



Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electromecánica

“Estudio de cortocircuito en el rediseño de la instalación eléctrica de
Laboratorios STEIN, Costa Rica”



Energética Soluciones y Consultoría

Informe de Práctica de Especialidad para optar por el título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura

Daniel Andrés Núñez Picado

Cartago, junio, 2016

Estudio de cortocircuito en el rediseño de la instalación eléctrica de Laboratorios STEIN, Costa Rica

Datos del estudiante

Nombre: Daniel Andrés Núñez Picado
Cédula: 1-1532-0362
Carné TEC: 201143875
Residencia: Santiago, San Rafael, Heredia
Teléfono: 8924-3311
E-mail: daniel@energetica.co.cr

Datos del proyecto

Nombre del proyecto: Estudio de cortocircuito en el rediseño de la instalación eléctrica de Laboratorios STEIN, Costa Rica.
Profesor asesor: Ing. Juan Francisco Piedra Segura

Datos de la empresa

Nombre: Energética Soluciones y Consultoría
Zona: Barrio Don Bosco, San José
Dirección: Calle 30, Av. 6-10. Condominio 6-30 Local 1
Teléfono: 2248-1035
Actividad principal: Consultoría de Ingeniería Eléctrica

A mi hermano.

Agradezco a mi madre por enseñarme a leer a los 5 años, a mi padre por usar herramientas desde joven, a mis hermanos por darme la obligación de ser ejemplo.

Tabla de contenidos

1. Introducción	12
1.1 Descripción de la empresa.....	12
1.2 Descripción del problema.....	13
1.3 Objetivos del proyecto.....	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico	15
2.1 Corriente de cortocircuito	17
2.2 Estudio de corrientes de cortocircuito	19
2.3 Corriente simétrica y corriente asimétrica	20
2.4 Tipos de fallas	23
2.5 Contribuciones a la corriente de cortocircuito	24
2.5.1 Contribución de motores de inducción.....	24
2.5.2 Contribución de máquinas sincrónicas	27
2.5.3 Contribución de la empresa de suministro de energía eléctrica	29
2.5.4 Contribución de bancos de capacitores.....	33
2.5.5 Contribución de inversores y rectificadores	40
2.6 Capacidades interruptivas y soporte de cortocircuito	43
2.7 Métodos de cálculo	47
2.7.1 Método de las impedancias	47
2.7.2 Método de KVA's equivalentes	48
2.7.3 ANSI/IEEE 141-1993.....	49
2.7.4 ANSI/IEEE 551-2006.....	50

2.7.5 Procedimiento del método	53
3. Recopilación de información.....	58
4. Resultados.....	64
4.1 Corriente de falla en TP	65
4.1.1 Corriente de falla con aporte de empresa de suministro	65
4.1.2 Corriente de falla con aporte del generador	66
4.2 Corriente de falla en TCOM	68
4.3 Corriente de falla en TEXT.....	69
4.3.1 Sin aporte de manejadoras de aire.....	69
4.3.2 Con aporte de manejadoras de aire	70
4.4 Corriente de falla en el alimentador del banco de capacitores.....	71
5. Simulación y comparación de resultados	73
6. Selección de protecciones y alimentadores.....	83
6.1 Protecciones seleccionadas.....	86
7. Conclusiones y recomendaciones	94
8. Bibliografía.....	97
A1. Impedancias comunes según ANSI/IEEE 141-1993	99
A3. Glosario.....	103
A4. Memoria de cálculos	105
A4.1 Impedancias equivalentes y valores por unidad	105
A4.2 Cálculo de aportes equivalentes	108
A4.3 Cálculo de impedancias equivalentes.....	110
A4.3.1 Impedancia equivalente para TP con aporte de la empresa de suministro.....	110

A4.3.2 Impedancia equivalente en TEXT con aporte de empresa de suministro.....	111
A4.4 Cálculo de corrientes de falla.....	113
A5. Cotización disyuntores	115

Tabla de figuras

Figura 2.1 Desarrollo de corriente de falla.....	21
Figura 2.2. Tipos de fallas por cortocircuito	23
Figura 2.3. Aporte de un motor de inducción en sus tres fases.....	25
Figura 2.4. Corriente de cortocircuito de una máquina síncrona	27
Figura 2.5. Escenario nominal del aporte de la empresa de suministro	31
Figura 2.6. Escenario con derivación en el primario en aporte de la empresa de suministro.....	31
Figura 2.7. Escenario con derivación en el secundario en aporte de la empresa de suministro.....	32
Figura 2.8. Comportamiento de banco de capacitor de 10MVar	34
Figura 2.9. Corriente de falla con cable de 15m (Cap 10MVar).....	35
Figura 2.10. Corriente de falla con cable de 300m (Cap 10MVar)	35
Figura 2.11. Aporte de etapa de 5MVar con un filtro de 5ta armónica	37
Figura 2.12. Aporte de etapa de 10MVar con un filtro de 5ta armónica	37
Figura 2.13. Aporte de etapa de 20MVar con un filtro de 5ta armónica	38
Figura 2.14. Corriente de cortocircuito de motor 700HP y empresa de suministro 500MVA	39
Figura 2.15. Aporte de configuración anterior con etapa de 0.2MVar	39
Figura 2.16. Diagrama equivalente de un sistema AC-DC	41
Figura 2.17. Diagrama equivalente de un sistema AC-DC con una falla en AC	41
Figura 2.18. Comportamiento de falla del lado DC con <i>grid-control</i>	42
Figura 2.19. Comportamiento de falla del lado DC sin <i>grid-control</i>	43
Figura 2.20. Destrucción de unidades de protección.....	44
Figura 2.21. Corriente de falla permitido para conductores con aislamiento a 90°C	46
Figura 2.22. Representación de la linealidad eléctrica	51
Figura 2.23. Circuito reducido mediante el teorema de Thevenin.....	52
Figura 2.24. Factores según el tipo de generación.....	57
Figura 5.25. Comportamiento de ecuación 11	80

Figura 6.26. Capacidades interruptivas para disyuntores de caja moldeada de SQUARE D	86
Figura A1.27. Valores típicos de X/R para transformadores.....	100
Figura A1. 28. Valores X/R típicos para motores síncronos y pequeños generadores.....	101
Figura A1.29. Valores X/R típicos de motores asíncrónicos	102

Tabla de cuadros

Tabla 2.1. Reactancias o factores recomendados para motores de inducción..	26
Tabla 2.2. Factores multiplicativos para reactancias de máquinas síncronas ...	28
Tabla 2.3. Reactancias típicas para máquinas síncronas.....	28
Tabla 2.4. Factores de asimetría del método de las impedancias	48
Tabla 3.5. Valores de impedancia para aportes de falla.....	61
Tabla 3.6. Valores de impedancia de fuentes externas	61
Tabla 3.7. Valores de impedancia de los transformadores.....	62
Tabla 3.8. Valores de impedancia de los alimentadores	62
Tabla 4.9. Reactancia y resistencia equivalente en TP con empresa de suministro	65
Tabla 4.10. Factores y corrientes de falla en TP con empresa de suministro ...	66
Tabla 4.11. Aportes de las distintas cargas a TP con empresa de suministro...	66
Tabla 4.12. Reactancia y resistencia equivalente en TP con GEN.....	67
Tabla 4.13. Factores y corrientes de falla en TP con GEN.....	67
Tabla 4.14. Aportes de las distintas cargas a TP con GEN	67
Tabla 4.15. Reactancia y resistencia equivalente en TCOM	68
Tabla 4.16. Factores y corrientes de falla en TCOM	68
Tabla 4.17. Aportes de las distintas cargas a TCOM.....	69
Tabla 4.18. Reactancia y resistencia equivalente en TEXT.....	69
Tabla 4.19. Factores y corrientes de falla en TEXT.....	70
Tabla 4.20. Reactancia y resistencia equivalente en TEXT con manejadoras ..	70
Tabla 4.21. Factores y corrientes de falla en TEXT con manejadoras	71
Tabla 4.22. Aportes de las distintas cargas a TEXT con manejadoras.....	71
Tabla 4.23. Reactancia y resistencia equivalente en BAC	72
Tabla 4.24. Variables para aporte del banco de capacitores.....	72
Tabla 4.25. Factores y corrientes de falla en FDR-BAC	72
Tabla 5.26. Comparación de corrientes asimétricas a ½ ciclo.....	77
Tabla 5.27. Cálculo de desviación estándar de corrientes asimétricas a ½ ciclo	77

Tabla 5.28. Comparación de factores X/R.....	78
Tabla 5.29. Cálculo de desviación estándar para factores X/R	78
Tabla 5.30. Comparación de factores de asimetría	80
Tabla 5.31. Cálculo de desviación estándar para factores de asimetría.....	81
Tabla 6.32. Resumen de capacidades interruptivas para cada bus	83
Tabla 6.33. Resumen de capacidades de soporte para cada alimentador	84
Tabla 6.34. Protecciones seleccionadas para la transferencia automática	87
Tabla 6.35. Protecciones seleccionadas para el tablero TP	87
Tabla 6.36. Protecciones seleccionadas para el tablero TAAA2	88
Tabla 6.37. Protecciones seleccionadas para el tablero TCOM	89
Tabla 6.38. Protecciones seleccionadas para tablero TIL	90
Tabla 6.39. Protecciones seleccionadas para tablero TBE4	90
Tabla 6.40. Protecciones seleccionadas para BY-PASS de UPS	91
Tabla 6.41. Protecciones seleccionadas para tablero TUPS.....	91
Tabla 6.42. Protecciones seleccionadas para tablero TCE	91
Tabla 6.43. Protecciones seleccionadas para tablero TCE1	92
Tabla 6.44. Protecciones seleccionadas para tablero TIL2	92
Tabla 6.45. Protecciones seleccionadas para tablero TAP4	92
Tabla 6.46. Protecciones seleccionadas para tablero TPROD.....	93
Tabla 6.47. Protecciones seleccionadas para tablero TEXT	93
Tabla A4.48. Valores base para el cálculo impedancias en por unidad.....	105
Tabla A4.49. Valores de reactancias de los equipos conectados a TCOM	108
Tabla A4.50. Reactancia equivalente del tablero TCOM en p.u.	109
Tabla A4.51. Cálculo de reactancia equivalente en TP en p.u.	111
Tabla A4.52. Cálculo de resistencia equivalente en TP.....	111
Tabla A4.53. Cálculo de reactancia equivalente en p.u. para TEXT con VFD.	112
Tabla A4.54. Cálculo de resistencia equivalente en p.u. para TEXT con VFD	112
Tabla A4.55. Cálculo de reactancia equivalente en p.u. para TEXT sin VFD..	113
Tabla A4.56. Cálculo de resistencia equivalente en p.u. para TEXT sin VFD .	113

Resumen

Realizar un estudio de corrientes de cortocircuito requiere de una serie de criterios para la simulación de los distintos componentes existentes en un sistema eléctrico industrial. El proyecto de graduación busca comparar los resultados siguiendo los criterios de las normas ANSI/IEEE 141-1993 y ANSI/IEEE 551-2006, con los resultados obtenidos con métodos de simulación mediante el *software* Power Tools de SKM, utilizado por Energética Soluciones y Consultoría para verificar la confiabilidad de los resultados. Se alcanzaron valores con errores por debajo del 7% en corrientes asimétricas, se analizaron las recomendaciones de las normas para la simulación de diferentes componentes eléctricos y una aplicación matemática de los criterios de las normas ANSI/IEEE.

Palabras clave: Cortocircuito, Selección de Protecciones, Corrientes de Falla, ANSI/IEEE 551-2006, ANSI/IEEE 141-1993, Capacidad Interruptiva, Capacidad de Soporte.

Abstract

Making a short circuit study requires several criteria for simulating common components in industrial power systems. This study seeks to compare results obtained following criteria of ANSI/IEEE 141-1993 and ANSI/IEEE 551-2006 with those obtained by the simulation methods used by Energética Soluciones y Consultoría to verify the reliability of results. Values were achieved with errors below 7% in asymmetric currents at 1 cycle, standards recommendations were analyzed for simulation of different electrical components and a mathematical application of criteria of ANSI/IEEE standards.

Keywords: Short Circuit, Selecting Protective Devices, Fault Current, ANSI/IEEE 141-1993, ANSI/IEEE 551-2006, Interrupting Rating, Short Circuit Current Withstand.

CAPÍTULO 1

1. Introducción

1.1 Descripción de la empresa

Energética Soluciones y Consultoría es una empresa, con más de 5 años en el mercado; la cual se dedica a la gestión de energía eléctrica, la implementación de proyectos en eficiencia energética y el diseño eléctrico y mecánico.

Los servicios que brinda son orientados al uso racional de la energía mediante análisis de perfiles energéticos, identificando posibles oportunidades de conservación de la energía. Entre ellos están: auditoría energética, auditoría eléctrica, soluciones de medición, diseños electromecánicos, consultorías y soluciones en calidad de energía.

La misión de la empresa es: Ser una empresa reconocida regionalmente por proveer soluciones de uso y administración de energía eléctrica con un alto valor agregado para el cliente desde el punto de vista técnico, de tal forma que le permita hacer un uso eficiente de este recurso y minimizar su impacto en el ambiente por consumo de energía.

La visión de la empresa es: Proveer soluciones en el campo de la energía eléctrica, enfocadas en la calidad del suministro, la eficiencia y la administración en el uso de la energía, estos servicios serán provistos por personal altamente capacitado de acuerdo a la últimas normas locales e internaciones y las últimas tendencias mundiales.

1.2 Descripción del problema

En cualquier comercio, industria o institución, uno de los sistemas bases y de los más importantes es el sistema eléctrico, por lo cual es fundamental que sea confiable y se garantice su disponibilidad en todo momento.

Para brindar esta confiabilidad existen muchas herramientas y análisis del sistema eléctrico, uno de ellos es el estudio de cortocircuito. El estudio de cortocircuito tiene como principal objetivo analizar el comportamiento del sistema en un evento de este tipo, con el fin de garantizar que todos sus componentes sean capaces de soportar grandes niveles de energía a los que se somete el sistema en estos eventos.

Este tipo de estudio es importante pues una inadecuada selección de un alimentador o una protección, puede provocar daños irreversibles, inclusive su destrucción, donde la avería en estos puede derivar en la explosión de la protección y ocasionar un incendio.

El Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, para el año 2014, reportó que el 37% de los incendios producidos a nivel nacional se deben a fallos en el sistema eléctrico. Considerando las incontables pérdidas materiales, ambientales y posibles vidas en un incendio es donde radica la importancia de realizar este tipo de análisis.

Laboratorios STEIN, en este momento está en un proceso de ampliación de su planta, incluyéndose instalación eléctrica. Como parte de un diseño apropiado de ingeniería eléctrica se debe estudiar el comportamiento de la instalación en caso de falla por cortocircuito para la aprobación de servicios de la nueva instalación. Por tanto, se requiere del estudio para iniciar los trámites de la remodelación.

Por otra parte, un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio que incluya una apropiada selección de los componentes eléctricos. En ese sentido, si no se realiza un estudio de cortocircuito, no se puede garantizar que, tanto las protecciones como los conductores, sean capaces de soportar la energía liberada en una falla de cortocircuito, lo cual disminuye la confiabilidad del sistema eléctrico.

En el análisis por realizar, la solución propuesta es, mediante estándares internacionales (ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993), un estudio de corrientes de cortocircuito y comparar el resultado del *software* Power Tools de SKM con el módulo de DAPPER con este método manual. Todo lo anterior busca garantizar un resultado objetivo y con criterio de ingeniería con esto se permite cumplir el objetivo general del proyecto.

En términos generales, con este proyecto se espera garantizar que las protecciones y los conductores sean capaces de soportar las corrientes de falla por un evento de cortocircuito en el nuevo sistema eléctrico; además, se presentará una comparación de los resultados del *software* Power Tools de SKM, con el método de las normas internacionales ANSI/IEEE y los criterios de simulación.

1.3 Objetivos del proyecto

1.3.1 Objetivo general

- Analizar las corrientes de falla por cortocircuito en el rediseño de la instalación eléctrica de Laboratorios STEIN para una correcta selección de protecciones y conductores eléctricos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Valorar los parámetros de las cargas y máquinas eléctricas que influyen en el caso de una falla por cortocircuito en la instalación eléctrica de Laboratorios STEIN, Costa Rica.
- Obtener una base teórica del cálculo de corrientes de cortocircuito con las normas internacionales ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993 para complementar futuros estudios realizados por Energética.
- Comparar los resultados obtenidos entre el método recomendado por la ANSI/IEEE 551 y el *software* DAPPER Power Tools de SKM.
- Evaluar las consideraciones que toma la ANSI/IEEE para el cálculo las corrientes de cortocircuito con distintos aportes y equipos eléctricos en Laboratorios Stein.

CAPÍTULO 2

2. Marco teórico

Este capítulo contiene los criterios y conceptos bases para comprender los cálculos y discusiones del estudio de corrientes de cortocircuito para el sistema eléctrico de Laboratorios Stein. Los criterios tienen como base principal las normas ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993. Los criterios de simulación que serán utilizados para los cálculos realizados de forma manual, que son presentados en el Capítulo 4.

Para poder diseñar y construir una instalación eléctrica útil, segura y a la vez optimizar los recursos disponibles, se debe contemplar una gran cantidad de variables y aspectos que no siempre se puede tener a disposición. Con el acatamiento obligatorio desde el 2012 del Código Eléctrico para la Seguridad de Vida y la Propiedad en Costa Rica NFPA70, se ha permitido tener una serie de criterios de diseño que permiten tener una instalación eléctrica segura.

A pesar de, para el año 2014, el Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, reporta que un 37% de los incendios producidos en el país se deben a fallas en los sistemas eléctricos. (Bomberos, 2014)

Uno de los objetivos de los estudios de cortocircuito es poder garantizar que el sistema eléctrico sea capaz de soportar un evento de este tipo, evitando daños severos que conlleven a incendios.

Respecto al estudio de corrientes de cortocircuito y selección correcta de las protecciones, las cuales juegan uno de los principales papeles en cuanto seguridad eléctrica se trata, el Código Eléctrico Nacional (CEN, versión 2014) se refiere a estos temas, algunos de estos artículos son:

110.9 Corriente nominal de interrupción. Los equipos destinados a interrumpir las corrientes de falla deben tener un rango nominal de interrupción suficiente para la tensión nominal del circuito y para la corriente existente en los terminales de línea del equipo.

Los equipos destinados para interrumpir la corriente a otros niveles distintos del de falla, deben tener rango de interrupción a la tensión nominal del circuito, suficiente para la corriente que se debe interrumpir.

110.24 Corriente de Falla Disponible. Equipos de servicio en otras unidades aparte de viviendas, deben de tener a vista la máxima corriente de falla disponible en el punto. La marca debe de incluir la fecha de cuando el cálculo fue realizado.

El Código Eléctrico permite tener parámetros de selección bastante completos sobre la capacidad de los interruptores y demás equipos de protección con los criterios del Capítulo 2 y 3. Sin embargo, al referirse a corriente de falla por cortocircuito, no brinda suficiente información.

Para adquirir un disyuntor se deben aclarar varias características como lo son, capacidad nominal, tipo de montaje en el panel, voltaje nominal y capacidad interruptiva. Esta última característica puede aumentar de forma exponencial el precio sin cambiar las demás. Con este concepto es donde se justifica a nivel económico un estudio de corrientes de cortocircuito ya que este estudio permite conocer de forma específica que capacidad interruptiva se requiere en cada disyuntor

Ahora, en un tema aún más importante que el económico, viene la seguridad. Para realizar una analogía, se puede plantear una represa de agua. Se tiene un gran dique que permite el ingreso de agua conforme se requiere, en caso de una falla en una de las compuertas el agua va a entrar con demasiada fuerza liberando mucha energía. En este caso es crucial que la represa pueda soportar esta liberación de energía hasta el punto en donde se logre contener y aislar la falla, lo mismo sucede en los sistemas eléctricos. (Barrantes, 2014)

Un estado de falla producirá corrientes eléctricas muy altas, provenientes de distintas fuentes, esto permite una deliberación de energía por lo tanto es importante conocer que cada uno de los equipos está debidamente protegido y que la instalación como tal será capaz de soportar la falla, mientras las protecciones sean activadas automáticamente. A pesar de que las corrientes de falla se presentan por poco tiempo (fracciones de segundo), es importante que los conductores y los disyuntores (que juegan el papel de la compuerta de emergencia) sean capaces de soportar la energía liberada y puedan funcionar debidamente.

