valores de sobre corriente.

- Para los transformadores 1 y 2
 - Nuevo parámetro de disparo sobre corriente

- Medida de monitoreo: 1 x CT
 - Tipo de curva: extremadamente inversa
 - Tiempo de respuesta: 1.5
- Nuevo parámetro de disparo sobre corriente instantánea:
 - Medida de monitoreo: 10 x CT
 - Tiempo de respuesta: 0 ms
- Para el transformador 3
 - Nuevo parámetro de disparo sobre corriente
 - Medida de monitoreo: 1.5 x CT
 - Tipo de curva: extremadamente inversa
 - Tiempo de respuesta: 1.5
 - Nuevo parámetro de disparo sobre corriente instantánea:
 - Medida de monitoreo: 15 x CT
 - Tiempo de respuesta: 0 ms

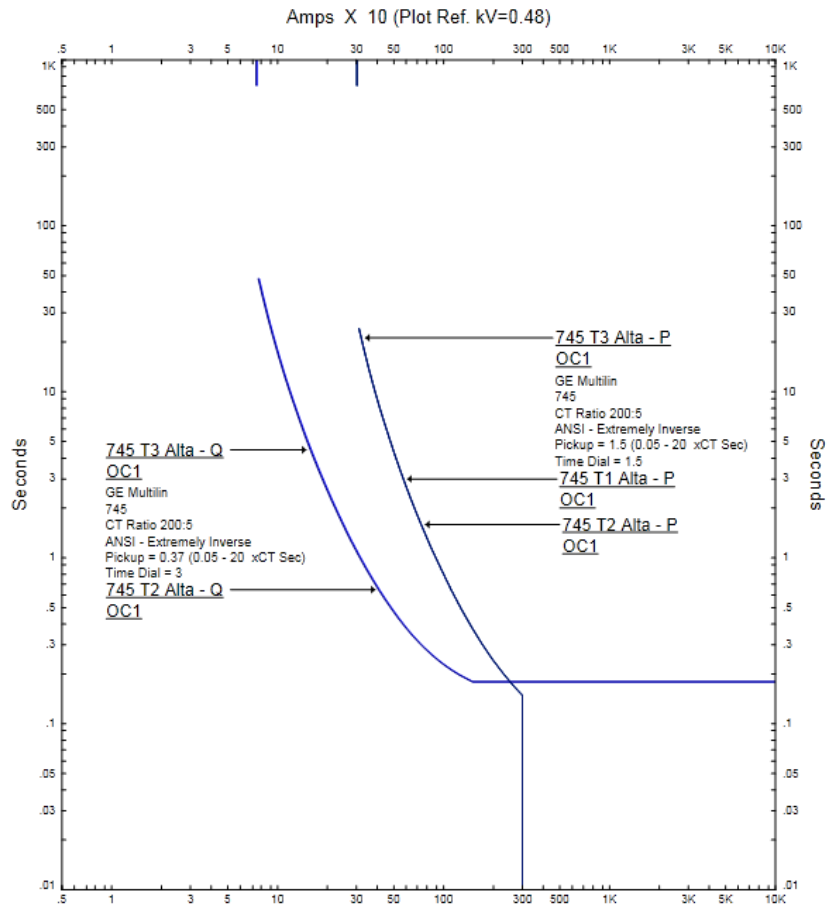
Con esta configuración se logra igualar los tiempos de curvas, tanto del lado de alta como de baja de los transformadores, teniendo un disparo en el valor más bajo de la curva de 300 amperios con un retardo de 2 segundos. Y un disparo instantáneo por sobre corrientes de gran magnitud de 3 000 amperios con 0 segundos de retardo, mantiene esta supervisión por 0.147 segundos o 8.8 Hz integrándose a la curva extremadamente inversa de sobre corriente. Se anota diferente configuración para el transformador 3 por su variación en CT de medición en el lado primario.

También la curva de secuencia negativa se sube su valor mínimo de disparo del transformador 3, aunque tengan misma configuración su relación

está afectada por los CT que posee este transformador los cuales son de 200 : 5 y los otros transformadores poseen de 300 : 5. De igual forma se baja el tiempo de retardo del disparo a 3 segundos para igualarlo al retardo que se tiene en el lado de baja de los transformadores. La nueva curva de disparo se muestra en la Figura 16.

- Nuevo parámetro de disparo sobre corriente secuencia negativa:
 - Medida de monitoreo: $0.37 \times CT$
 - Tipo de curva: extremadamente inversa
 - Tiempo de respuesta: 4

Figura 16. Nueva curva de protección Multilin 745 de alta tensión

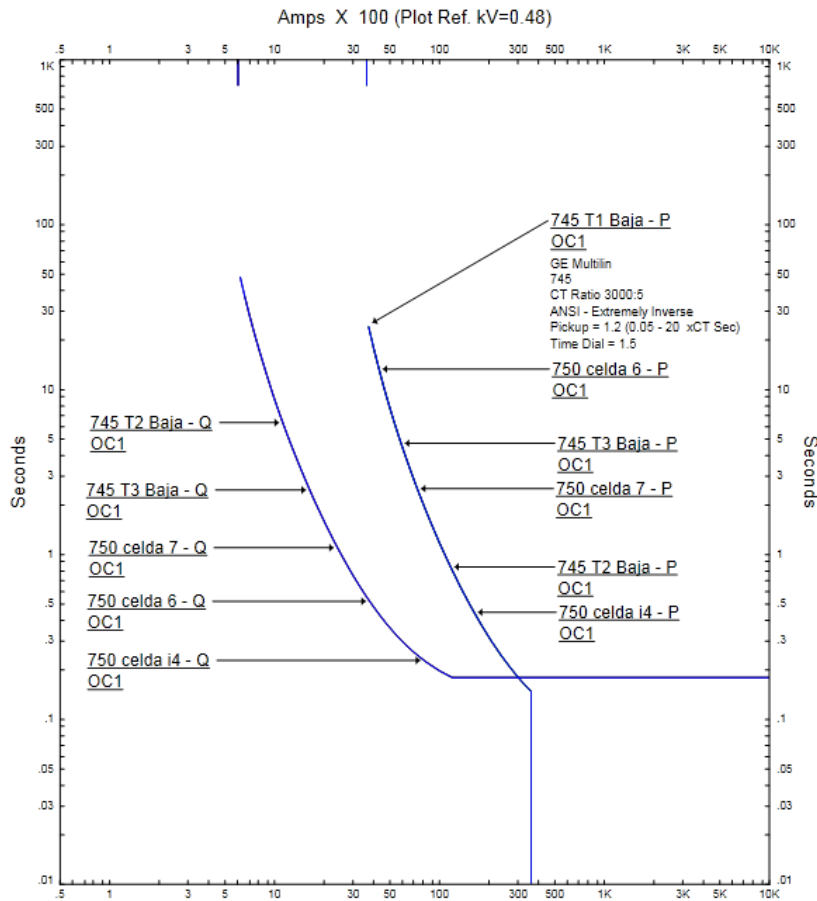


Fuente: elaboración propia (2016).

4.4. Análisis de mejora y funcionamiento de nueva curva de protección eléctrica en el sistema de transformadores

Las nuevas curvas de protección del lado de baja tensión, se incrementó su eficiencia para lograr una coordinación de todos los dispositivos y como integración final se grafican juntas las curvas de protección de los equipos Multilin 745 y 750 para una visualización real de la coherencia en valores de protección por sobre corriente, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Nueva curva de protección de baja tensión