Una mal selección de un disyuntor y/o conductor puede ocasionar que, en caso de una falla, este explote por su incapacidad de soportar la energía, volviendo más grave el escenario y produciendo una falla de arco eléctrico en el tablero, lo cual hace imposible aislar la falla y puede ocasionar un incendio. Aquí es donde a nivel de seguridad se justifica un estudio de cortocircuito. (Eaton, 2014)

El tercer punto para justificar un estudio es la optimización del diseño. El diseñador como encargado de la futura instalación debe de tener claro que la selección de sus equipos es la correcta, por lo cual se requiere tomar en cuenta los puntos anteriores, en donde no se invierta más de lo necesario en las protecciones, y además sean lo suficientemente capaces de soportar cualquier falla. Según lo indicado anteriormente se justifica como parte del diseño realizar el estudio de corriente de cortocircuito.

2.1 Corriente de cortocircuito

La norma ANSI/IEE 551-2006 define un cortocircuito como una conexión anormal (inclusive un arco) con una baja impedancia realizada accidental o intencionalmente, entre dos puntos con diferencia de potencial. (IEEE, 2006)

Todos los sistemas eléctricos energizados están expuestos a una posible falla por cortocircuito. Cada sistema eléctrico se debe de diseñar para permanecer libre de fallas, sin embargo, cada equipo está expuesto a una falla en cualquier momento, por

lo cual es importante tener certeza de que todos los equipos del sistema son capaces de soportar este estado. Algunas de las causas de este tipo de fallas son:

- Presencia de animales en los equipos
- Pérdida de conexiones por sobre calentamiento
- Transientes de voltaje
- Deterioro del aislamiento de los alimentadores
- Acumulación de polvo y contaminantes
- Contacto accidental con herramientas metálicas o de materiales conductores

Teniendo en cuenta la ecuación descrita en 1827 por Georg Simon Ohm, al tener un nivel de tensión determinado y un decrecimiento repentino de la impedancia va a producir un acrecentamiento, en muchos casos, incontrolable de corriente.

Este aumento de corriente produce un incremento deliberado de energía a la que todos los elementos eléctricos son sometidos a diferentes niveles. La capacidad de soportar esta energía (Ecuación 1) es lo que puede diferir en seleccionar un disyuntor u otro.

$$e = i^2 t \quad (1)$$

La corriente de cortocircuito disponible, se conoce como la máxima corriente de falla posible en un punto específico del sistema eléctrico a estudiar. Esta corriente es directamente proporcional a la cantidad y tamaño de las fuentes de corriente de falla. Estas fuentes de corriente de falla suelen ser generadores, motores y la empresa de suministro (contribución de la empresa de suministro) donde esta última, típicamente suele ser el mayor aporte. (IEEE, 2006)

El aporte de los motores en el sistema se debe a que en el momento cuando ocurre un cortocircuito estos equipos actúan como generadores, produciendo energía que buscará el punto de falla de menor impedancia. Este aporte depende de la carga y de la constante de inercia del motor, sin embargo, este aporte decae rápidamente estando presente solo en los primeros ciclos después de ocurrida la falla.

2.2 Estudio de corrientes de cortocircuito

Un estudio de corrientes de cortocircuito es en principio, la capacidad de conocer el comportamiento de un sistema eléctrico en un estado de falla. Esto se calcula al realizar un flujo de potencia en los pocos segundos que dura una falla por cortocircuito y con esto obtener la corriente que pasa por el punto de interés. (IEEE, 2006)

El estudio de corrientes de cortocircuito permite conocer estas corrientes en distintos puntos de la instalación, donde los puntos de mayor interés son los paneles eléctricos (conocidos en los estudios eléctricos como buses o barras). Con estas corrientes de falla se puede realizar la selección de las capacidades de interrupción de las protecciones y conductores a instalar en el sistema.

Como estas fallas no pueden ser previstas, los ingenieros solo pueden tratar de mitigar los posibles efectos dañinos de estos eventos. Esto inicia desde el diseño, especificación, inspección y mantenimiento del sistema. Algunas de las razones que citan las normas ANSI/IEEE para realizar un estudio de cortocircuito son:

- Verificar los equipos de protección ya sea existentes o por especificar.
- Determinar los ajustes de las protecciones del sistema, para cumplir con un estudio de coordinación de protecciones y verificar que la protección pueda proteger el sistema de la falla.
- Determinar los efectos del estado de falla en los componentes del sistema como cables, paneles, máquinas eléctricas, cargas especiales, etc.
- Valorar los efectos de los diferentes cortos circuitos (trifásico, monofásico a tierra, bifásico y bifásico a tierra) variando su severidad en el sistema.

El procedimiento para el planeamiento y diseño de Instalaciones Eléctricas en edificios Comerciales, Industriales e Institucionales del Colegio de Ingenieros Electricistas, Mecánicos e Industriales define el objetivo del estudio de corrientes de cortocircuito como determinar las magnitudes de las corrientes de cortocircuito y el factor de X/R en cada barra del sistema de potencia, en varios intervalos de tiempo, luego de que se simule la falla. (CFIA, 2015)

Este mismo procedimiento solicita que este estudio de cortocircuito sea generado mediante los criterios de las normas ANSI/IEEE 399, 141 y 242.

Este proyecto se basará principalmente en los criterios de las normas, ANSI/IEEE 141-1993 "*IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*" y ANSI/IEEE 551-2006 "*IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*" debido a que de la colección "*Color Books*" es el único libro de color de la IEEE completamente dedicado al análisis de las corrientes de cortocircuito permitiendo entender de forma más amplia de las técnicas de cálculo y análisis de resultados. Trae apartados que no poseen las normas citadas por el procedimiento del CIEMI y es mucho más actual que las otras dos normas.

Para poder realizar un estudio de corrientes de cortocircuito es necesario tener cierta información del sistema eléctrico y recurrir a métodos manuales o simulaciones mediante *software* como a nivel nacional se realizan por confiabilidad. La información principal que se requiere para realizar el estudio es:

- Diagrama unifilar de la instalación eléctrica completo y actual
- Cargas conectadas en el sistema
- Valores de impedancia subtransitoria de las máquinas eléctricas
- Aporte a la compañía que suministra el servicio eléctrico
- Perfiles de diferencia de potencial utilizadas en la instalación

Cada uno de estos puntos será definido y explicado posteriormente en este capítulo.

2.3 Corriente simétrica y corriente asimétrica

El adjetivo simétrica o asimétrica, describe la forma de onda de la corriente con base en el eje 0 en la ordenada. Lo anterior viene de la mano con el tipo de cargas existentes y conectadas en el sistema en el momento del cortocircuito. Por ejemplo, en un sistema con cargas meramente resistivas, la corriente respecto al tiempo tendrá

una oscilación “simétrica” con base al eje x. Mientras que un sistema con cargas meramente inductivas tendrá una compensación positiva debido a la oscilación del flujo magnético de las distintas máquinas eléctricas (entiéndase como transformadores, motores de inducción y motores síncronos).

Como toda industria posee cargas resistivas e inductivas en el mismo sistema y como fue mencionado parte del aporte se ve disminuido ya que los aportes de motores son breves. Existe también un decrecimiento en corriente directa este debido al cambio según la energía de la resistencia de los equipos (I^2R). La componente en dc suele ser máximo en el primer ciclo y según criterios de la ANSI/IEEE 551-2006 para 30 ciclos ya es cero.

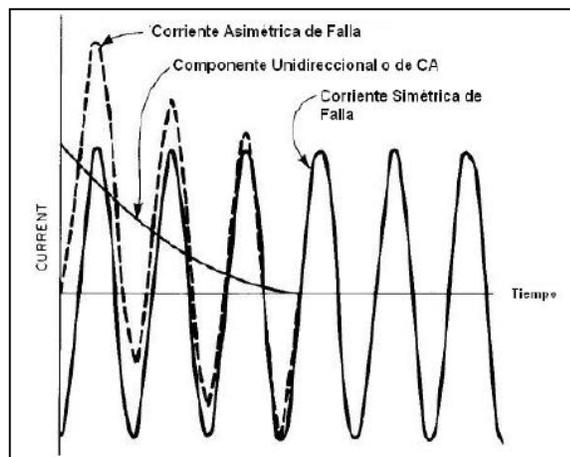


Figura 2.1 Desarrollo de corriente de falla
Fuente: Barrantes, 2014.

En el análisis de corrientes de cortocircuito se utiliza como medida de tiempo, los ciclos, el cual se puede entender como el tiempo que tarde la corriente en completar un período en la onda sinusoidal. Los ciclos dependen directamente de la frecuencia utilizada, en el caso expuesto, con una frecuencia de 60 Hz, un ciclo equivale a 0.0167 segundos. La ventaja de utilizar ciclos y no segundos en el estudio de cortocircuito es que se evita el cambio de la escala de tiempo si la frecuencia es de 50 Hz o 60 Hz. (IEEE, 2006)

Con lo mencionado anteriormente, se tiene que la corriente de cortocircuito depende de tres componentes, la componente en dc que varía según la resistencia del sistema, la componente estable en ac aplicado principalmente por generadores y aporte de la empresa de suministro y el componente en ac en decrecimiento el cual se compone de los aportes por motores.

$$i_{total} = i_{dc\ decreciente} + i_{ac\ estable} + i_{ac\ decreciente} \quad (2)$$

La magnitud y duración de la corriente de falla asimétrica depende del factor X/R y del ángulo de desfase del voltaje en el momento que la falla ocurre. A mayor X/R más grande será la duración de la corriente asimétrica.

La importancia de la asimetría en la corriente de cortocircuito es que esta en el primer ciclo puede llegar a ser 1.5 la corriente simétrica, esto implica directamente en las fuerzas electromagnéticas a las que se someten los equipos que pueden llegar a ser 2.25 veces más grandes que las fuerzas causadas por la corriente simétrica y la energía convertida en calor.

Aparte de la corriente asimétrica se requiere conocer el X/R del punto esto para ser comparado con los factores utilizados en las pruebas de las protecciones. Este X/R del punto debe ser siempre menor al X/R de la prueba de la protección (típicamente es 15) para que la capacidad de interrupción del equipo no se vea afectado.

El factor X/R es la relación que existe en el punto de cálculo, de la reactancia equivalente sobre la impedancia equivalente. Este factor es proporcional a la asimetría del sistema eléctrico, ya que a mayor inductancia en el sistema, se tendrá factores X/R más grandes, por lo tanto, mayor asimetría.

La corriente de mayor importancia es la corriente de cortocircuito asimétrica, sin embargo, esta varía según el ciclo que se calcule, para los disyuntores y cables en redes de baja tensión e recomienda utilizar la corriente en el primer ciclo.

2.4 Tipos de fallas

En un sistema trifásico, existen cuatro categorías de fallas, estas según su “conexión”, entre ellas están falla trifásica, línea a línea, línea a línea a tierra y línea a tierra. Comúnmente para la comparación con las capacidades de las protecciones y equipos se utiliza la falla trifásica sin impedancia.

La falla trifásica es la menos probable que suceda, sin embargo, esta suele tener los valores más altos de corriente de falla. La falla línea a línea es más común que la anterior, pero suele ser el 0.87 veces la corriente trifásica.

La falla línea a línea a tierra suele ser una falla línea a tierra que escala a un segundo conductor. Estas fallas son normalmente el doble que las fallas línea-tierra, sin embargo, son menores que la falla trifásica. La falla línea a tierra es la más común en suceder, aunque esta falla es la menos perturbadora para el sistema.

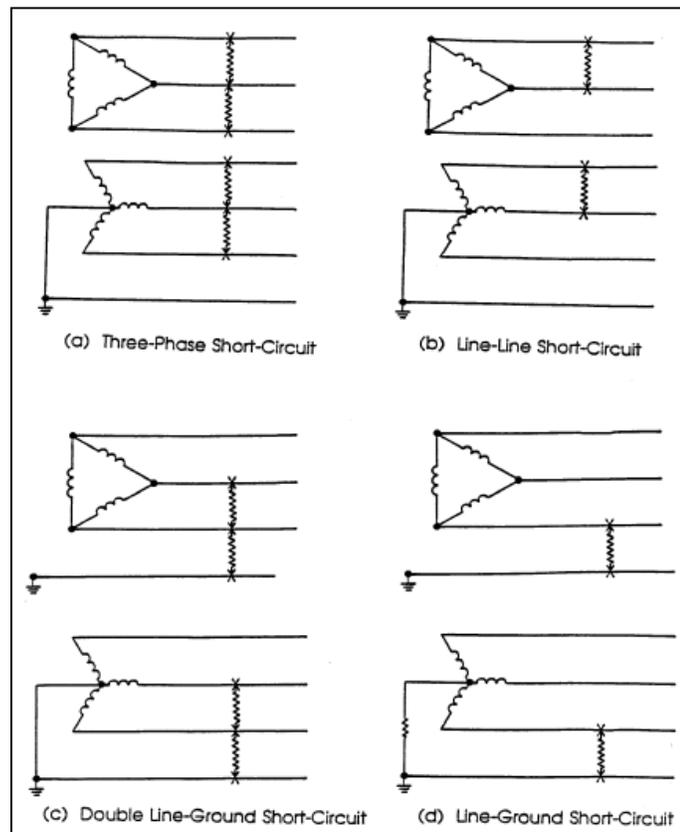


Figura 2.2. Tipos de fallas por cortocircuito
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

2.5 Contribuciones a la corriente de cortocircuito

Como se mencionó anteriormente, en el estado de falla existen varios aportes de distintos componentes del sistema eléctrico. Típicamente las más consideradas son los motores de inducción, máquinas sincrónicas y el aporte de la empresa de suministro. Sin embargo, es importante preguntarse cómo influyen otros componentes muy comunes en cualquier industria, como es el caso de motores con variadores de frecuencia y los bancos de capacitores para corregir el factor de potencia. Cada uno de estos componentes será evaluado según los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006.

2.5.1 Contribución de motores de inducción

Al hablar sobre la corriente de cortocircuito total se mencionó que el aporte $I_{ac\ decay}$, tenía como fuente principalmente los motores de inducción esto debido a que en el momento del cortocircuito el flujo magnético comienza a decaer rápidamente y con esto el aporte, haciendo que este aporte llegue a cero en los primeros ciclos.

Si se tiene un motor de inducción conectado a un bus infinito, el cual tiene un perfil de voltaje constante y en este se inicia una falla el voltaje rápidamente caerá a cero, sin embargo, el motor debido a su constante de inercia, mantendrá su movimiento y con esto se convertirá como un generador, a nivel físico lo que produce es un voltaje en sus terminales debido al flujo magnético atrapado en el rotor. La corriente es limitada exclusivamente por la reactancia del motor. Este aporte decae debido a que este flujo magnético empieza a decaer. Antes de terminar los primeros cinco ciclos la corriente aportada por este motor llega a ser cero.

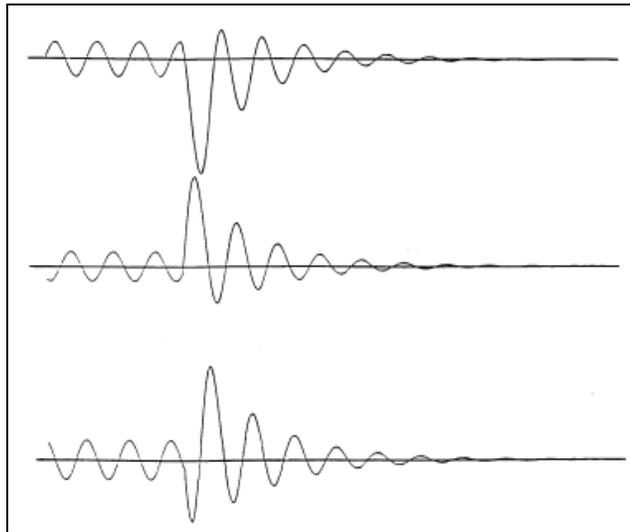


Figura 2.3. Aporte de un motor de inducción en sus tres fases
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

La reactancia subtransitoria se puede entender como la impedancia equivalente del bobinado del estator en el instante que ocurre una falla por cortocircuito, con la máquina sin carga y con voltaje nominal. Esta reactancia determina el flujo de corriente en los primeros ciclos de iniciada la falla. (IEEE, 2006)

La diferencia entre la reactancia subtransitoria y la transitoria, son los números de ciclos, ya que la reactancia transitoria se debe a las mismas características anteriores, pero medida entre el primero y el tercer ciclo después de ocurrido el evento, ya que la saturación de flujo magnético en el bobinado del estator varía en poco tiempo.

A pesar de que la reactancia del sistema depende de la frecuencia de esta corriente aportada, es aceptado utilizar la reactancia subtransitoria para los cálculos de la corriente en el primer ciclo. En caso de no conocer esta reactancia, también es permitido utilizar la reactancia del rotor bloqueado, en donde el resultado dará un valor un poco más conservador.

Como se puede observar en la Figura 2.3, el aporte decae de forma exponencial, para poder contemplar ese decrecimiento en el aporte, es importante aumentar la reactancia según en los ciclos que se vaya a realizar el cálculo. Típicamente los ciclos son primer, tercer y más de una docena de ciclos, según los perfiles de voltaje

existentes. Este incremento de la reactancia subtransitoria se realiza mediante el cuadro siguiente con los factores presentes.

Tabla 2.1. Reactancias o factores recomendados para motores de inducción
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

Tipo de máquina	Reactancia recomendada	Factor recomendado
Primer ciclo		
Motores grandes >1000 hp (746 kW)	16.7%	$1X_d''$
Motores medianos [50-999] hp	20.8%	$1.2X_d''$
Motores pequeños <50 hp (37 kW)	27.8%	$1.67X_d''$
De 1.5 a 5 ciclos		
Motores grandes >1000 hp (746 kW)	25.0%	$1.5X_d''$
Motores medianos [50-999] hp	50%	$3.0X_d''$
Motores pequeños <50 hp (37 kW)	NA	NA

Como se puede observar en el cuadro anterior, la norma hace diferencia entre los motores de inducción según su potencia nominal, en este caso los motores pequeños (entre ¼ hp a 50 hp) son considerados pequeños, y la misma normativa recomienda omitir estos motores para el cálculo de la corriente de falla para tiempos mayores a un ciclo.

La norma también tiene algunos métodos rápidos para simplificar el cálculo como en el caso de un grupo de motores pequeños, lo que recomienda es tomar la suma de las corrientes nominales y multiplicarla por 3.6 o bien utilizar una reactancia equivalente del 28%, mientras que para motores medianos el factor será de 4.6 o también recomienda utilizar como valor conservador (solo en caso de no obtener el valor de la reactancia subtransitoria) una reactancia de 16.7%. Para motores grandes se recomienda utilizar la misma reactancia o bien la corriente nominal multiplicada por 6 como aporte simplificado.

Cada una de estas reactancias recomendadas, es equivalente a tomar una reactancia base y típica de 16.7% para todas las máquinas de inducción, tomando este valor y multiplicarlo por los factores, se va a obtener la reactancia recomendada. Esto cumple con lo estipulado en norma ANSI/IEEE 141-1993 en su Cuadro 4.2.

2.5.2 Contribución de máquinas sincrónicas

Las máquinas sincrónicas son menos comunes de encontrar que los motores de inducción, sin embargo, existen muchos generadores en industrias que funcionan como plantas de respaldo en caso de un corte eléctrico. Las máquinas sincrónicas al igual que las de inducción poseen su aporte más alto antes del primer ciclo y este va decrecer, sin embargo, este aporte no decae tan drásticamente como en el caso de máquinas asíncronas.

Esta disminución se debe a que el flujo magnético en el entrehierro va decayendo, produciendo que la corriente inducida en el estator disminuya. En este caso al tener una excitación de la máquina de forma interna esta hace que el decrecimiento sea más lento que en el caso del motor de inducción, lo anterior combinado con la constante de inercia de la máquina y de la carga hace que el aporte inclusive sobre pase los diez ciclos.