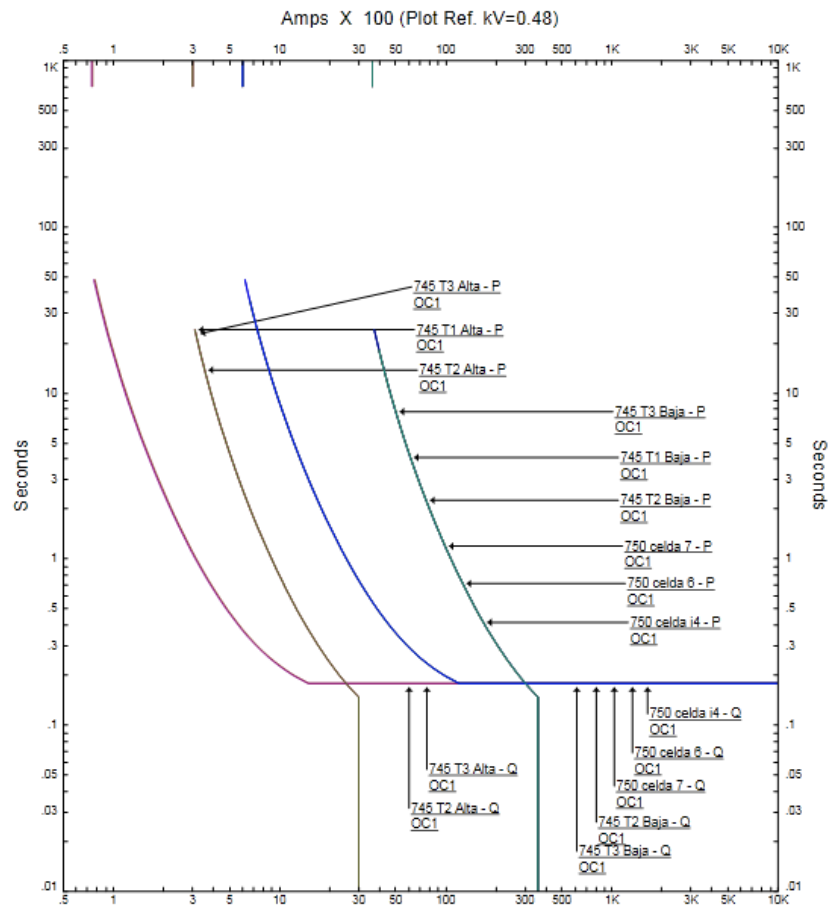


Fuente: elaboración propia (2016).

Se grafica los parámetros de las nuevas curvas de baja y alta tensión, para visualizar la integración final de las protecciones de los transformadores, la cual se evidencia una coordinación adecuada que estandariza los valores de disparo para las cargas eléctricas y cumple con los valores recomendados de los transformadores menores de 3 200 amperios de operación nominal y 3 700 amperios máximos, por un tiempo de 3 segundos.

La Figura 18 muestra como las gráficas de sobre corriente “P” del lado de baja y alta tensión poseen una curva extremadamente inversa de igual tendencia al aumento de corriente y tiempo. Esto da una protección redundante sobre la corriente que pasa a través de los transformadores. De igual forma, se observa la misma tendencia en la sobre corriente de secuencia negativa “Q”.

Figura 18. Nueva curva de protección de baja y alta tensión



Fuente: elaboración propia (2016).

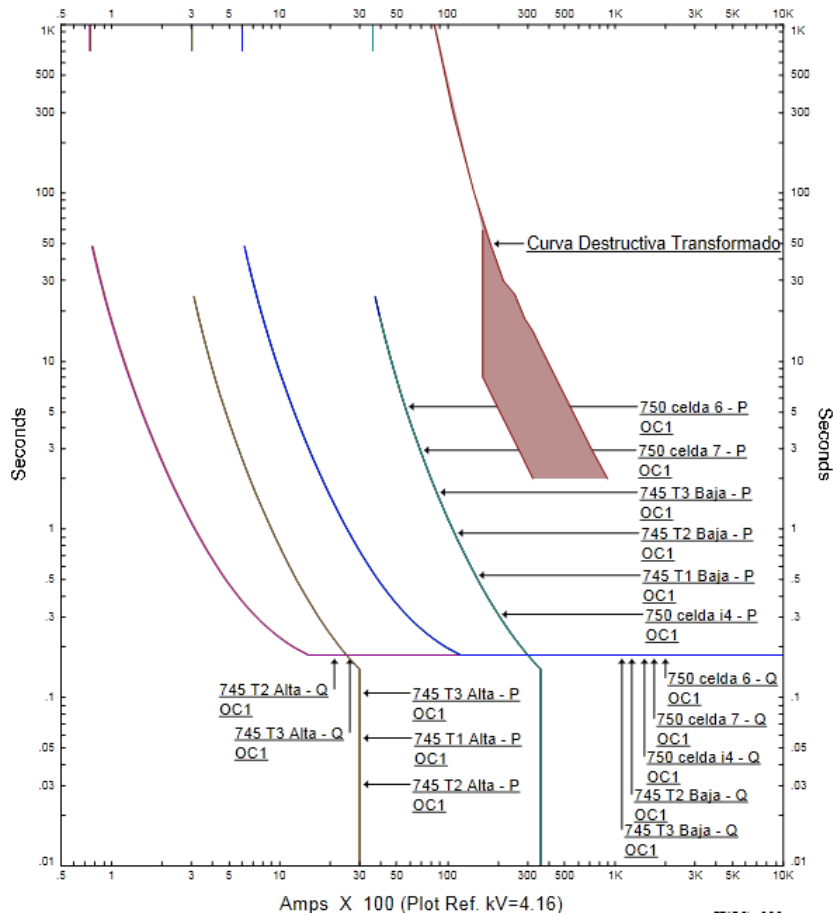
5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros de los dispositivos de protección se modifican de tal forma que, puedan compartir similares valores de disparo, se toma en cuenta sus transformadores de medición de distintas capacidades, parte esencial es estandarizar las curvas en tipo extremadamente inversa. Se adicionó a las configuraciones de sobre corriente “P” disparos instantáneos de corrientes de grandes magnitudes y cortos tiempos que protegerán a los equipos de calentamientos y deterioro de aislamientos.

Se visualiza la tendencia en las curvas de disparo, tanto en el lado de baja como de alta tensión, que asegura la protección de los embobinados primarios como secundarios de los transformadores. Adicional asegura la operación nominal de la carga con valores de disparo que permite el arranque de motores de gran magnitud sin superar los valores de disparo.

Se comparan las curvas de disparo junto a la curva destructiva de los transformadores, se observa que existe un rango óptimo que asegura el funcionamiento sin ningún riesgo de fallas eléctricas o mecánicas. La Figura 19 permite visualizar como las curvas de disparo respetan la curva destructiva de los transformadores para una operación eficiente de las sobrecargas que pueda sufrir en cualquier determinado momento.

Figura 19. Nueva curva de protección de baja y alta tensión junto a curva destructiva de los transformadores



Fuente: elaboración propia (2016).

Se resumen en las Tablas XI y XII, los nuevos parámetros simulados para la coordinación eficiente de los dispositivos de protección, los cuales son comparados para permitir valores de sobre corriente momentáneos durante arranque de equipos en la planta de cemento y proteger la integridad de los transformadores.

Tabla XI. Nuevos parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 y 750 lado de baja tensión

Multilin	Equipo	Protección de sobre corriente	Relación de CT	Curva ANSI	Rango de medición	Tiempo de retardo
745	Transformador 1 (T1)	“P”	3 000 : 5	Extremadamente inversa	1.2	1.5
	Transformador 2 (T2)	“P”	3 000 : 5		1.2	1.5
		“Q”			0.2	3
	Transformador 3 (T3)	“P”	3 000 : 5		1.2	1.5
		“Q”			0.2	3
	750	Celda 6	“P”		3 000 : 5	1.2
“Q”			0.2			3
Celda 7		“P”	3 000 : 5		1.2	1.5
		“Q”			0.2	3
Celda i4		“P”	3 000 : 5		1.2	1.5
		“Q”			0.2	3

Fuente: elaboración propia (2016).

Tabla XII. Nuevos parámetros para protección de sobre corriente “P” y de secuencia negativa “Q” de Multilin 745 lado de alta tensión

Multilin	Equipo	Protección de sobre corriente	Relación de CT	Curva ANSI	Rango de medición	Tiempo de retardo
745	Transformador 1 (T1)	“P”	300 : 5	Extremadamente inversa	1	1.5
	Transformador 2 (T2)	“P”	300 : 5		1	1.5
		“Q”	300 : 5		0.2	3
	Transformador 3 (T3)	“P”	200 : 5		1.5	1.5
		“Q”	200 : 5		0.37	4

Fuente: elaboración propia (2016).