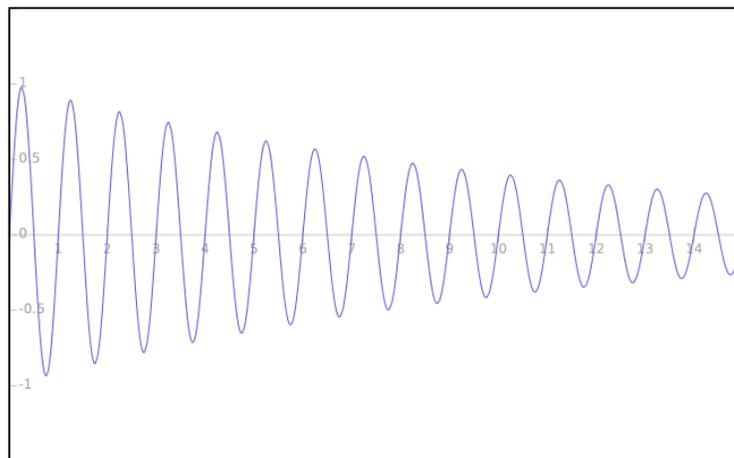


Figura 2.4. Corriente de cortocircuito de una máquina síncrona
Fuente: Propia.

La corriente inicial es calculada usando la reactancia subtransitoria de la máquina. Sin embargo, para calcular el aporte en ciclos de interrupción (3-5) es necesario aplicar ciertos factores recomendados. Además, algunas de las reactancias típicas son presentadas a continuación.

Tabla 2.2. Factores multiplicativos para reactancias de máquinas síncronas
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

Tipo de fuente	Factor recomendado
Primer ciclo	
Turbo alternadores, hidro alternadores con amortiguamiento y condensadores síncronos	$1.0X_{dv}''$
Hidro alternadores sin amortiguamiento	$0.75X_{dv}''$
Motores síncronos	$1.0X_{dv}''$
Tercer a quinto ciclo	
Turbo alternadores, hidro alternadores con amortiguamiento y condensadores síncronos	$1.0X_{dv}''$
Hidro alternadores sin amortiguamiento	$0.75X_{dv}''$
Motores síncronos	$1.5X_{dv}''$

Tabla 2.3. Reactancias típicas para máquinas síncronas
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

Número de polos	RPM a 60Hz	X_{dv}''
>16	<451	28%
8-14	514-900	20%
2-6	>1200	15%

En caso de poder obtener las reactancias propias de la máquina existente en el sistema eléctrico a evaluar lo que se recomienda es utilizar la reactancia subtransitoria, la cual se define como la reactancia del devanado del estator en el instante cuando ocurre la falla.

En caso de tomar el cálculo para ciclos entre tres y cinco, se debe utilizar la reactancia transitoria, la cual es la aparente reactancia después de iniciada la falla. Esta disminución se debe que el devanado dejar de estar saturado de flujo magnético y este hace que aumente su reactancia.

Para ciclos mayores a cinco, se debe utilizar la reactancia síncrona la cual es la reactancia que opone la armadura al voltaje de la excitatriz.

2.5.3 Contribución de la empresa de suministro de energía eléctrica

Esta contribución es básicamente la potencia que es capaz de contribuir la empresa de suministro de energía en el punto de servicio del edificio, industria o institución antes de que sus protecciones actúen. La empresa de suministro posee generadores, los cuales suministran la energía según sea la demanda de esta. En un evento de falla por cortocircuito el sistema demandará mucha energía, en donde la empresa de suministro automáticamente la brindará, hasta que esta falla sea aislada.

La norma ANSI/IEEE 551-2006 hace una división en la generación entre remota y local. Una forma más simple de ver la generación remota serán todos los generadores que se encuentren a más de un transformador del sistema que va a ser sometido al estudio.

Este aporte se comporta de manera distinta a los anteriores debido a que no poseen un decrecimiento en ac. La contribución de la empresa de suministro es vista como una fuente infinita de corriente de falla, donde la corriente aportada en la falla será igual en el primer ciclo como en el período de interrupción (3-5 ciclos). Esta será comúnmente el aporte más grande y en puntos como áreas de residencia o plantas detenidas será el único aporte de corriente de falla.

En esta contribución, el transformador es el equipo que minimiza la corriente de falla aportada por la empresa de suministro eléctrico. Este transformador posee una impedancia base la cual será el primer obstáculo en encontrarse la corriente de falla que viene fuera del sistema eléctrico a estudiar. Por esta razón, uno de los puntos a evaluar principalmente son las entradas y salidas del transformador.

En muchas ocasiones, el transformador de la distribución nominalmente posee tensiones nominales que varían con la diferencia de potencial utilizada en el sistema y deben realizarse sus conexiones en las derivaciones del transformador. Estas

derivaciones que permiten el cambio en el perfil de voltaje también varían su impedancia.

A pesar de que en la mayoría de estudios de cortocircuito no se valora el cambio de impedancia por las derivaciones, este debe considerarse ya que puede empezar a alejarse el resultado de un valor real.

Estos cambios de impedancia se pueden llegar a variaciones típicamente no lineales, en donde su obtención de forma confiable es muy laboriosa haciendo que la mayoría de encargados de los estudios omitan esta corrección, a menos que estos valores estén dentro de los datos del fabricante del transformador (que es muy poco común tener acceso a estos).

La norma ANSI/IEEE 551-2006 incita a realizar los cambios para esto presenta dos ecuaciones sencillas en donde se puede realizar un cambio de impedancia de acuerdo a varios escenarios posibles. Para este caso se tomaron tres escenarios, con tensiones coincidentes, cuando no coincide la tensión en el primario y cuando no coincide en el secundario. Estos escenarios son los que probablemente se pueden encontrar a nivel nacional. Estas ecuaciones varían según donde la derivación esté hecha, en caso de ser en el primario la ecuación estipula lo siguiente:

$$Z_{nueva} = Z_{nominal} * \frac{kV_{Equipo}^2}{kV_{Base}^2} \quad (3)$$

Si la derivación es realizada en el secundario se requiere variar la base del voltaje en el momento de la falla, para esto se debe tomar el valor de la derivación y someter a este factor la corriente de falla nominal.

$$Valor\ de\ Derivación = \frac{Derivación\ a\ voltaje\ nominal}{Valor\ nominal\ de\ derivación} \quad (4)$$

En el primer escenario presentado, se posee el valor nominal de la corriente de cortocircuito donde solo existe el aporte de la empresa de suministro. En este caso los perfiles de voltaje coinciden con los valores del transformador y se realiza el análisis básico. Se suma las tres impedancias en serie y se extrae el valor de cortocircuito.

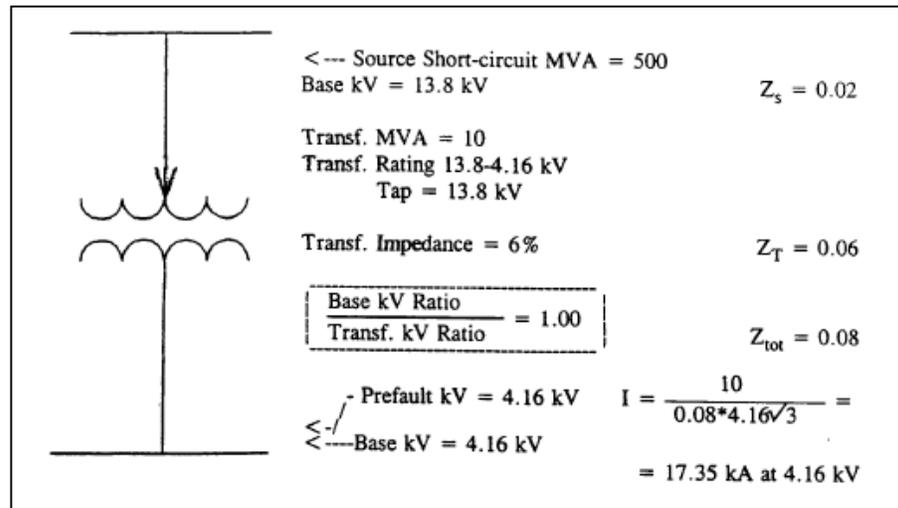


Figura 2.5. Escenario nominal del aporte de la empresa de suministro
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

Ahora se expone el caso en donde se requiera realizar una derivación en el primario del transformador, en este caso se debe recurrir a la ecuación 3 y variar la impedancia del transformador. En este caso se tiene un transformador con un tap de 13.2kV, mientras que el valor base de 13.8kV. La división del primero al cuadrado sobre el segundo al cuadrado permitirá conocer la disminución de la impedancia del transformador.

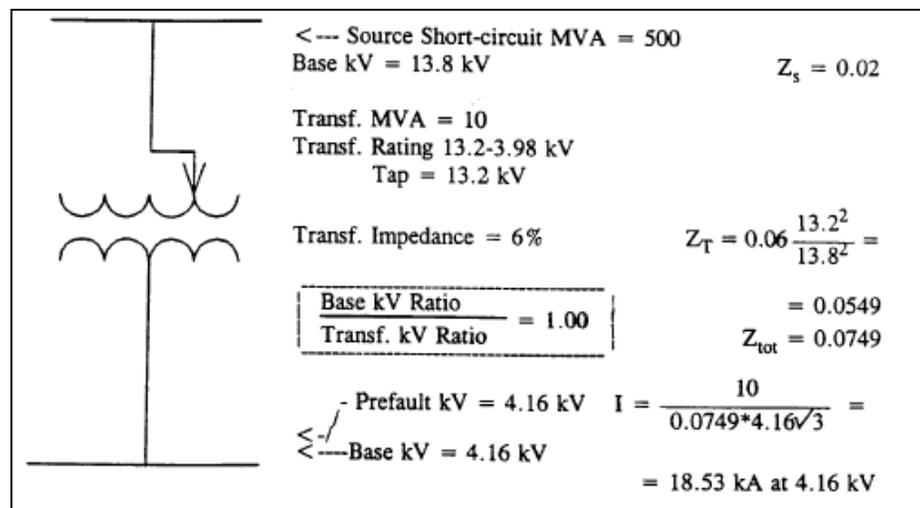


Figura 2.6. Escenario con derivación en el primario en aporte de la empresa de suministro
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

Se puede observar que el valor de cortocircuito varió de 17.35 kA a 18.53 kA, esto es un 7% de porcentaje de error que puede ir creciendo según el nivel de detalle del estudio.

El tercer caso presentado es cuando el valor del voltaje en el secundario varía a la base, en donde se debe tomar la ecuación 4. En este caso se tiene una tensión base de 4.6kV y un voltaje en el secundario de 4.25 kV o un voltaje de prefalla. Para este caso se recomienda dividir el segundo sobre el primero y este factor aplicarlo a la corriente de falla nominal como se presenta a continuación.

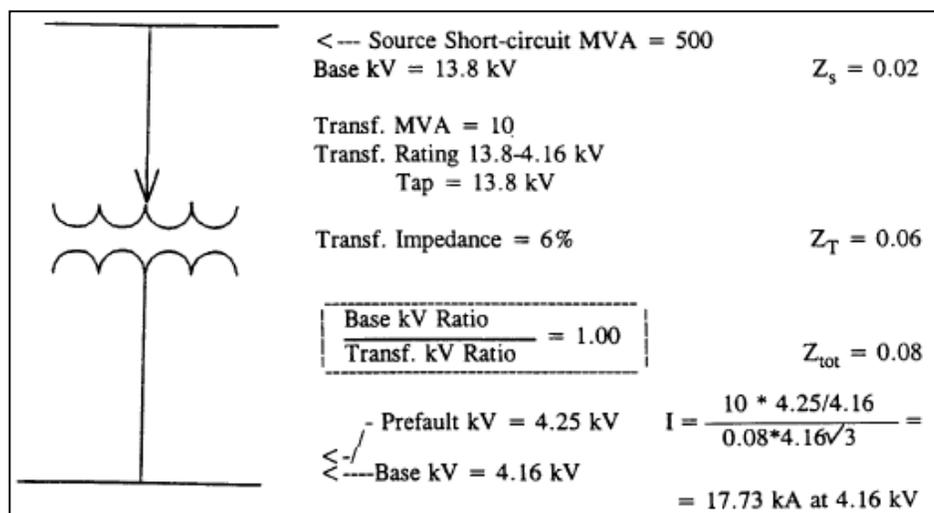


Figura 2.7. Escenario con derivación en el secundario en aporte de la empresa de suministro
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

En este caso la derivación no produjo un cambio muy considerable en la corriente de cortocircuito, ya que la variación es de solo un 2%. En caso de tener derivaciones tanto en el primario del transformador como en el secundario se debe de tomar en cuenta hacer las dos correcciones, para estos casos se reportan variaciones menores a un 1%.

2.5.4 Contribución de bancos de capacitores

Actualmente uno de los equipos más comunes en los sistemas eléctricos son los bancos de capacitores, estos tienen como objetivo mejorar la calidad de energía respecto al factor de potencia, obteniéndose beneficios como disminución de carga aparente en conductores y transformadores, mejoramiento de la calidad de energía y principalmente, evitar penalizaciones monetarias por bajo factor de potencia en la factura de energía eléctrica.

El capacitor en un sistema eléctrico con corriente alterna, está cargándose y descargándose constantemente generando potencia aparente la cual es consumida por los motores y demás equipos con bobinas en el sistema. Uno de los puntos más críticos es si el capacitor es capaz de afectar en el cálculo de corrientes de cortocircuito. La norma ANSI/IEEE 551-2006 es la primera de las normas IEEE en considerar el efecto de los capacitores en un estudio de cortocircuito.

La fatiga asociada a las descargas de los capacitores es distinta a las típicas presentes en eventos de falla debido a las altas frecuencias y constantes de tiempo en los circuitos capacitivos. Sin embargo, estos pueden afectar equipos electrónicos sensibles, los cuales son más comunes año con año en industrias, comercio e instituciones.

Como se mencionó anteriormente un capacitor está en un ciclo controlado en donde se carga y se descarga cada medio ciclo según la frecuencia en que trabaje. Como es lógico, el punto en donde más aporte a la corriente de cortocircuito será cuando esté conectado al máximo. En el momento cuando se presenta un evento de cortocircuito el voltaje cae deliberadamente y esto produce que el capacitor se descargue apresuradamente.

Por ejemplo, se tiene un banco de capacitores de 10MVAR, con una capacitancia de 139.3 μ F conectado a un cable de 30 metros 500mcm (Ver Anexo 1). Esta configuración llega a alcanzar un aporte de 35kA a medio ciclo.

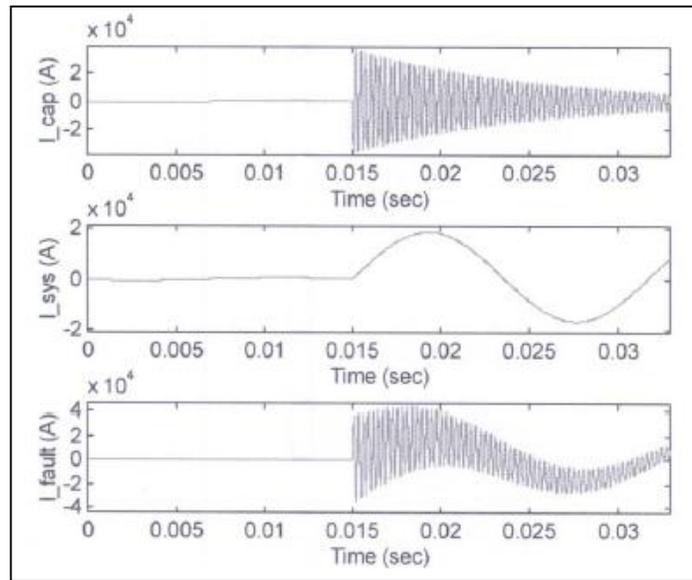


Figura 2.8. Comportamiento de banco de capacitor de 10MVAR
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

En la figura anterior, se tiene en la primera sección el aporte del banco de capacitores, en la segunda sección se presenta la corriente aportada por la empresa de suministro, y la última la suma de ambas. La corriente asimétrica alcanza un valor máximo de 44kA, en donde el capacitor aporta 22kA y se puede observar que la corriente asimétrica llega a un máximo cuando el aporte de la empresa de suministro es máximo y el aporte del capacitor cae rápidamente.

Variando la distancia del cable se obtiene comportamientos distintos. Por ejemplo, en el caso de un cable de 15 metros en estos casos el aporte del banco de capacitores será disipado en su totalidad antes de 1/30 de ciclo (0.5ms). Para un cable de 300 metros la disipación termina a un 1/8 de ciclo (2ms).

Para este último caso el aporte es mucho mayor debido al efecto de la reactancia del cable, y toma más tiempo el disiparse debido a la distancia más larga que debe llevar el aporte.

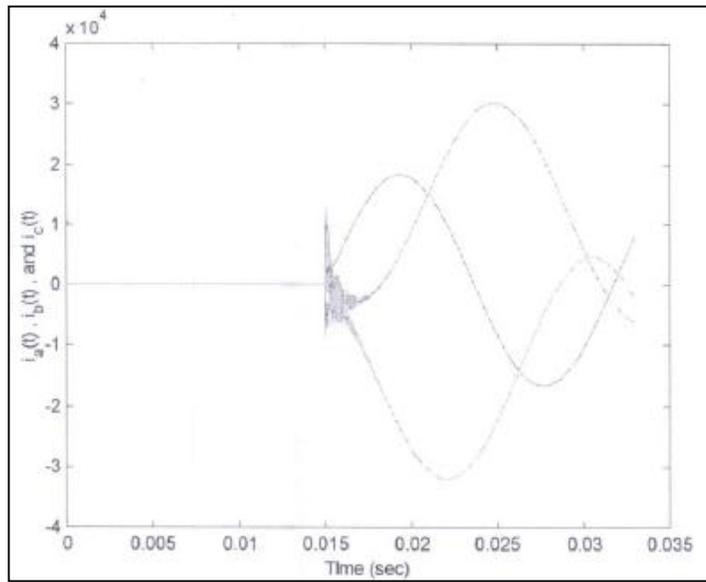


Figura 2.9. Corriente de falla con cable de 15m (Cap 10MVar)
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

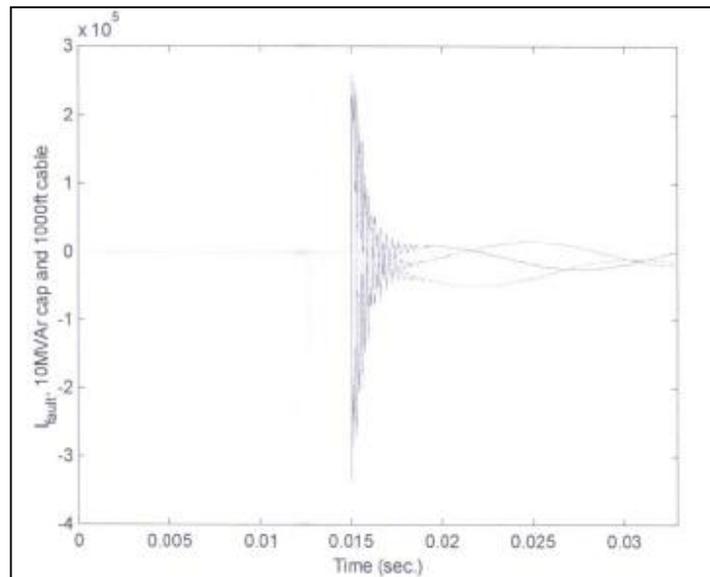


Figura 2.10. Corriente de falla con cable de 300m (Cap 10MVar)
Fuente ANSI/IEEE 551-2006.

Para las distribuciones comunes el banco de capacitores está cercano del panel principal de la industria, en donde la distancia puede estar entre los 15 a los 300 metros

de cable. Para esto se considera que el aporte de los bancos de capacitores se verán disipados entre 1/8 a 1/30 de ciclo. Como un interruptor no es capaz de actuar en este corto período de tiempo, esta corriente pasará por el interruptor.

Con la ecuación 1 se observó que la corriente efectivamente puede ocasionar un aporte adicional a fatigas energéticas como fuerzas electromagnéticas. Esto puede valorarse, sin embargo, no se considera una gran contribución debido al poco tiempo de aporte.

La ecuación siguiente es la utilizada por la norma ANSI/IEEE 551-2006 para calcular la corriente aportada por el banco de capacitores, esta será evaluada para conocer la corriente que también aporta este componente y valorar el cable que alimenta el banco de capacitores.

$$I_{pico} = \sqrt{\frac{2C}{3L}} * V_{LL} \quad (5)$$

Otro de los componentes muy comunes son los filtros de armónicos. Estos en principio son bancos de capacitores que también posee un reactor con un X/R muy alto. No obstante, el comportamiento es muy similar al de los bancos de capacitores, con un valor pico muy elevado, pero decrece rápidamente y no afecta en la activación del disyuntor.

Se presenta a continuación, tres estudios en donde se varían las capacidades de un banco de capacitores con un filtro de quintas armónicas. Se puede observar que el principal cambio es en la forma de onda del aporte.

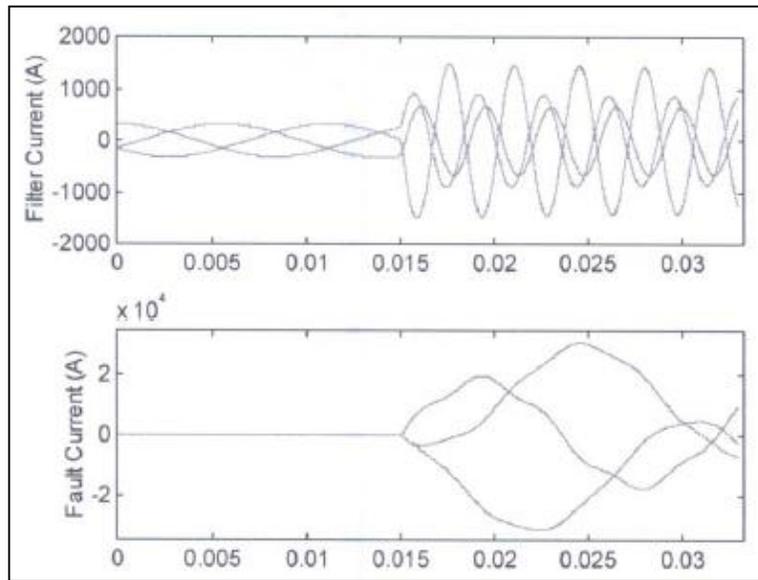


Figura 2.11. Aporte de etapa de 5MVA con un filtro de 5ta armónica
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

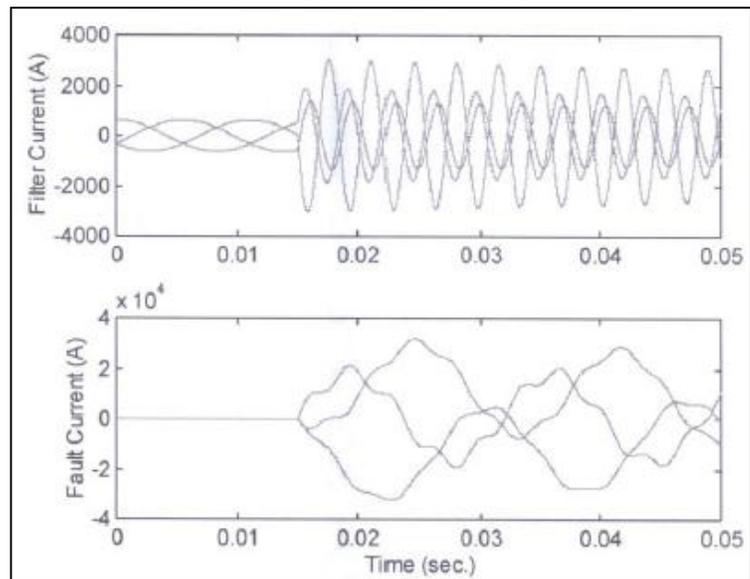


Figura 2.12. Aporte de etapa de 10MVA con un filtro de 5ta armónica
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

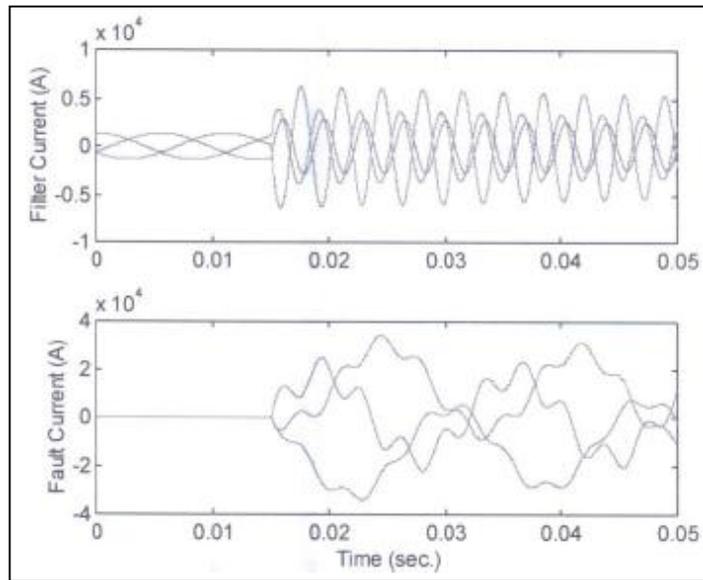


Figura 2.13. Aporte de etapa de 20MVA con un filtro de 5ta armónica
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

Para evaluar una conexión típica debe considerarse un capacitor conectado cerca de los motores y con esto mejorar el factor de potencia directamente ahí, en estos casos, la norma realiza una simulación en donde el aporte del banco de capacitores es de solo 400A, mientras que del motor y la fuente llegan a ser casi 33kA. Al agregar el aporte del capacitor aumenta en solo un 1% la corriente de cortocircuito.

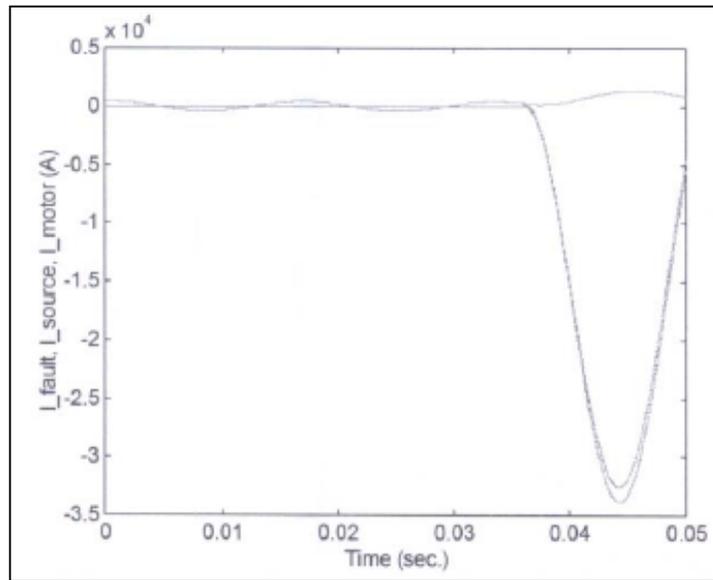


Figura 2.14. Corriente de cortocircuito de motor 700HP y empresa de suministro 500MVA
Fuente: ANSI/IEEE 551.

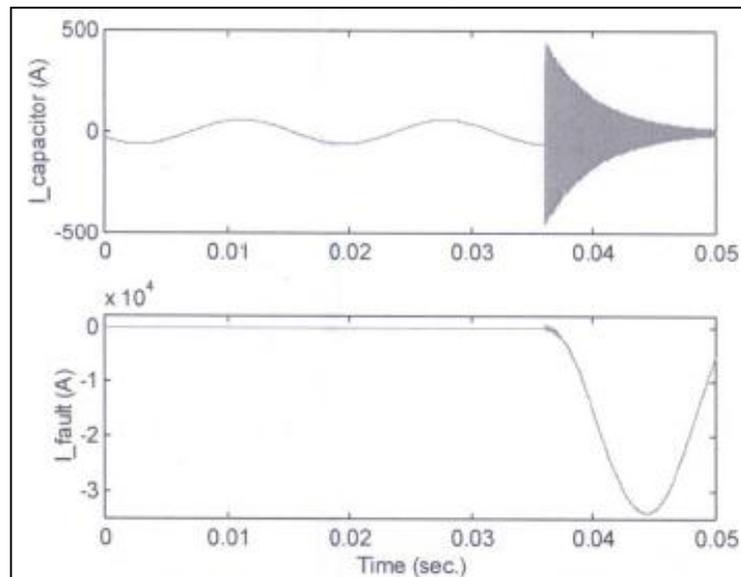


Figura 2.15. Aporte de configuración anterior con etapa de 0.2MVA
Fuente: ANSI/IEEE 551.

En general, los bancos de capacitores y filtros de armónicos son descargados antes de alcanzar un cuarto de ciclo, por lo que esta descarga no es capaz de disparar los interruptores; por lo tanto, no se recomienda tomar en cuenta estos aportes para estudios de cortocircuito a nivel de disyuntores. Sin embargo, se tomará el aporte de

la corriente de cortocircuito del banco de capacitores para evaluar los conductores que este alimente.

2.5.5 Contribución de inversores y rectificadores

Otro de los equipos más utilizados en las industrias son los convertidores usados como inversores o rectificadores. Estos están en muchos componentes como los variadores de frecuencia y unidades de suministros de potencia sin interrupción (UPS). La definición básica de un convertidor es un componente que permite el paso de cierta frecuencia a otra o a corriente directa.

Con el uso de la electrónica en los sistemas eléctricos es importante conocer el comportamiento de estos equipos en los sistemas en un evento de cortocircuito, ya que pueden contribuir e inclusive eliminar aportes de otras cargas. Los convertidores se dividen según tengan protección de control de red o no (*grid-control protection*) y el daño que puede producirle un cortocircuito a estos equipos depende de si existe o no esta protección. Estos tienen una acción de un ciclo típicamente por lo que protegen efectivamente los equipos de un cortocircuito.

Existen cuatro tipos de convertidores entre ellos están:

- Rectificador: Convierte de AC a DC.
- Inversor: Convierte de DC a AC.
- Variador de frecuencia: Convierte de un voltaje en AC a otro voltaje en AC con distinta frecuencia.
- *Chopper*: Convierte un voltaje en DC a otro voltaje en DC.

Todos estos equipos hacen uso de equipos como diodos, los cuales tienen como función permitir el paso de corriente en una sola una dirección. Tomando lo anterior, se puede tener en cuenta que depende de la configuración del sistema así permitirá que las cargas aguas debajo de este sean capaces de aportar o no al cortocircuito.

Los sistemas de corriente directa conectados, a una red de corriente alterna mediante un convertidor, aportarán al cortocircuito si y solo si este convertidor es un

inversor debido a que naturalmente el mismo permite el paso de corriente de DC hacia AC.

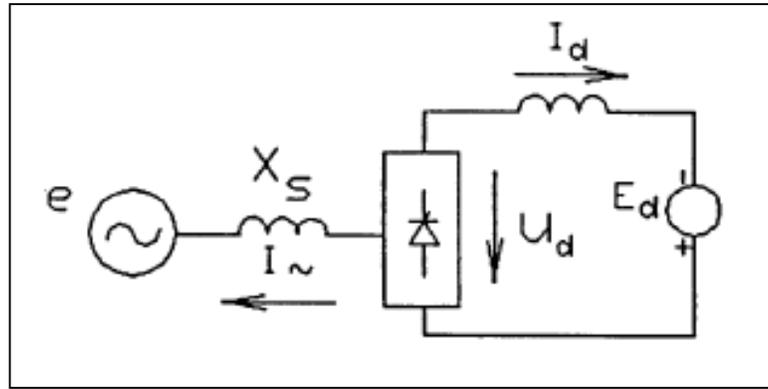


Figura 2.16. Diagrama equivalente de un sistema AC-DC
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

La mayoría de los equipos electrónicos que actualmente se usan, poseen la protección de control. Esta protección permite que en el momento cuando exista un cortocircuito, este opere inmediatamente y con esto aísle el aporte de las fuentes en DC al sistema. Esto en menos de un ciclo. En caso de que el mismo no opere el aporte será directo comprometiendo principalmente el dispositivo electrónico.

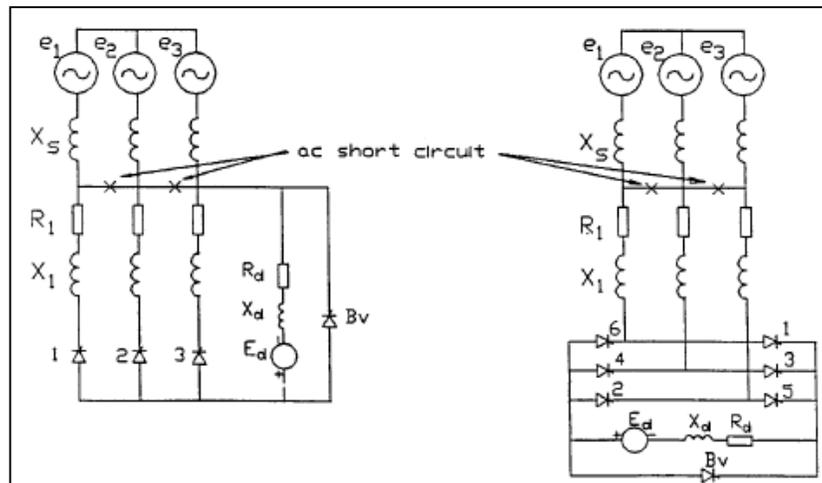


Figura 2.17. Diagrama equivalente de un sistema AC-DC con una falla en AC
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

El aporte de las fuentes en DC tiene una influencia directa en la recuperación del sistema eléctrico. Esto debido a que tiende a saturar el núcleo del transformador del convertidor. Cuando el cortocircuito se termine y la planta vuelva arrancar puede existir una corriente de arranque muy alta (*inrush*) en la energización de este sistema.

En caso de tener una falla esta vez del lado de la corriente directa, el comportamiento con protección será similar, donde el incremento de corriente se evidenciará en una sola de las fases mientras la protección arranca, pero en caso de no existir la protección esta se verá en las tres fases, de forma secuencial.

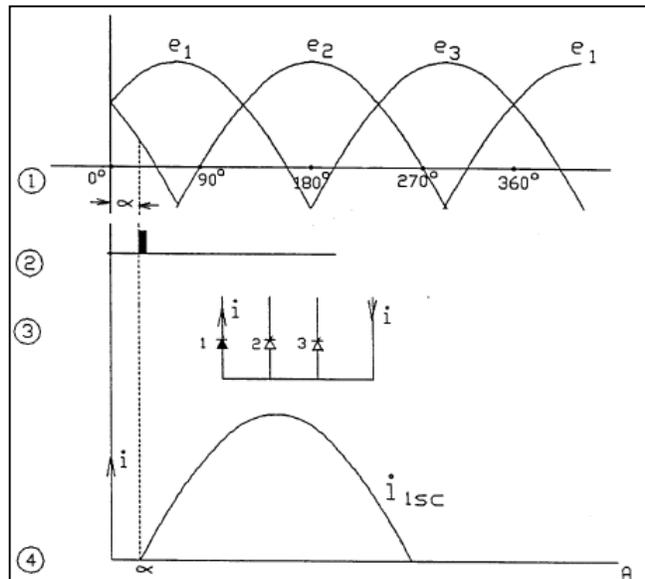


Figura 2.18. Comportamiento de falla del lado DC con *grid-control*
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

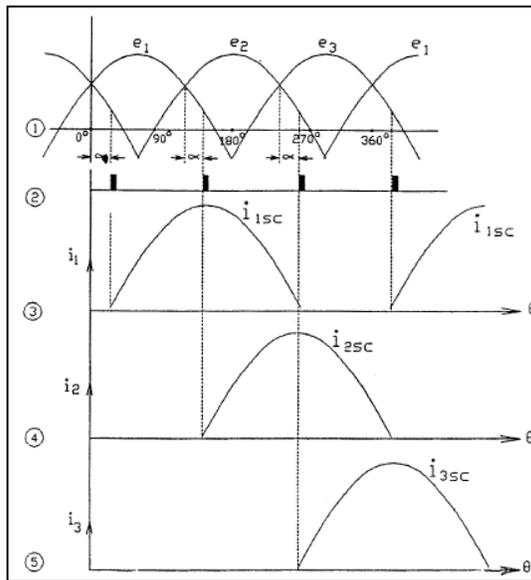


Figura 2.19. Comportamiento de falla del lado DC sin *grid-control*
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

2.6 Capacidades interruptivas y soporte de cortocircuito

Luego de realizar un estudio de cortocircuito en donde se tenga los valores de corrientes de cortocircuito disponibles en cada una de las barras del sistema, se procede a seleccionar apropiadamente los equipos eléctricos del sistema, o bien conocer si los existentes son capaces de soportar el estado de falla del equipo.

Uno de los equipos que se debe tomar en cuenta si es capaz de soportar esta corriente son los disyuntores. Estos cumplen con la importante tarea de proteger los alimentadores y máquinas eléctricas de todo el sistema eléctrico de sobrecargas y transientes de corriente mediante sus mecanismos electromagnéticos y térmicos.

Siendo una tarea tan importante la función de los disyuntores se debe conocer si estos son capaces de soportar este transiente. Existe una gran variedad de protecciones para la misma corriente nominal en donde varía ampliamente el precio, esto según la capacidad de soportar corrientes de cortocircuito. Sin embargo, el seleccionar incorrectamente estos puede ocasionar la destrucción total de la

protección y un posible arco eléctrico, con consecuencias de gran impacto en la seguridad laboral.

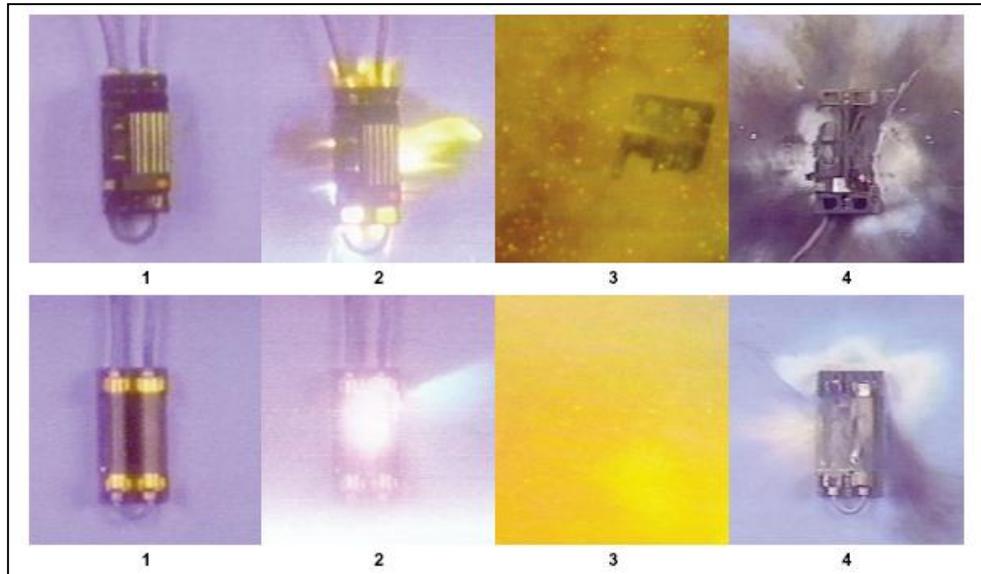


Figura 2.20. Destrucción de unidades de protección
Fuente: Eaton 2014.

Para la correcta selección de un equipo de protección se debe tomar en cuenta las siguientes características:

- Tensión del circuito
- Corriente nominal del componente a proteger
- Valor en el punto de la corriente de falla
- Factor X/R en el punto de falla
- Capacidad de soporte del equipo al primer ciclo
- Capacidad interruptiva del equipo a primer ciclo
- Factor X/R de prueba del equipo

La tensión y la corriente nominal son tomadas desde el diseño de la red eléctrica, los valores de la corriente de falla y el factor X/R del punto de falla son tomados del estudio de corrientes de cortocircuito. Los demás puntos son tomados de los datos del fabricante de la protección.