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realiza una coordinación de protecciones eléctricas, se visualizó un conjunto de curvas de disparo, las cuales no estaban estandarizadas entre sí, por lo tanto, no existía una certeza en el accionamiento correcto de todas las protecciones ante una falla real en el sistema eléctrico. Usa como referencia los valores nominales de operación y arranques de equipos, se estandarizó en un punto máximo aceptable para las condiciones de los transformadores que permite asegurar su integridad.

Esta coordinación es aceptable para las condiciones actuales reinantes en la planta de cemento, de existir una modificación en la operación de equipos o maniobrabilidad de los transformadores se debería hacer un nuevo monitoreo de valores eléctricos por un tiempo prudente, para realizar nuevamente una coordinación de las protecciones.

Mediante el software de protecciones eléctricas se consideran escenarios ideales, los cuales deben ser compensados para aplicarlos en escenarios específicos que puedan influir en un sistema eléctrico de alta tensión. Por medio de una coordinación eficiente se asegura una operación confiable en los transformadores, mas no se garantiza su funcionamiento, ya que existen otros factores que pueden afectarlo como condiciones de aceite, humedad, tiempo de vida, entre otros.

Con una reducción de paros de producción por accionamiento incorrecto de las protecciones se suprimen aproximadamente 2 horas de operación sin producción de cemento, debido al reinicio del proceso y calentamiento de equipos. Esto representa en promedio un ahorro energético de 10 000 kWh improductivos, según estudios ambientales se reducirán toneladas métricas de CO₂ al ambiente. Debido a la gran cantidad de energía requerida por estos procesos industriales es de gran relevancia el estudio presentado para disminuir consumos de energía sin fabricación del producto final.

CONCLUSIONES

1. Los principales factores técnicos identificados para la modificación de parámetros de las protecciones eléctricas se encuentran los transformadores de medición de corriente y voltaje, valores máximos de corriente de operación de los transformadores de potencia, medida de monitoreo, tipo de curva y tiempo de respuesta.
2. Comparando técnicamente los equipos de protección se emplean dos tipos, uno dedicado al monitoreo de alta y baja tensión del transformador, y otro, a la carga en baja tensión. Los transformadores de potencia tienen similares capacidades, por tanto se toma un valor promedio de corriente máxima operativa y de máxima momentánea. Las curvas de protección fueron graficadas, a través de software especializado demostrando deficiencias en sus configuraciones de medición y tiempos de respuesta, lo cual manifiesta los problemas existentes de desconexión de carga ante fallas de energía.
3. Se modificaron los parámetros de los equipos, para establecer una curva de disparo extremadamente inversa con tiempos de retardo entre 1.5 y 3 segundos. Toma valores máximos de operación de los transformadores adicional a la corriente de arranque de motores, se estableció el punto máximo de monitoreo entre 0.2 a 1 de la relación de corriente de las protecciones eléctricas, para lograr una operación fiable. Se estableció una coordinación efectiva al graficar una nueva curva de disparo con los valores de medición y tiempos que satisfacen los límites de operación. Con esta nueva coordinación se

logra un ahorro energético total de 20 000 kWh promedio, reduce la demanda de energía necesaria por tonelada de cemento elaborado. Se tiene una distribución uniforme de la energía que evita disturbios en la red eléctrica de la industria que puede provocar fallas de los demás equipos eléctricos.

RECOMENDACIONES

1. El análisis realizado se basa en el uso de software especializado que permite la visualización gráfica de protecciones eléctricas, por lo cual es importante contar con actualizaciones periódicas del software, el cual va incluyendo nuevas librerías de equipos recientes y mejoras en las exactitudes de las curvas de protección y calibraciones de los equipos.
2. Se debe realizar una revisión periódica de las protecciones eléctricas de las instalaciones cada año, para evaluar cambios en el sistema eléctrico. Estos cambios pueden ser aumento de cargas e instalaciones nuevas, aumento de la cantidad de pérdidas en el sistema, fechas de calibración de equipos de protección y medición que puedan dar incerteza en los valores analizados, fallas que den indicio a modificaciones en las curvas de disparo, entre otras.
3. En el presente trabajo, se sugiere ampliarlo en una futura investigación en otra industria donde se vea afectada por problemas en sus protecciones por desbalance de cargas, equipos de grandes dimensiones o falta de actualización de parámetros en sus equipos de protección.
4. El estudio tiene especial relevancia para tener una red eléctrica coordinada con protecciones adecuadas, que prevengan el paro incorrecto de los equipos en la industria y aumente el costo de los productos elaborados, así como contaminación al ambiente derivada del consumo de energía. Para un futuro estudio, se recomienda utilizar este