La capacidad interruptiva de los equipos, se refiere a la capacidad del equipo a ejecutar su función de manera correcta, en este aislar el ramal, sin sufrir daño. Esta capacidad varía según los métodos de fabricación, equipos, modelos, fabricantes y componentes. Las capacidades interruptivas van desde los 10kA hasta los 125kA para disyuntores de caja moldeada. En caso de tener disyuntores con disparo electrónico se pueden tener capacidades hasta de 200kA.

Es importante aclarar que, para un mismo disyuntor, la capacidad interruptiva es inversamente proporcional a la tensión de servicio. Esto quiere decir que para una protección de caja moldeada a 240Vac es capaz de soportar más corriente de cortocircuito que a 480Vac. Esto debido a que la potencia servida en el momento de falla es la que destruye el componente.

Todos los disyuntores deben ser sometidos a pruebas por parte del fabricante para poder asegurar que sus equipos son capaces de soportar esta corriente de falla. En estas pruebas se realiza mediante un ambiente controlado en donde se simula un circuito con un factor X/R establecido, este factor X/R de prueba debe ser siempre mayor al factor X/R del punto de falla para poder asegurar que la protección efectivamente es capaz de soportar la corriente de falla. El valor típico presentado por los fabricantes para este tipo de pruebas es de 15. (IEEE, 2006)

La norma ANSI/IEEE 551-2006 sugiere una lista de equipos que deben de ser sometidos a comparación con los resultados del estudio de corriente de cortocircuito. Estos equipos son comprobados según el propósito del estudio, sin embargo, típicamente son:

- Fusibles, en donde se compara el voltaje nominal y la corriente a primer ciclo.
- Disyuntores de alta tensión, donde se compara voltaje nominal y corriente de primer ciclo.
- Disyuntores de baja tensión, donde se compara el voltaje nominal, corriente de falla en el primer ciclo.
- Desconectores, los cuales se componen principalmente de fusibles.

- Paneles de desconexión (*switchgears*) o centros de control de motores (MCC), donde se compara la capacidad de soportar corriente de falla al primer ciclo y voltaje nominal.
- Límites de calentamiento de conductores. Estos dependen principalmente de la corriente de falla al primer ciclo, debido a la energía liberada transformada en calor puede dañar el aislamiento de los conductores.

Este último punto requiere conocer la capacidad de los conductores a la corriente de cortocircuito en el primer ciclo, esta misma información puede ser tomada de los datos del fabricante. A nivel nacional los principales son Phelps Dodge y Viakon.

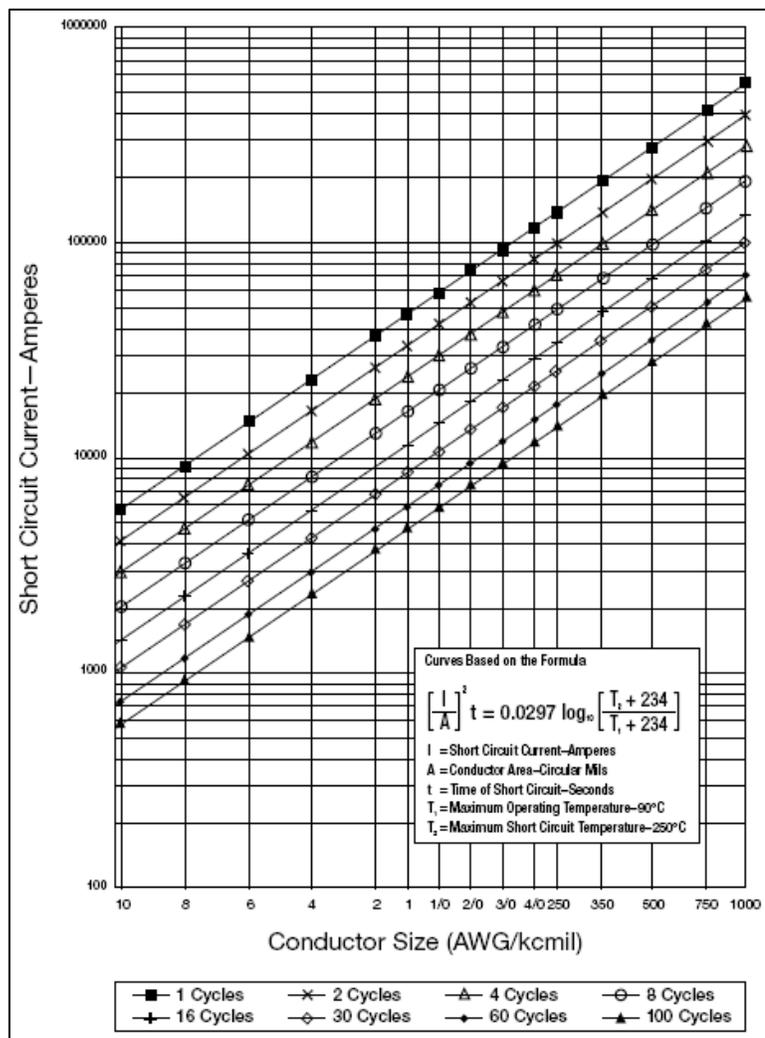


Figura 2.21. Corriente de falla permitido para conductores con aislamiento a 90°C
Fuente: General Cable.

2.7 Métodos de cálculo

Existen muchos métodos numéricos para calcular las corrientes de cortocircuito. Cada uno brinda distintas características, principalmente en la simplicidad y su exactitud del cálculo. La principal característica que se debe tomar en cuenta a la hora de elegir un método es la exactitud y la confiabilidad de este. En esta sección se mencionará cuatro métodos.

2.7.1 Método de las impedancias

El método de las impedancias es uno de los más utilizados. Entre sus características las más importantes a destacar son:

- Apto para redes con perfiles de voltaje menores a 1000V
- Precisión en cualquier punto de la red eléctrica

Este método está basado en la misma ley de Ohm, en donde se toma consideraciones como que el voltaje prefalla es el mismo al voltaje nominal en cualquier punto y cualquier momento. Lo que busca el método es simular todas las impedancias que intervengan de la generación de corriente de falla al punto a analizar y con esto valorar los aportes de todos los dispositivos presentes. (Barahona, 2015)

Este método se basa en simular toda la red en impedancias equivalentes en PU (el cual será explicado más adelante) y simplificar la red hasta obtener una sola impedancia en el punto de falla mediante el método de Thevenin. Al alcanzar este punto se requiere aplicar la ley de Ohm y obtener la corriente de falla asimétrica en PU, al ser multiplicada por la corriente base permite conocer la corriente de falla en cualquier punto.

Este método requiere de la siguiente información:

- a) Impedancia de todas las máquinas y componentes presentes en el sistema
- b) Tensión en el punto a analizar
- c) Aporte por parte de la empresa de suministro

d) Diagrama unifilar del sistema

Este método toma los siguientes factores multiplicativos para obtener la corriente asimétrica:

Tabla 2.4. Factores de asimetría del método de las impedancias
Fuente: (Barahona, 2015).

Característica de red	Factor multiplicativo
Mayores a 5kV, totalmente inductivos con $X/R > 2000$.	1.6
Menores a 5000V sin generación local.	1.5
Menores a 600V.	1.25

Este método es el recomendado por la empresa Schneider Electric en donde resume todo el proceso en el cuaderno técnico número 158.

2.7.2 Método de KVA's equivalentes

El método de los KVA's equivalentes es un método preciso y sencillo de utilizar, este método se basa en el principio que todo aporte está ligado a la potencia aparente de cada fuente en el cortocircuito. Teniendo en cuenta que la potencia aparente depende directamente de tensión de operación (en este caso voltaje de prefalla) y la corriente de cortocircuito.

Este método asocia las impedancias de cada equipo con una potencia aparente equivalente y alcanzar una reducción al punto de falla y conocer la potencia del cortocircuito en el punto. Al conocer el voltaje, o bien suponer que no varía, se alcanza la corriente simétrica. (Barahona, 2015)

La ventaja principal de este método es que minimiza el tiempo de cálculo debido a que utiliza mayores aproximaciones en los aportes de las fuentes, por ejemplo, en el caso de motores, se asume que el aporte será un múltiplo de la potencia nominal. Esto minimiza la precisión, sin embargo, utiliza aproximaciones bastante acertadas por lo que los resultados suelen ser confiables.

Este método también requiere del diagrama unifilar, datos técnicos de las fuentes de cortocircuito y alimentadores, además del aporte de la empresa de suministro y transformadores existentes en la planta.

2.7.3 ANSI/IEEE 141-1993

La norma internacional ANSI/IEEE 141-1993 “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”, mejor conocido como RED BOOK. Contiene información sobre todo lo referente a sistemas eléctricos de industrias y comercios. La última versión de esta norma es de 1993, sin embargo, se ha mantenido como uno de los métodos más utilizados y reconocidos en el ámbito de la ingeniería eléctrica.

Esta norma en el capítulo 4 reúne una serie de recomendaciones para realizar el estudio de cortocircuito, en donde en menos de 200 páginas resume cómo calcular las corrientes de falla. Además, permite tener aproximaciones conservadoras para el diseñador y es una fuente confiable de estimaciones en caso de no obtener los valores reales.

Este método se basa principalmente en el método de las impedancias, sin embargo, este varía en el uso de valores multiplicativos en distintos puntos del cálculo; por ejemplo, se utiliza valores para multiplicar las impedancias de los motores existentes, hace diferencia entre generadores locales y remotos, etc.

El método permite tener la corriente de falla en cualquier punto de la red, además de explicar ampliamente mediante ejemplos a distintos ciclos para los distintos disyuntores que pueden estar presentes en el sistema. La mayor ventaja que posee este método sobre los dos anteriores es su respaldo mediante la IEEE y que el mismo puede ser utilizado para media y alta tensión.

2.7.4 ANSI/IEEE 551-2006

Durante todo el capítulo se ha mencionado repetidamente esta norma. La ANSI/IEEE 551-2006 IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems, recopila las recomendaciones de todos los demás Color Books de IEEE, además amplía las investigaciones con otras posibles fuentes de cortocircuito. Esta norma publicada por primera vez en el 2006, toma como base el método de la norma ANSI/IEEE 141-1993 y realiza algunas modificaciones basadas en normas IEC y en métodos empíricos para conocer de forma más precisa las corrientes asimétricas.

La norma cuenta con capítulos destinados a cada tipo de aporte según las máquinas más comunes presentadas en un sistema eléctrico industrial, lo que permite también realizar sólidas estimaciones y decisiones de ingeniería con bases confiables.

Este es el método elegido para la comparación teórica de este proyecto debido a poseer grandes aportes bibliográficos, excelentes bases teóricas, una fuente confiable y de gran prestigio y principalmente ser la única norma de IEEE en basarse completamente en las fallas de cortocircuito de forma actual.

2.7.4.1 Técnica de cálculo

El método que presenta la norma ANSI/IEEE 551-2006 tiene como objetivo calcular las corrientes de cortocircuito en cualquier punto de la red. El método requiere de las siguientes características en el sistema eléctrico:

- La frecuencia de la red debe ser constante
- Se considerará los valores de resistencia constantes y las reactancias saturadas
- El valor de voltaje y su ángulo de fase debe se considera constante
- La corriente de falla de cortocircuito debe ser sinusoidal

Este método toma algunos teoremas y técnicas de cálculo para obtener una reducción del sistema a una sola impedancia y con esto obtener las corrientes de cortocircuito y factor de asimetría.

2.7.4.2 Linealidad

Este es uno de los conceptos fundamentales de toda la base eléctrica actual. Este concepto dicta la relación directa entre la impedancia y la corriente eléctrica con el voltaje. A la hora de simplificar la red en el punto de falla se llega a una representación con una impedancia, en donde esta es excitada por un voltaje nominal como lo dicta la ley de Ohm, en donde la corriente es proporcional al voltaje nominal para una impedancia constante.

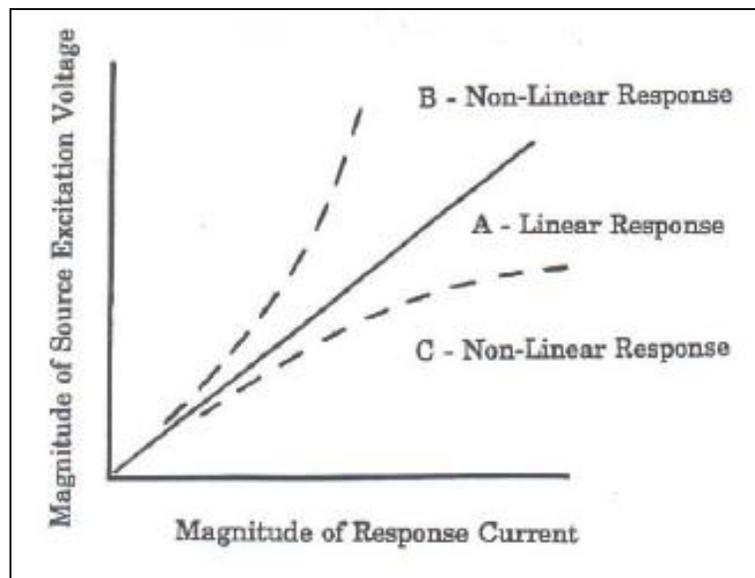


Figura 2.22. Representación de la linealidad eléctrica
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

2.7.4.3 Superposición

La superposición se ve aplicada en las corrientes de cortocircuito en el efecto total en el punto de falla será la suma de los efectos de cada una de las fuentes al punto de falla. En este concepto se determina al asumir que el voltaje en todo el circuito

es constante y con el mismo ángulo de fase, además permite la reducción del circuito a una sola fuente general. Esta afirmación da paso al siguiente teorema.

2.7.4.4 Teorema de Thevenin

El teorema de Thevenin afirma que todo circuito puede ser reducido a una representación de una fuente de tensión y una impedancia en serie en las terminales del punto de interés. Este método hace uso de los conceptos anteriores, busca reducir la red eléctrica a una fuente de tensión y una impedancia equivalente que simplifique el cálculo de la corriente que pasa por el punto de interés.

El método de Thevenin de forma abreviada se calcula mediante tres pasos:

- Aislar el punto de interés al cambiarlo con un circuito abierto.
- Cambiar las fuentes de voltaje por circuitos cerrados y reducir la red de impedancias hasta alcanzar una resistencia equivalente.
- Calcular la corriente que pasa por el punto de interés para simular la fuente de voltaje.

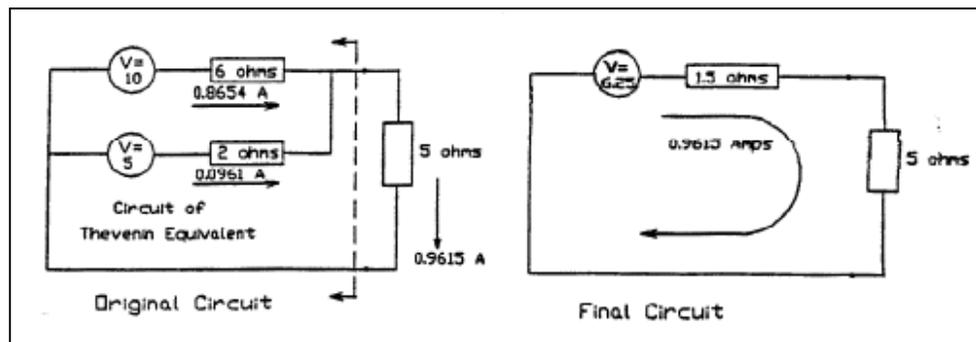


Figura 2.23. Circuito reducido mediante el teorema de Thevenin
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006.

2.7.4.5 Manipulación en PU

El sistema PU, es un método para la simplificación de variables eléctricas y evitar manejar valores muy grandes. El sistema PU, busca tomar una base de potencia y voltaje y referenciar todos los valores de la red a estos valores. Esto permite ganar tiempo en el manejo de datos y disminuye el esfuerzo de los cálculos.

El sistema PU, requiere de la selección de una tensión y potencia base. Según la norma es típico utilizar valores de 10 MVA o 100 MVA, sin embargo, también es común y práctico seleccionar la capacidad nominal del transformador o máquina más grande que se encuentre en el sistema eléctrico.

Luego de obtener esta potencia se puede obtener una corriente base dividiendo la potencia entre el voltaje, además se puede obtener una impedancia base dividiendo el voltaje base entre la corriente base.

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad (6)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad (7)$$

De esta forma, se puede referenciar cada una de las variables eléctricas existentes (impedancias, voltaje y potencias) a un sistema PU, al dividir las entre la variable base.

Uno de los puntos a definir es que la mayoría de las impedancias de las máquinas eléctrica vienen en PU, siendo la potencia nominal del equipo la potencia base. Para estos casos es importante hacer el cambio de base mediante la siguiente ecuación:

$$Z_{N\ base} = Z_{V\ base} \times \frac{S_{N\ base}}{S_{V\ base}} \times \left(\frac{V_{V\ base}}{V_{N\ base}} \right)^2 \quad (8)$$

2.7.5 Procedimiento del método

La norma ANSI/IEEE 551-2006 resume su procedimiento en seis pasos básicos. Estos pasos son de forma secuencial y de suma importancia para el estudio. El primer paso es elaborar un diagrama unifilar en donde se muestre todos los elementos incluidos en el estudio de cortocircuito, estos componentes son alimentadores, paneles, máquinas eléctricas que aporten significativamente a la corriente de falla (acorde con lo mencionado en secciones anteriores). Para esto es importante tener

claro la red de conexión de la instalación, modelos de máquinas eléctricas con impedancias propias y una clara simbología de cada elemento.

Como segundo paso se debe realizar un diagrama de impedancias mostrando la equivalencia de cada componente en su impedancia. En muchos trabajos de ingeniería se utiliza el sistema PU para simplificar los cálculos y los números. Para este caso, la norma permite generar dos diagramas, en donde uno contenga los valores de resistencia y el otro los valores de reactancia por aparte.

El método implica que cada uno de los factores visto en cada uno de las secciones de distintos aportes deben ser aplicados antes de obtener el valor X/R , por ejemplo, en las reactancias de las máquinas asíncronas o bien los ajustes por las derivaciones de los transformadores.

El tercer paso es realizar la equivalencia de las conexiones con otros sistemas eléctricos, por ejemplo, el sistema de distribución de energía eléctrica de la empresa que brinda el servicio. En este sistema no es necesario analizar puntos, sin embargo, estas conexiones permiten conocer los posibles aportes de los posibles sistemas a los que se esté conectado.

El cuarto paso es el cálculo de la corriente simétrica y el factor de asimetría en el punto de análisis. Esto se realiza reduciendo los dos diagramas del punto 2, tanto en resistencias como en reactancias a una variable equivalente de cada tipo, luego se divide la reactancia entre la resistencia y se obtiene el factor de asimetría X/R . La corriente simétrica se obtiene al dividir el voltaje de prefalla entre la impedancia equivalente obtenida.

Es importante aclarar que el factor de asimetría varía según el método de cálculo de la impedancia equivalente, en este caso el método ANSI/IEEE 551-2006 permite el cálculo de la impedancia mediante arreglos de resistencias y reactancias de forma independiente, mientras que la mayoría de los programas de simulación hacen una manipulación de números complejos. Esto será ampliado en la comparación de resultados.

El quinto paso es calcular mediante el factor X/R, el factor multiplicativo para obtener la corriente asimétrica. Estos factores son importantes para el cálculo de corrientes a 1 ciclo o a 3 ciclos. El sexto paso es comparar los resultados obtenidos con las capacidades interruptivas de los posibles disyuntores, y con esto conocer si los mismos son capaces de soportar las corrientes de falla por cortocircuito en caso de presentarse un evento de este tipo.

2.7.5.1 Factores multiplicativos de asimetría

En el quinto paso se requiere calcular y aplicar el factor que multiplique la corriente simétrica y con esto, obtener una corriente asimétrica. La corriente asimétrica será la que se comparará con las capacidades interruptivas de las protecciones y las capacidades de soporte de los conductores.

La norma presenta dos métodos para realizar los cálculos de estos factores de multiplicación según el número de ciclos en los que son calculados. Para el primer caso, siendo el de mayor relevancia para redes eléctricas que posean un perfil de voltaje menor a 1000V se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$I_{pico} = \sqrt{2}I_{sim} \left(1 + e^{-\frac{2\pi\tau}{X/R}} \right) \quad (9)$$

$$\tau = 0.49 - 0.1e^{-\left(\frac{X}{3R}\right)} \quad (10)$$

$$I_{asim} = I_{sim} \sqrt{1 + 2e^{-2\pi/\left(\frac{X}{R}\right)}} \quad (11)$$

Estas ecuaciones son aproximaciones propias de esta norma las cuales son basadas en las normas IEC y el método del medio ciclo. Este método calcula la corriente total a medio ciclo. En donde los valores típicos de aproximación son de 1.6, esto se obtiene cuando el X/R es 25, por lo que se puede utilizar esta aproximación para valores X/R mayores a 25.

Para los cálculos de los factores de multiplicación para cálculos entre tres a cinco ciclos, se debe recordar la clasificación de los tipos de generación “local” o “remota”. En este caso se utiliza un criterio numérico en donde se divide la corriente de aporte al cortocircuito por el generador entre una hipotética falla en sus terminales es mayor a 0.4 la generación es considerada local. Este criterio es denominado como criterios del 40%.

Este criterio también se puede ver aplicado como la división de la impedancia entre el generador y el punto de falla con la reactancia subtransitoria es mayor a 1.5 se considerará una generación local. Es importante recordar que se debe aplicar los cambios de base si es necesario.

Al seleccionar el tipo de generación como local o remota, se debe seleccionar el factor de multiplicación de la siguiente figura según el tipo de falla, valor X/R y el tiempo de reacción de los interruptores. Para interruptores de baja y media tensión el promedio de desconexión es entre uno y dos ciclos.

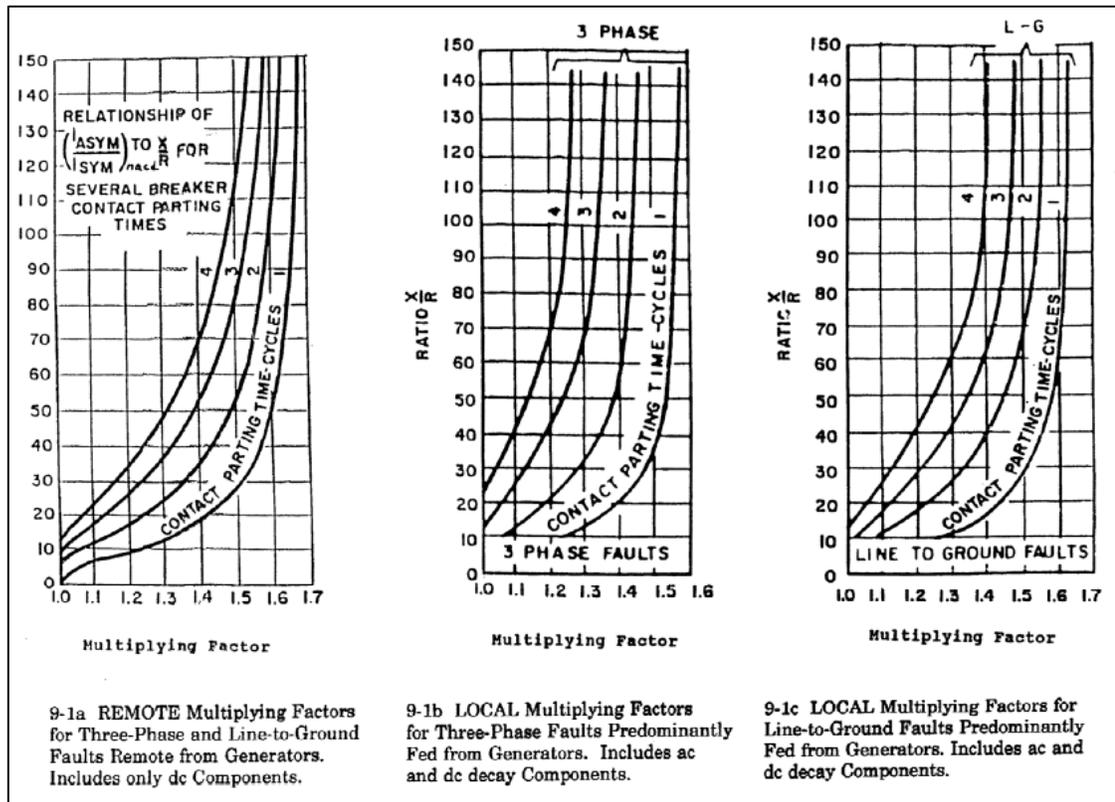


Figura 2.24. Factores según el tipo de generación
Fuente: ANSI/IEEE 551-2006

Luego de obtener los factores de multiplicación, estos son aplicados a la corriente simétrica y se puede obtener las corrientes asimétricas en cada uno de los estudios y puntos de interés.

Este método utiliza grandes aproximaciones en muchos casos, sin embargo, logra concretar mediante una bibliografía sólida, un método sencillo de aplicar con simplicidad y factores de asimetría muy específicos para cada punto.

En caso de no encontrarse algún valor de impedancia o de X/R de las máquinas presentes este método permite el uso de los cuadros con valores típicos de ANSI/IEEE 141-1993. (Ver Anexo 1)

CAPÍTULO 3

3. Recopilación de información

En este capítulo se presenta los valores de reactancia y resistencia equivalente por unidad de cada uno de los componentes eléctricos del sistema que son relevantes para el estudio de corrientes de cortocircuito según los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006. Toda la nomenclatura está explicada en el Anexo 3 de este escrito.

Uno de los primeros puntos para obtener un estudio de corrientes de cortocircuito se debe tener información de las cargas instaladas o por instalar en el sistema eléctrico. En este caso Laboratorios STEIN, entra a una remodelación y ampliación en donde muchos de sus actuales cargas de interés al estudio, serán removidas, situándose nuevos sistemas.

La empresa contará con un transformador marca RYMEL de 1500 kVA 34 500 V a 480 V conexión estrella-estrella, instalado el año pasado. Además de un generador marca Stamford con una potencia nominal de 2600 kVA, el cual alimentará un panel principal con transferencia automática mediante disyuntores. Este panel de distribución alimentará las demás cargas y paneles en la instalación.

Para completar el primer paso del procedimiento se solicitó el diagrama unifilar del sistema eléctrico a Energética quien tiene a cargo el diseño y la inspección eléctrica del proyecto. El diagrama unifilar cuenta con más de 25 paneles eléctricos, distribuidos en toda la planta, incluyendo las nuevas cargas.

Se coordinó una visita a la planta, en la cual se logró levantar un registro fotográfico, herramienta utilizada en la oficina de ingeniería, de las cargas actuales relevantes para el estudio por realizar, según los criterios ya explicados en el capítulo anterior.

Los sistemas encontrados en la planta son principalmente vapor, agua potable, tratamiento de aguas residuales, extracción de aire, aire acondicionado y sistema de protección contra incendios. De estos sistemas, las manejadoras de aire, las bombas

de agua potable y el sistema contra incendios están siendo reemplazados y se encuentran ya en el lugar, sin embargo, no existe aún la instalación eléctrica para alimentar estas cargas.

La base tomada para referenciar los datos por unidad es de 1500 kVA con un perfil de tensión de 34 500V, 480V y 208V. Esta base es tomada de la capacidad nominal y la relación de transformación del transformador principal. Además de la segunda variación de voltaje por los transformadores de baja tensión. Esta selección es bastante común en trabajos de transformación a sistema por unidad en Costa Rica.

Los motores como las bombas de las plantas de tratamiento de menor potencia a 37kW (50hp), fueron tomados en cuenta debido a que son alimentados del mismo panel que los compresores.

Para los motores presentes en la planta se utilizaron los valores recomendados por las normas ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993 tanto con reactancias como con valores X/R. Esto debido a que las reactancias subtransitorias de los equipos no se lograron obtener.

Para motores mayores a 37kW (50 hp) considerados como “medianos” se tomará un aporte como 4.8 veces la corriente nominal, lo cual es lo mismo que tomar una reactancia promedio de 16.7% por unidad según la base del motor y multiplicarla por el factor de la Tabla 1 para motores medianos. De ambas formas se llega a una reactancia de 20.83% según la base del motor. Este criterio aplica para el *chiller* (300hp o 225kW) y para los compresores 1 y 2 (70hp o 55kW). (Ver Tabla 3.5)

Para los demás motores (menores a 37kW) se tomará un aporte de 3.6 la corriente nominal, lo cual se alcanza al tomar una reactancia de 16.7% por unidad según la base del motor y multiplicarla por 1.67, factor tomado de la Tabla 3.1.

El más grande aporte de corriente de falla comúnmente por la empresa de suministro, en este caso fue solicitado el valor a la JASEC, en donde el departamento Proceso Planificar y Desarrollar la Red afirma que el aporte para una falla trifásica es de 1900 amperios y 1600 amperios para una falla fase a tierra. El valor X/R no fue

entregado por lo que se asume de 15 según otros proyectos realizados en la oficina de ingeniería. (Ver Tabla 3.6)

Los transformadores presentes, tanto el tipo pedestal, como los secos de baja tensión se tomaron con la impedancia registrada en el dato de placa o en la información del fabricante. Los valores de X/R son tomados de los valores típicos de la norma ANSI/IEEE 141-1993. (Ver Tabla 3.7)

En caso de los alimentadores fueron tomados los valores de la norma ANSI/IEEE 141-1993, y los valores de impedancia que presenta el fabricante Phelps Dodge de General Cable. En ninguno de los casos se encontró una diferencia mayor a un 2%. Se utilizó este fabricante ya que es uno de los principales proveedores de conductores eléctricos en el país. Las distancias son estimadas con las propuestas de canalizaciones del proyecto, siempre tomando valores críticos para una mayor seguridad del estudio. (Ver Tabla 3.8)

Aparte de las cargas dibujadas en el diagrama unifilar se agregó a los cálculos las dos bombas de agua potable encontradas con una potencia de 5 kVA, para poder comprobar los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 de omitir los motores menores a 37kW (50 hp).

Así mismo, se tomó el criterio de omitir el aporte de las cargas que posean un variador de frecuencia, en este caso las manejadoras del sistema de ventilación para los valores de corriente simétrica según las recomendaciones de la norma ANSI/IEEE 551-2006, debido al efecto que poseen los convertidores de frecuencia en los aportes de los motores. Para el panel principal (TP) y para el panel de extracción (TEXT) fue contemplado este aporte para poder evidenciar la importancia de los variadores de frecuencia en el sistema eléctrico en un estudio de corrientes de cortocircuito. En los cálculos realizados en el próximo capítulo se valora este criterio y se muestra evidencia numérica de la importancia de estos equipos en el sistema eléctrico.

Tabla 3.5. Valores de impedancia para aportes de falla
Elaboración: Propia.

Equipo	Modelo	Tensión (V)	Potencia (kVA)	Corriente (A)	X (%)	X/R	X (p.u.)	R (p.u.)
CHILL	-	480	300	361	20,830	15	1,042	0,069
COMP1	-	480	70	84	20,830	8	4,464	0,558
COMP2	-	480	70	84	20,830	8	4,464	0,558
COMP3	-	480	30	36	27,780	5	13,890	2,778
BPT1	MHB-452-11	480	3	4	27,780	5	138,900	27,780
BPT2	MHB-452-11	480	3	4	27,780	5	138,900	27,780
BPOT1	554296	208	5	14	27,780	5	83,340	16,668
BPOT2	934295	208	5	14	27,780	5	83,340	16,668
MAN1	ECS21846	480	40	48	27,780	5	10,418	2,084
MAN2	ECS21847	480	30	36	27,780	5	13,890	2,778
MAN3	ECS21844	480	30	36	27,780	5	13,890	2,778
MAN4	ECS21945	480	15	18	27,780	5	27,780	5,556
MAN5	ECS21848	480	3	4	27,780	5	138,900	27,780
MAN6	ECS21845	480	25	30	27,780	5	16,668	3,334
MAN7	ECS21849	480	7	8	27,780	5	59,529	11,906
GEN	600G6D	480	2500	3007	19	35	0,114	0,003257

Tabla 3.6. Valores de impedancia de fuentes externas
Elaboración: Propia.

Red	Tensión (V)	Corriente trifásica(A)	Z (Ω)	X/R	X (p.u.)	R (p.u.)
JASEC	34500	1900	10,483	15	0,013182	0,000879

Tabla 3.7. Valores de impedancia de los transformadores
Elaboración: Propia.

Equipo	Modelo	Z (%)	X/R	X (%)	R (%)	Z (p.u.)	X (p.u.)	R (p.u.)
TX-1	2015071026	5,750	7,000	5,692	0,813	0,058	0,057	0,008
TX-OF	EX150T3HCU	3,700	3,000	3,510	1,170	0,370	0,351	0,117
TX-BO	EX45T3HCU	4,400	3,000	4,174	1,391	1,467	1,391	0,464
TX-IT	EX45T3HCU	4,400	3,000	4,174	1,391	1,467	1,391	0,464
TX-CM	EX30T3HCU	4,000	3,000	3,795	1,265	2,000	1,897	0,632
TX-PROD	EX112T3HCU	4,100	3,000	3,890	1,297	0,547	0,519	0,173

Tabla 3.8. Valores de impedancia de los alimentadores
Elaboración: Propia.

Alimentador	Calibre	Conductores	Distancia (m)	Z (Ω/m)	X (Ω/m)	R (Ω/m)	Z (p.u.)	X (p.u.)	R (p.u.)
FDR-TX-1	1/0	1	10,000	0,0007	0,0001	0,0007	0,0001	0,0000	0,0001
FDR-ATSN	350	7	20,000	0,0002	0,0001	0,0002	0,0045	0,0023	0,0039
FDR-ATSE	350	7	20,000	0,0002	0,0001	0,0002	0,0045	0,0023	0,0039
FDR-CHILL	2/0	2	20,000	0,0006	0,0001	0,0005	0,0367	0,0088	0,0357
FDR-TXOF	3/0	1	150,000	0,0005	0,0001	0,0004	0,4450	0,1282	0,4261
FDR-TAA2	2/0	4	2,000	0,0006	0,0001	0,0005	0,0018	0,0004	0,0018
FDR-TBE4	250	1	20,000	0,0003	0,0001	0,0003	0,0416	0,0164	0,0383
FDR-TXBO	2	1	30,000	0,0011	0,0002	0,0011	0,2160	0,0295	0,2140
FDR-TBE2	1/0	1	2,000	0,0007	0,0001	0,0007	0,0092	0,0018	0,0090
FDR-TXIT	4	1	40,000	0,0018	0,0002	0,0017	0,4565	0,0427	0,4545
FDR-ATSUPS	3/0	1	2,000	0,0005	0,0001	0,0004	0,0059	0,0017	0,0057
FDR-TUPS	2/0	1	4,000	0,0006	0,0001	0,0005	0,0147	0,0035	0,0143
FDR-BAC	3/0	2	10,000	0,0005	0,0001	0,0004	0,0148	0,0043	0,0142
FDR-TXCM	6	1	100,000	0,0028	0,0002	0,0028	1,8127	0,1132	1,8091
FDR-TCE	2	1	2,000	0,0011	0,0002	0,0011	0,0767	0,0105	0,0760
FDR-TCE-1	4	1	10,000	0,0018	0,0002	0,0017	0,6078	0,0569	0,6051

FDR-TCOM	3/0	2	40,000	0,0005	0,0001	0,0004	0,0593	0,0171	0,0568
FDR-COMP1	1/0	1	10,000	0,0007	0,0001	0,0007	0,0458	0,0092	0,0449
FDR-COMP2	1/0	1	10,000	0,0007	0,0001	0,0007	0,0458	0,0092	0,0449
FDR-COMP3	4	1	10,000	0,0018	0,0002	0,0017	0,1141	0,0107	0,1136
FDR-BTP1	2	1	20,000	0,0011	0,0002	0,0011	0,1440	0,0197	0,1427
FDR-BTP2	2	1	20,000	0,0011	0,0002	0,0011	0,1440	0,0197	0,1427
FDR-TAP4	4/0	3	25,000	0,0004	0,0001	0,0003	0,0201	0,0069	0,0189
FDR-TEXT	3/0	2	30,000	0,0005	0,0001	0,0004	0,0445	0,0128	0,0426
FDR-MAN1	4	1	10,000	0,0018	0,0002	0,0017	0,1141	0,0107	0,1136
FDR-MAN2	4	1	10,000	0,0018	0,0002	0,0017	0,1141	0,0107	0,1136
FDR-MAN3	4	1	10,000	0,0018	0,0002	0,0017	0,1141	0,0107	0,1136
FDR-MAN4	10	1	5,000	0,0038	0,0037	0,0009	0,1251	0,1213	0,0303
FDR-MAN5	12	1	5,000	0,0058	0,0056	0,0014	0,1875	0,1816	0,0470
FDR-MAN6	4	1	5,000	0,0018	0,0002	0,0017	0,0571	0,0053	0,0568
FDR-MAN7	12	1	5,000	0,0058	0,0056	0,0014	0,1875	0,1816	0,0470
FDR-TXPR	3/0	1	50,000	0,0005	0,0001	0,0004	0,1483	0,0427	0,1420
FDR-TPROD	4/0	2	2,000	0,0004	0,0001	0,0003	0,0024	0,0008	0,0023

CAPÍTULO 4

4. Resultados

Este capítulo contiene los resultados de los cálculos realizados con los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 en diferentes buses con diversos aportes, por tanto, para observar de forma numérica en un caso real la importancia el procedimiento recomendado por la norma en mención.

Después de realizar los cálculos en distintos puntos del diagrama se alcanzó una serie de corrientes de fallas asimétricas, las cuales serán comparadas con los resultados del *software* Power Tools de SKM con el módulo DAPPER comprobando la confiabilidad de los resultados simulados con los calculados según los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006. Los cálculos de los puntos evaluados en forma manual están debidamente explicados en la minuta de cálculo adjunta en el Anexo 2.

Para estos cálculos se tomaron tres escenarios distintos. El primero, cuenta con todas las cargas conectadas y funcionando, donde el sistema eléctrico siendo alimentado totalmente por la empresa de suministro. El segundo caso son todas las cargas conectadas alimentadas desde la planta de respaldo. El tercer y último escenario es igual al primero, pero en este caso se omite los variadores de frecuencia, por lo tanto se debe tomar en cuenta el aporte de las unidades manejadoras de aire.

En todos los escenarios se buscó la corriente asimétrica para un evento de cortocircuito trifásico a $\frac{1}{2}$ ciclo; esta selección se debe a que según los criterios de la norma ANSI/IEEE 141-1993 y ANSI/IEEE 551-2006 se debe comparar la capacidad interruptiva con la corriente asimétrica más alta entre 0 y el primer ciclo. La selección de un cortocircuito trifásico se debe a que es el caso donde se presenta la corriente de falla más alta debido a que los aportes por fase de cada sistema son balanceados. (IEEE, 2006)

4.1 Corriente de falla en TP

El tablero principal del sistema (TP) es el encargado de alimentar los demás tableros del sistema, por lo tanto, toda la demanda de potencia será distribuida en este tablero; por esta razón es el tablero más importante para todo el sistema eléctrico y este recibe de forma más directa los aportes más importantes, suele ser uno de los puntos de mayor interés en un estudio de corrientes de cortocircuito.

4.1.1 Corriente de falla con aporte de empresa de suministro

Para el panel TP, el aporte de la empresa de suministro estará en paralelo con el aporte proveniente de las cargas conectadas al tablero TCOM, el *chiller*, las bombas de agua potable y el sistema de extracción proveniente de TEXT y TAP4. Por lo tanto, el inverso de las resistencias y reactancias deberán ser sumados, a excepción del sistema de ventilación ya que las cargas poseen variadores de frecuencia y según los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 estos aportes son omitidos.

Tabla 4.9. Reactancia y resistencia equivalente en TP con empresa de suministro Fuente Propia.