trabajo para conocer a detalle el ahorro de energía en la industria y cómo se refleja en el costo total de los productos elaborados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre Cárdenas, C. W. (2008). *Estudios eléctricos de sistemas de potencia para la carrera de ingeniería eléctrica utilizando el software Power Factory 13.1 de DlgSilent*. Quito, Perú: Escuela Politécnica Nacional. p. 1, 71, 72, 290, 303
2. Contreras Villamizar, E. F., & Sánchez Rodríguez, R. (2010). *Diseño y construcción de un banco de prácticas en motores eléctricos, como apoyo a la asignatura diseño de máquinas II*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
3. ETAP. (1 de enero de 2015). *ETAP*. Recuperado el 1 de enero de 2015, de ETAP: www.etap.com
4. García A., G. (1993). *Análisis de fallas en sistemas industriales*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. p. 18
5. García González, H. (2000). *Protección contra sobretensiones de una subestación eléctrica en 400KV localizada en la planta de HYLSA*. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. p. 7, 16, 20

6. González Jiménez, G. A. (2011). *Selección y coordinación de protecciones para baja tensión*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. p. 4, 9, 41, 130, 132, 137

7. Guzmán Carranza, C. A. (2000). *Diseño de los Sistemas de Protección e Integración de Planta Eléctrica del Grupo Industrial - PEGI*. Monterrey, México: Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V.

8. Hernández, R. G., Rosas Reyes, F. J., & García, J. S. (2009). *Coordinación de protecciones para un sistema eléctrico industrial*. México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. p. 16, 17, 18, 29, 38, 41, 62, 66, 118, 128

9. Lejarraga, A. B. (2008). *Minimización de los efectos de las perturbaciones eléctricas en los procesos industriales*. Madrid, España: Universidad Pontificia Comillas, Master en el sector eléctrico. p. 37, 45, 79, 83, 85, 90

10. León Carrera, A., & Villón, J. (2002). *Estudio de coordinación de las protecciones eléctricas para la empresa eléctrica península de Santa Elena (EMEPE) año 2001, sub-estaciones: Sta. Rosa, Libertad, Salinas y Chipipe*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. p. 1, 2, 9, 18

11. Mendoza Ventura, J. A. (2009). *Coordinación de protecciones de sobre corriente de la subestación eléctrica de la planta industrial Kimberly Clark*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería. p.22, 24, 44, 45
12. Mendoza, E. Y. (2003). *Control de una planta generadora de energía eléctrica*. Oaxaca, México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
13. Ortega, J. O. (2003). *Diseño de un medidor eléctrico digital de prepago*. México: Instituto Politécnico Nacional. p. 4, 28
14. Quintero Crespo, E. (2010). *Desarrollo de un modelo para la localización de fallas en sistemas de transmisión de energía eléctrica utilizando técnicas de inteligencia artificial*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional De Colombia, Facultad Nacional de Minas. p. 8, 9, 11, 12, 13
15. Sanmiguel Garza, E. (2001). *Coordinación de protecciones en sistemas eléctricos en industria del Álcali S.A. de C.V.* San Nicolás, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
16. Segovia Albarrasin, E. O. (2010). *Coordinación de protecciones en el alimentador de distribución Cerro 8*. Ciudad de la Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico, Centro de Investigación y Pruebas Electro energéticas. p. 12, 13

17. Tuta, O. F., & Hincapie, R. A. (2011). *Coordinación óptima de dispositivos de protección en sistemas de distribución con presencia de generación distribuida*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.