Variable	X (p.u.)	1/X (p.u.)
X_{TP}	0,065	15,322
R_{TP}	0,011	89,622

Mediante la reactancia y resistencia equivalente mostrada en la tabla anterior, es posible obtener la impedancia equivalente y con esto la corriente compleja I_{sim} . El argumento de esta corriente compleja es multiplicado por la base se obtiene una corriente de cortocircuito trifásico simétrica de 27 248 A.

Mediante el valor de X/R y la ecuación 11 del Capítulo 2, se puede obtener el factor de asimetría (FA), y así obtener la corriente de falla asimétrica en el tablero TP.

Tabla 4.10. Factores y corrientes de falla en TP con empresa de suministro
Fuente: Propia.

X/R	5,849
Z_{eq}	0,011 + j0,065 p.u.
$ Z_{eq} $	0,066 p.u.
I_{SIM}	27 248,723 A
FA	1,297
I_{ASIM}	35 351,567 A

Para cuantificar de dónde viene la corriente de cortocircuito se propone calcular los aportes de cada una de las fuentes; teniendo así una mejor idea de dónde proviene principalmente la corriente de falla. Se puede observar que la empresa de suministro es quien más aporta con 24 538 A, mientras que en el caso de las bombas de agua potable conectadas en TCM1, solo aportan 39 A. Con esto se puede concluir que efectivamente los motores menores a 50HP que no estén en un grupo grande pueden ser omitidos de los estudios de corrientes de cortocircuito, según lo indica la norma ANSI/IEEE 551-2006.

Además, se observa en la última fila de la Tabla 3 que, si se tomara en cuenta la corriente de falla aportada por las manejadoras de aire alimentadas en TEXT la corriente de falla simétrica en TP aumentaría en 628 A.

Tabla 4.11. Aportes de las distintas cargas a TP con empresa de suministro
Fuente: Propia.

Aporte	R (p.u.)	X (p.u.)	$I_{SC\ SYM}$ (A)
TAP4	0,636	2,801	628,099
TCOM	0,325	1,892	940,097
TCM1	11,480	43,839	39,813
TCH	0,105	1,050	1709,345
TUT	0,013	0,072	24 538,574

4.1.2 Corriente de falla con aporte del generador

Para el caso de la generación de energía eléctrica de forma local, la TS estará en modo emergencia y con esto aísla del sistema de suministro de energía de JASEC el sistema de la planta. En este caso el aporte de empresa de suministro es 0 y el

aporte del generador debe ser considerado. Se utiliza el mismo principio del caso anterior, simplemente se cambia el aporte de empresa de suministro por el generador.

Tabla 4.12. Reactancia y resistencia equivalente en TP con GEN
Fuente Propia.

Variable	X (p.u.)	1/X (p.u.)
X_{TP}	0,099	10,106
R_{TP}	0,007	151,818

Al realizar la reducción del sistema, se obtiene una reactancia equivalente y una resistencia equivalente. Las cuales forman una impedancia compleja, para así obtener la corriente simétrica.

Tabla 4.13. Factores y corrientes de falla en TP con GEN
Fuente: Propia.

X/R	15,023
Z_{eq}	$0,007 + j0,099$ p.u.
$ Z_{eq} $	0,099 p.u.
I_{SIM}	18 192,530 A
FA	1,522
I_{ASIM}	27 688,615 A

Se observa que en este caso la corriente de falla por cortocircuito asimétrico a medio ciclo es menor que el obtenido con el aporte de la empresa de suministro, esto se debe a que la empresa de suministro puede aportar mayor potencia, y por ende más corriente de falla.

Tabla 4.14. Aportes de las distintas cargas a TP con GEN
Fuente: Propia.

Aporte	1/R	1/X	Isc
TAP4	0,636	2,801	628,099
TCOM	0,325	1,892	940,097
TCM1	11,480	43,839	39,813
TCH	0,105	1,050	1709,345
GEN	0,007	0,116	15 490,340

4.2 Corriente de falla en TCOM

Para el tablero de los compresores TCOM, se debe realizar una reducción, (la cual es explicada en el Anexo 4) para tomar la reactancia y la resistencia que forman la impedancia equivalente, de forma similar al caso anterior en TP, sin embargo, esta vez los aportes en paralelo en TP se ven disminuidos por el alimentador FDR-TCOM, este tablero recibe los aportes de los compresores y bombas de la planta de tratamiento de forma más directa, siendo disminuidos solo por su respectivo alimentador.

Tabla 4.15. Reactancia y resistencia equivalente en TCOM
Fuente Propia.

Variable	X (p.u.)	1/X (p.u.)
X_{TCOM}	0,081	12,342
R_{TCOM}	0,054	18,361

En este caso tampoco fue tomado en cuenta el aporte por parte de las manejadoras de aire, debido a que estas poseen variadores de frecuencia sin capacidad regenerativa o un *bypass*. Se puede observar que la corriente en TCOM es menor que en TP, debido a que los aportes más considerables (*chiller* y empresa de suministro) se ven disminuidos por la impedancia del alimentador FDR-TCOM.

El efecto con un *bypass* para los variadores de frecuencia, son típicamente utilizados cuando la carga es crítica y un posible fallo o tareas de mantenimiento en el VFD pueden ocasionar paros en el motor. Para estos casos se realiza una conexión de un contactor en paralelo con el VFD, para asegurar que en caso de detener el VFD, el motor sea capaz de funcionar a voltaje y velocidad nominal.

Tabla 4.16. Factores y corrientes de falla en TCOM
Fuente: Propia.

X/R	1,488
Z_{eq}	0,054 + j0,081 p.u.
$ Z_{eq} $	0,098 p.u.
I_{SIM}	18 480,537 A
FA	1,015
I_{ASIM}	18 749,320 A

En la siguiente tabla, se observa que el aporte de las demás fuentes de corriente de cortocircuito en TCOM es de 16 577 A, mientras que el aporte de las fuentes conectadas directamente en tablero es de 953 A. Por lo tanto, es evidente la importancia de los alimentadores y la conexión del sistema eléctrico.

Tabla 4.17. Aportes de las distintas cargas a TCOM
Fuente: Propia.

Aporte	R (p.u.)	X (p.u.)	$I_{sc\ sym}$ (A)
TCOM _{EQ}	0,268	1,874	952,859
T _{AA}	0,068	0,085	16576,676

4.3 Corriente de falla en TEXT

4.3.1 Sin aporte de manejadoras de aire

Para el tablero TEXT se estudió la magnitud de la corriente de falla, primero sin tomar en cuenta la carga conectada a este tablero debido a que todas las unidades manejadoras de aire poseen variadores de frecuencia no regenerativos. Para este caso las fuentes de corriente de falla forman un aporte equivalente el cual es disminuido por los alimentadores FDR-TAP4 y FDR-TEXT.

Tabla 4.18. Reactancia y resistencia equivalente en TEXT
Fuente Propia.

Variable	X (p.u.)	1/X (p.u.)
X _{TEXT}	0,085	11,761
R _{TEXT}	0,073	15,432

Se denota que la reactancia y la resistencia equivalente van a generar un factor X/R cercano a la unidad, con esto en cuenta se puede deducir que, al igual en TP, el factor de asimetría será prácticamente 1, esto debido a que el valor X/R en la parte exponencial de la ecuación 11 es un valor muy bajo, despreciables dentro de la raíz.

Tabla 4.19. Factores y corrientes de falla en TEXT
Fuente: Propia.

X/R	1,164
Z_{eq}	0,073 + j0,085 p.u.
$ Z_{eq} $	0,112 p.u.
I_{SIM}	16 096,886 A
FA	1,005
I_{ASIM}	16 169,627 A

Como se puede observar las fuentes que aportan a la corriente de falla calculada son afectadas por los alimentadores mencionados, debido a que aumenta la impedancia equivalente, disminuyendo la corriente de falla; y todo el aporte viene de fuentes externas al tablero aguas arriba de la protección principal.

4.3.2 Con aporte de manejadoras de aire

En este caso, para el mismo tablero se realizó el cálculo de la corriente de falla por cortocircuito, en un caso supuesto que las manejadoras no posean un variador de frecuencia y deba ser tomado en cuenta el aporte de las manejadoras de aire conectadas a este tablero.

Tabla 4.20. Reactancia y resistencia equivalente en TEXT con manejadoras
Fuente Propia.

Variable	X (p.u.)	1/X (p.u.)
X_{TEXT}	0,083	12,121
R_{TEXT}	0,065	15,432

Al tomar en cuenta el aporte de las unidades manejadoras de aire la impedancia equivalente es más baja que sin el aporte. Por ley de Ohm se traduce a una corriente de falla simétrica a medio ciclo mucho más alta. Más el valor X/R seguirá siendo cercano a la unidad, por lo tanto, el factor de asimetría será prácticamente 1.

Tabla 4.21. Factores y corrientes de falla en TEXT con manejadoras
Fuente: Propia.

X/R	1,273
Z_{eq}	0,065 + j0,083 p.u.
$ Z_{eq} $	0,105 p.u.
I_{SIM}	17 198,385 A
FA	1,007
I_{ASIM}	17 321,615 A

En el caso, anterior se tenía como evidencia que 16 097 A son aportados por las fuentes externas del panel eléctrico, por lo que cerca de 635 A son aportados por las manejadoras. En este punto, queda más claro la importancia de considerar los variadores de frecuencia en los estudios de corrientes de cortocircuito.

Tabla 4.22. Aportes de las distintas cargas a TEXT con manejadoras
Fuente: Propia.

Aporte	R (p.u.)	X (p.u.)	$I_{sc\ sym}$ (A)
TCOM _{EQ}	0,073	0,085	16 096,886
T _{AA}	0,575	2,781	635,250

4.4 Corriente de falla en el alimentador del banco de capacitores

Para contemplar el efecto de los bancos de capacitores en los conductores, se realizó el cálculo en el alimentador FDR-BAC y se tomó en cuenta el aporte de la descarga del banco de capacitores a instalar en Laboratorios Stein, el cual será de una potencia de 500kVAr. Para el aporte de este banco de capacitores se utilizó la ecuación 5.

Los aportes valorados fueron el aporte de la empresa de suministro, el *chiller*, sistema de agua potable, compresores y bombas de la planta de tratamiento. Estos estarán en paralelo y harán un aporte equivalente, el cual se verá disminuido por la reactancia y resistencia del alimentador FDR-BAC.

Tabla 4.23. Reactancia y resistencia equivalente en BAC
Fuente Propia.

Variable	X (p.u.)	1/X (p.u.)
X_{BAC}	0,070	12,121
R_{BAC}	0,065	15,432

Con esta resistencia y reactancia se obtiene el aporte equivalente y la corriente de cortocircuito simétrica en punto de estudio agregando el aporte de la descarga del banco de capacitores. Se estima toda la potencia del banco conectada para obtener el peor caso. Por lo tanto, es necesario encontrar el valor de capacitancia del banco de capacitores y la inductancia del alimentador. Estos valores son:

Tabla 4.24. Variables para aporte del banco de capacitores.
Fuente Propia.

Capacitancia (F)	1,740E-06
Inductancia (H)	5,756E-06

Al considerar estos valores a la ecuación 5, se obtiene un aporte de 215 A, por lo que se obtiene una corriente de falla total de 24 590 A. Se observa el considerable aporte del banco de capacitores, lo que demuestra la importancia de valorar este aporte en al estudiar la capacidad de soportar eventos de cortocircuito de los alimentadores de los bancos de capacitores o filtros de armónicos.

Tabla 4.25. Factores y corrientes de falla en FDR-BAC
Fuente: Propia.

X/R	2,742
Z_{eq}	0,025 + j0,070 p.u.
$ Z_{eq} $	0,074 p.u.
I_{BAC}	215,505 A
I_{SIM}	24 590,723 A
FA	1,096
I_{ASIM}	26 962,561 A

CAPÍTULO 5

5. Simulación y comparación de resultados

Este capítulo muestra la comparación de los resultados de los cálculos manuales con los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 y la simulación con el *software* Power Tools de SKM con los criterios utilizados por la oficina de ingeniería.

Uno de los objetivos específicos de este proyecto es realizar una comparación de los cálculos del *software* Power Tools de SKM con el módulo DAPPER con los cálculos teóricos realizados con los criterios ANSI/IEEE 551-2006 para comprobar que los métodos utilizados por Energética brindan resultados confiables. Para esto se comprobarán los resultados de la simulación con los cálculos realizados y con esto poder obtener porcentajes de error y la importancia y posibles efectos de estas variaciones.

Se realizó la simulación en dicho *software* para esto es necesario ingresar la información de las configuraciones de los alimentadores, incluyendo calibre, tipo de canalización, número de conductores en paralelo y distancia; también la información de las cargas ya sean aportantes o no a la corriente de falla y los transformadores presentes y su conexión en el sistema. La simulación incluye más de 60 puntos de medición en donde se emiten valores de corriente simétrica a medio ciclo para fallas trifásicas y monofásicas a tierra, corriente asimétrica a medio ciclo para fallas trifásicas y valores X/R. Además determina la corriente de falla por cortocircuito trifásico que pasa por los alimentadores de todo el sistema.

El *software* utiliza el método Comprehensive, en el cual se crea una matriz de admitancias para fallas balanceadas. Esta es una matriz cuadrada del tamaño del número de buses existentes en el diagrama unifilar.

La mejor forma de entender una admitancia es como la capacidad que posee un cuerpo para permitir el paso de la corriente. Por lo tanto, se considera siempre como el inverso multiplicativo de la impedancia. Una matriz de admitancias es una configuración numérica en donde se relaciona estas características de cada bus

respecto a sus conexiones directas a otros buses. Esta admitancia cuadrada suele ser del número de buses en la simulación, en este caso se habla de una matriz mayor a 60x60.

Al obtener la matriz ordenada y simétrica en la diagonal, se procede a realizar una inversión de la matriz y con esto obtener las impedancias complejas equivalentes en cada bus. Obteniendo la impedancia compleja se somete a la ley de Ohm y obteniendo la corriente de falla.

Este método tiene como diferencia la variación en el cálculo de la corriente simétrica, debido a que el cálculo manual, con los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 permite la manipulación de la resistencia y reactancia por aparte, mientras que la manipulación de los números complejos variará los resultados de la impedancia equivalente, por ende, la corriente simétrica y el valor X/R. (SKM, 2006)

El método Comprehensive, utiliza el factor X/R para obtener un factor de asimetría y con esto obtener la corriente asimétrica. Para esto utiliza la misma ecuación 11. Con esto presente, si existe alguna variación en el factor de asimetría será por el factor X/R y no por el método de cálculo. (SKM, 2006)

La simulación fue realizada donde se tomaron los mismos aportes del sistema, como las cargas conectadas a TCOM, el aporte de la empresa de suministro, el aporte de TCM1, el aporte del *chiller* y el aporte de la empresa de suministro. Además, se tomaron las cargas de TEXT, pero fue simulado con sus respectivos variadores de frecuencia, según lo explicado en la sección de inversores y rectificadores en el Capítulo 2, para observar el comportamiento del *software*. A su vez se tomaron los alimentadores con las configuraciones del sistema planteado. (Anexo 1)

En la simulación se realizaron tres escenarios diferentes para realizar las comparaciones debidas con el cálculo manual, el primer escenario fue con el aporte de la empresa de suministro, el cual era de 1900A, trifásicos para una tensión de alimentación de 34.5 kV, mientras la planta de respaldo está desconectada y los variadores de frecuencia de las cargas de TEXT limitan el aporte de las manejadoras.

Este escenario fue elegido, debido a que es la situación típica de trabajo para el sistema eléctrico.

El segundo escenario realizado es con el aporte de la planta de respaldo y no con el aporte de la empresa de suministro aislado. Esta situación se realiza cuando la transferencia automática está conectada del lado de emergencia, principalmente cuando suceda algún corte eléctrico. Este escenario es contemplado en los cálculos, para comprobar el comportamiento de la corriente de falla sin el aporte de la empresa de suministro siendo típicamente el mayor aporte de la corriente de falla.

El tercer escenario realizado es al tomar el aporte de la empresa de suministro, mantener aislada la planta de respaldo, sin embargo, en este caso se toma los variadores de frecuencia con un *bypass*, esto para contemplar el cambio en las corrientes de falla y comparar con los resultados realizados en este escenario. Este escenario es elegido para obtener una comprobación numérica de la importancia de los variadores de frecuencia de las cargas en el estudio de corrientes de cortocircuito.

Para todos los resultados se calculó el porcentaje de error, promedios de estos porcentajes, desviación estándar de los errores, y el coeficiente de variación, esto para tener, desde el punto de estadístico, un modelo más completo de los resultados con el análisis apropiado.

El promedio de los porcentajes de error permitirá dar una idea general de la diferencia entre los cálculos realizados con el método ANSI/IEEE 551-2006 y el cálculo con los criterios de Energética Soluciones y Consultoría. Además, la desviación estándar permitirá conocer la variabilidad entre los datos tomados y el promedio calculado.

Luego de realizar la simulación en el *software* SKM Power Tools, se observa que las corrientes de cortocircuito varían alrededor de un 6,48%, con una desviación estándar del 4%. Sin embargo, esta variación presenta varios puntos importantes por aclarar. (Ver Anexo 3)

El *software* SKM Power Tools, realiza un cálculo de la corriente simétrica mediante el uso de admitancias complejas, esto quiere decir que realiza aritmética de números complejos y el valor de la impedancia equivalente es mayor que el calculado manipulando las resistencias y las reactancias por aparte. Lo anterior es aclarado en el Capítulo 3 y 9 de la norma ANSI/IEEE 551-2006, la cual permite el uso de las variables eléctricas por aparte, asegurando que el resultado será más conservador. Esta diferencia se debe principalmente a la manipulación de los cálculos de inversos multiplicativos de los números complejos, ya que al tratar las variables por aparte, se debe solamente elevar cada número a un exponente igual a -1. Sin embargo, en el caso de los números complejos, el inverso multiplicativo se calcula de con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{A + jB} = \frac{A}{A^2 + B^2} + \frac{-B}{A^2 + B^2}j \quad (12)$$

Como se puede observar las impedancias al ser calculadas de forma completa serán mayores y tendrán diferente relación, alterando el valor X/R.

Se demuestra que los resultados de la norma siempre están entre 1kA y 2kA más abajo que los resultados con el *software*. Esto se debe principalmente a que la norma recomienda multiplicar las impedancias de las fuentes locales por los factores de la Tabla 1, mientras que las impedancias utilizadas para la simulación son menores para obtener valores más conservadores.

En el caso del banco de capacitores (BAC) la corriente calculada con la norma es mayor que en el caso del *software*, por lo que se concluye que el *software* no contempla la descarga de los capacitores para el cálculo de corrientes de cortocircuito. Lo expuesto anteriormente se debe a que el banco de capacitores realiza su descarga en menos de 1/4 de ciclo y el *software* no toma esta descarga en cuenta como es común en herramientas de simulación. (SKM, 2006)

Tabla 5.26. Comparación de corrientes asimétricas a ½ ciclo
Fuente: Propia.

Punto a estudiar	Corriente asimétrica 1/2 ciclo		
	ANSI/IEEE 551-2006	SKM Power Tools	% Error
TP con aporte de UT	35 351,567	36 946,18	4,511%
TP con aporte de GEN	27 668,615	28 710,96	3,767%
TP con aporte UT+TEXT	36 124,901	38 184,83	5,702%
TCOM	18 749,320	20 212,82	7,806%
TAP4	24 705,526	25 055,62	1,417%
TEXT sin VDF	17 321,615	19 894,32	14,853%
BAC	26 962,561	24 988,09	7,323%

Tabla 5.27. Cálculo de desviación estándar de corrientes asimétricas a ½ ciclo
Fuente: Propia.

Corriente asimétrica a 1/2 ciclo (Prom=6,48%)	% Error	(X-Prom)	(X-Prom)^2
	4,51%	-1,972	0,0004
	3,77%	-2,725	0,0007
	5,70%	-0,780	0,0001
	7,81%	1,323	0,0002
	1,42%	-5,076	0,0026
	14,85%	8,370	0,0070
	7,32%	0,840	0,0001
Desviación estándar			0,0428

La simulación arroja valores de X/R para cada uno de los puntos, en donde los porcentajes de error rondan el 25.83% con una desviación del 18.08%. Este porcentaje, a primera vista puede considerarse alto, sin embargo, este factor busca obtener el factor de asimetría, en la ecuación 11. Al estar en la expresión exponencial de la ecuación dentro de una raíz, este error no es considerable en el cálculo de los factores de asimetría.

Tabla 5.28. Comparación de factores X/R
Fuente: Propia.

Punto a estudiar	Valor X/R		
	ANSI/IEEE 551-2006	SKM Power Tools	% Error
TP con aporte de UT	5,849	6,61	13,00%
TP con aporte de GEN	15,023	13,71	8,74%
TP con aporte UT+TEXT	5,816	6,5	11,75%
TCOM	1,488	2,12	42,50%
TAP4	2,450	2,78	13,47%
TEXT sin VDF	1,273	1,94	52,37%
BAC	2,742	3,81	38,96%

Tabla 5.29. Cálculo de desviación estándar para factores X/R
Fuente Propia.

Factor X/R (Prom= 25.83%)	% Error	(X-Prom)	(X-Prom)^2
	0.016	-12,82	0,016
	0.029	-17,09	0,029
	0.020	-0,1407	0,020
	0.028	0,1667	0,028
	0.015	0,1236	0,015
	0.070	0,2654	0,070
	0.017	0,1313	0,017
Desviación estándar			0,181

Los porcentajes de error presentado para este cálculo intermedio son relativamente altos, esto se justifica debido al método utilizado para el cálculo de la impedancia equivalente.

Como se mencionó anteriormente, la forma de manipular las reactancias y resistencia para obtener una impedancia equivalente es distinto entre los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 y el método Comprehensive, debido a que la impedancia calculada por el *software*, es manipulada como números complejos, mientras que la impedancia equivalente calculada con el método de la norma es manipulada de forma separada, variando los valores de reactancia y resistencia, y por consiguiente el valor X/R.

La norma ANSI/IEEE 551-2006 en el Capítulo 9 realiza una serie de ejercicios y comparaciones de los resultados de este método con otros de normas similares, donde en el factor X/R , contrastan que el valor calculado mediante una manipulación de números complejos será distinto al valor calculado manipulando la resistencia y la reactancia por aparte (ver ecuación 12). Estas comparaciones de los ejemplos de la norma tienen variaciones de hasta un 25%. (IEEE, 2006)

Además, los valores de impedancia de los motores utilizado en la simulación del sistema, como las impedancias seleccionadas desde una librería específica según los criterios de la oficina de ingeniería, son distintos. Los valores utilizados para la simulación nacen de distintas investigaciones realizados por ingenieros de Energética y son los utilizados para las simulaciones, obteniendo valores conservadores. Los valores son confidenciales y no pueden ser divulgados públicamente, mientras que los valores utilizados para el método manual son los recomendados a utilizar por la norma ANSI/IEEE 551-2006 ubicados en el Anexo 4A en la norma ANSI/IEEE 141-1993.

Las diferencias de los valores rondan el 10% en donde en la mayoría de los casos las impedancias utilizadas en las librerías de la oficina de ingeniería son menores, esto permite brindar un valor más conservador en la corriente simétrica y por lo tanto en la asimétrica.

El valor X/R como es mencionado en el Capítulo 2, la función principal es poder calcular el factor de asimetría. La ecuación 11, como se puede observar el factor X/R forma parte de la parte exponencial, que según el comportamiento de esta ecuación debe tener una gran diferencia del factor X/R para obtener un cambio importante en el factor de asimetría. Por ejemplo, para una diferencia entre 0.1 y 2.7 de factor X/R (260% de diferencia) existe una diferencia de apenas 10% en el factor de asimetría calculado en los dos puntos. (Ver Figura 5.25)

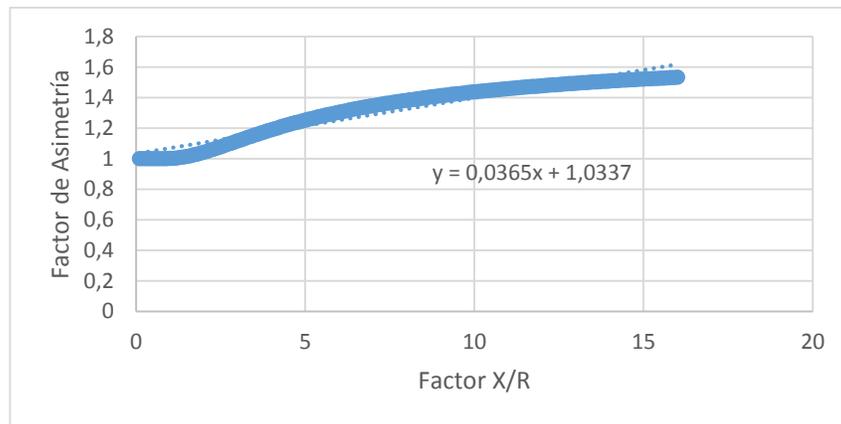


Figura 5.25. Comportamiento de ecuación 11
Fuente Propia.

Al analizar estos puntos se puede justificar los porcentajes de error altos al comparar los valores X/R y además con el gráfico anterior, se observa que se requiere cambios muy importantes en este factor para alterar el factor de asimetría, y por lo tanto la corriente asimétrica. Esto permite justificar las diferencias de cálculos y le quita peso a la diferencia por ser un paso intermedio.

El tercer valor que fue comparado es el factor de asimetría, que según lo explicado anteriormente, no sufre cambios importantes debido a que los dos métodos utilizan la misma ecuación. El porcentaje de error ronda el 3,21% para los resultados comparados. La desviación estándar de estos datos tomados es de 3.84%.

Tabla 5.30. Comparación de factores de asimetría
Fuente: Propia.

Punto a estudiar	Factor de asimetría		
	ANSI/IEEE 551-2006	SKM Power Tools	% Error
TP con aporte de UT	1,297	1,332	2,64%
TP con aporte de GEN	1,522	1,505	1,12%
TP con aporte UT+TEXT	1,296	1,327	2,40%
TCOM	1,015	1,050	3,53%
TAP4	1,074	1,099	2,35%
TEXT sin VDF	1,007	1,038	3,11%
BAC	1,096	1,177	7,31%

Tabla 5.31. Cálculo de desviación estándar para factores de asimetría
Factores: Propia.

	% Error	(X-Prom)	(X-Prom) ²
Factor de asimetría (Prom= 3,21%)	2,64%	-0,57%	3,278 x10 ⁻⁰⁵
	1,12%	1,12%	1,259 x10 ⁻⁰⁴
	2,40%	2,40%	5,779 x10 ⁻⁰⁴
	3,53%	3,53%	1,246 x10 ⁻⁰³
	2,35%	2,35%	5,502 x10 ⁻⁰⁴
	3,11%	3,11%	9,663x10 ⁻⁰⁴
	7,31%	7,31%	5,346x10 ⁻⁰³
Desviación estándar			3,839 x10 ⁻⁰²

Comparando los resultados del método utilizado por el *software* y los criterios de simulación de la oficina de ingeniería son los apropiados, ya que los valores obtenidos de ambas maneras no varían la selección de las protecciones y alimentadores.

El cálculo manual con los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 permite, con sus simplificaciones y recomendaciones de cálculo obtener valores de corrientes de cortocircuito, de forma rápida con métodos sencillos de cálculo. Además, de contemplar distintos aportes y comportamientos de distintos equipos presentes en sistemas eléctricos, por tanto, se considera una herramienta muy acertada y confiable para el cálculo de corrientes de cortocircuito.

El método del *software* permite obtener valores, más conservadores que el método de la norma, sin embargo, siguen siendo valores muy confiables para la selección de protecciones y alimentadores o la verificación de capacidades interruptivas.

Los porcentajes de error de las corrientes asimétricas permiten concluir que los cálculos y por lo tanto los valores son confiables, por lo que tomando cualquier valor entre los dos métodos se obtendrá la misma capacidad interruptiva para las protecciones.

A pesar de esto, se toma los valores que fueron calculados con el *software* debido a que son levemente más altos y el objetivo de los cálculos manuales era comprobar

la confiabilidad de los criterios utilizados por la oficina de ingeniería para los estudios de corriente de cortocircuito. Además, es común en este tipo de comparaciones tomar los valores más críticos para una selección más segura de los equipos.

CAPÍTULO 6

6. Selección de protecciones y alimentadores

Este capítulo contiene la selección de protecciones y la verificación de los alimentadores propuestos, estos deben ser capaces de soportar las corrientes de fallas que fueron calculadas mediante el cálculo del *software* Power Tools de SKM con los criterios de la oficina de ingeniería, según lo indicado en el capítulo anterior.

Tabla 6.32. Resumen de capacidades interruptivas para cada bus
Fuente Propia.

Bus	Corriente asimétrica 1/2 ciclo (kA)	Capacidad interruptiva (kA)
ATS	37	65
TP	37	65
TAA2	6	10
TCO	4	10
TSA	4	10
TAB	4	10
TFG	4	10
TEA	4	10
TEA2	3	10
TBE2	7	10
TBE22	2	10
TBF	2	10
BYPASS	2	25
TUPS	1	10
TIT1	1	10
TIT2	1	10
TIT3	1	10
TCE	2	10
TCE1	2	10
TCOM	20	35
TIL	17	18
TIL2	17	18
TAP4	25	35
TPROD	6	10
TEXT	17	18
TBE4	21	25

Tabla 6.33. Resumen de capacidades de soporte para cada alimentador
Fuente Propia.

Alimentador	Calibre	Corriente asimétrica 1/2 ciclo (kA)	Capacidad de soporte (kA)
ATS	350MCM	37	200
TP	-	37	-
TAA2	2/0AWG	6	70
TCO	1/0AWG	4	50
TSA	2AWG	4	40
TAB	1/0AWG	4	50
TFG	1/0AWG	4	50
TEA	1/0AWG	4	50
TEA2	2AWG	3	40
TBE2	1/0AWG	7	50
TBE22	2AWG	2	40
TBF	1/0AWG	2	50
BYPASS	3/0AWG	2	90
TUPS	2/0AWG	1	70
TIT1	2AWG	1	40
TIT2	6AWG	1	15
TIT3	6AWG	1	15
TCE	2AWG	2	40
TCE1	4AWG	2	25
TCOM	3/0AWG	20	90
TIL	2AWG	17	40
TIL2	2AWG	17	40
TAP4	2/0AWG	25	70
TPROD	2/0AWG	6	70
TEXT	3/0AWG	17	90
TBE4	250MCM	21	105

Luego de obtener los valores de corriente asimétrica a medio ciclo para una falla trifásica en todos los buses del sistema, se puede iniciar la selección de las protecciones según sus capacidades interruptivas.

Para la selección de las protecciones, se requiere (como mínimo) las siguientes características; número de polos, corriente nominal, tipo de montaje, tensión de operación y capacidad interruptiva.

Como fue mencionado al inicio de este documento, la capacidad interruptiva puede aumentar el precio de una misma protección hasta en un 50%. Y realizar un estudio de corrientes de falla por un cortocircuito es una herramienta perfecta para optimizar los gastos en la instalación eléctrica, sin olvidar las otras ventajas explicadas al inicio de este documento.

Como parte de la información aportada por la oficina de ingeniería, las demás características fueron aportadas por los criterios de diseño, según la necesidad de cada carga. La corriente nominal de cada una de las protecciones fue determinada según los criterios que exige el Código Eléctrico Nacional NFPA70 en su versión vigente del 2008. La tensión de operación y número de polos fueron seleccionadas según la necesidad de las cargas, de acuerdo con el diagrama unifilar general del sistema. (Anexo 2)

La capacidad interruptiva se selecciona de forma que esta característica siempre sea mayor que la corriente asimétrica a medio ciclo, según lo que recomienda la norma ANSI/IEEE 551-2006. Para protecciones a media tensión se requiere comparar la capacidad interruptiva con la corriente asimétrica a tres ciclos. (IEEE, 2006)

Todas las protecciones seleccionadas poseen un montaje en panel de distribución I-LINE de SQUARE D. Las protecciones son del mismo fabricante esto debido a que poseen un gran nivel técnico y comercial, además de contar con todas sus protecciones calificadas UL. Esta última característica es de suma importancia en la selección de equipos eléctricos, debido a que se debe contar con respaldo por parte del proveedor y conocer si el equipo que se adquiere es de calidad. Las capacidades interruptivas de las protecciones de caja moldeada de esta marca son presentadas a continuación.

	UL® / CSA® / NOM®					IEC 647-2 Icu/Ics					
	240 Vac	480 Vac	600 Vac	250 Vdc ¹	500 Vdc ²	220/240 Vac	380/440/415 Vac	500/525 Vac	690 Vac	250 Vdc ¹	500 Vdc ³
D	25 kA	18 kA	14 kA	20 kA	—	25/25 kA	18/18 kA	14/14 kA	—	20 kA	20 kA
G	65 kA	35 kA	18 kA	20 kA	20 kA	65/65 kA	35/35 kA	18/18 kA	—	20 kA	20 kA
J	100 kA	65 kA	25 kA	20 kA	—	100/100 kA	65/65 kA	25/25 kA	—	20 kA	20 kA
L	125 kA	100 kA	50 kA	20 kA	50 kA	125/125 kA	100/100 kA	50/50 kA	—	20 kA	20 kA
R	200 kA	200 kA	100 kA	—	—	150 kA	125 kA	75 kA	20 kA	—	—

Figura 6.26. Capacidades interruptivas para disyuntores de caja moldeada de SQUARE D
Fuente: Digest 157 Schneider Electric.

En caso de los alimentadores, se utiliza la comparación de la corriente que pasa por los respectivos alimentadores y se compara con la Figura 21 en el Capítulo 2, que brinda la corriente de falla capaz de soportar según el calibre. Este valor es agregado en la tabla de selecciones en la siguiente sección.

6.1 Protecciones seleccionadas

Las protecciones seleccionadas son divididas según el tablero que estén ubicados, principalmente se presenta las protecciones principales y sus respectivos ramales ya designados.

Para la transferencia automática, las protecciones de las transferencias ya están elegidos, estas son marca ABB. La transferencia es un módulo del panel principal por lo que la misma comparte la corriente asimétrica a medio ciclo por una falla de cortocircuito trifásico.

En el caso del alimentador un calibre 350mcm según la Figura 21 del Capítulo 2, soporta una corriente de cortocircuito trifásico a 1 ciclo de 200kA, esto es 645 veces más la capacidad nominal a 75 °C como exige el Código Eléctrico Nacional para el diseño a más de 100 A. La corriente que viaja en el punto es cercana a 37kA de corriente asimétrica a medio ciclo. Comparando los valores, la corriente soportada por el conductor es mucho mayor que la corriente de cortocircuito que viajaría en un estado de falla, por lo tanto, el alimentador cumple con su capacidad de soportar un cortocircuito trifásico.

Tabla 6.34. Protecciones seleccionadas para la transferencia automática
Fuente: Propia.

Tablero:		ATS		
Isc Asym 1/2 ciclo:		36955 A		
Tensión nominal:		480Vac		
Alimentador:		7-(4X#350MCM(3F+N) +1X#250MCM(T))		
Cap. Soporte conductor		200kA		
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
ATSN	2000	SACE E3N 32	65	-
ATSE	2000	SACE E3N 32	65	-

En caso del tablero principal, el mismo ya posee una protección, la cual es una protección de caja moldeada de la familia R de Square D, con unidad de disparo electrónica con ajustes a tiempo largo, tiempo corto, instantáneo y falla a tierra. Todas las protecciones son de caja moldeada con una capacidad interruptiva de tipo J, lo que implica según la Figura 6.26 que es capaz de soportar 65kA de corriente de falla.

Tabla 6.35. Protecciones seleccionadas para el tablero TP
Fuente: Propia.

Tablero:		TP		
Isc Asym 1/2 ciclo:		36 946 A		
Tensión nominal:		480Vac		
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
PPL	2000	RJ362000U44X	65	-
CHILL	600	LJA36600U53	65	Ø574.781,77
TXOF	250	JJA36250U33X	65	Ø395.829,49
TBE4	250	JJA36250U33X	65	Ø395.829,49
TXIT	70	HJA36070	65	Ø338.604,41
TXCM	50	HJA36050	65	Ø338.604,41
TCOM	400	LJA36400E53	65	Ø574.781,77
TIL	90	HJA36090	65	Ø338.604,41
TIL2	90	HJA36090	65	Ø338.604,41
TAP4	600	LJA36600U53	65	Ø574.781,77
TVSS	30	HJA36030	65	Ø294.001,47
Incendio	600	LJA36600U53	65	Ø574.781,77
BAC	450	LJA36600U53	65	Ø574.781,77

En el tablero del área administrativa A2, se tienen otros tableros alimentados, para estos ramales se seleccionaron disyuntores tipo QO, el disyuntor de caja moldeada más conocido de Square D. Estos poseen una capacidad interruptiva de 10kA para un voltaje de trabajo de 240V.

Con el conductor del alimentador de TAA2, se utiliza un calibre 2/0AWG donde según el gráfico de la Figura 21, este calibre soporta una corriente de cortocircuito a un ciclo de 70 kA, unas 400 veces la corriente nominal a 75°C. Se observa que la corriente que pasa por el cable en el peor caso será cercana a 6 kA, menos de un 10% de la capacidad del conductor. Por lo tanto, este alimentador es capaz de soportar un cortocircuito trifásico mientras las protecciones realizan el disparo.

Tabla 6.36. Protecciones seleccionadas para el tablero TAAA2
Fuente: Propia.

Tablero:		TAA2		
Isc Asym 1/2 ciclo:		6011 A		
Tensión nominal:		208Vac		
Alimentador:		3-(4X2/0AWG(3F+N)+ 1X#1/0AWG(T))		
Cap. Soporte conductor		70kA		
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
TCO	125	QO3125	10	Ⱬ108.996,59
TSA	100	QO3100	10	Ⱬ108.996,59
TAB	125	QO3125	10	Ⱬ108.996,59
TFG	125	QO3125	10	Ⱬ108.996,59
TEA	125	QO3125	10	Ⱬ108.996,59

Para las protecciones del tablero de compresores TCOM, se consideraron disyuntores de caja moldeada con una capacidad interruptiva G (35 kA). Es importante tomar en cuenta el voltaje de trabajo en la selección de la capacidad interruptiva, debido a que una protección con una capacidad D es capaz de soportar 35 kA, pero a 208 V, mientras que en este caso se está trabajando a 480 V.

El alimentador TCOM-FDR posee conductores 3/0 AWG para cada fase, según el gráfico de la Figura 21, este calibre soporta una corriente de cortocircuito a un ciclo de 90 kA y la corriente asimétrica es de 20 kA, siendo la corriente de falla solo un 22%

de la capacidad de soporte del alimentador a un ciclo. Por lo tanto, el alimentador TCOM-FDR es capaz de soportar el evento por cortocircuito trifásico mientras las protecciones se disparan.

Tabla 6.37. Protecciones seleccionadas para el tablero TCOM
Fuente: Propia.

Tablero:		TCOM		
Isc Asym ½ ciclo:		20213 A		
Tensión nominal:		480 Vac		
Alimentador:		2-(4x#3/0AWG(3F, N) + 1x#2AWG(T))		
Cap. Soporte conductor		90kA		
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
PPL	400	LGA36400E53	35	Ø574.781,77
COMP1	250	JGA36250	35	Ø637.295,67
COMP2	250	JGA36250	35	Ø637.295,67
COMP3	90	HGA36090	35	Ø261.709,67
BPT1	20	HGA36020	35	Ø237.808,27
BPT2	20	HGA36020	35	Ø237.808,27

Uno de los tableros de iluminación TIL, tiene una corriente de falla disponible menor a los 17kA, en este caso los disyuntores QO, no pueden ser seleccionados debido a que no pueden funcionar a 480V y tienen una capacidad interruptiva de solo 10kA. Para este caso se utilizan protecciones modelo EDB con capacidad de 18kA.

En caso de los tableros de iluminación TIL, poseen un alimentador 2AWG para las fases. Este calibre es capaz de soportar una corriente de falla en 40kA, la corriente de falla que pasa por este calibre es cercana a 17kA, por lo tanto, el alimentador FDR-TIL es capaz de soportar la corriente de falla en un evento de cortocircuito.

Tabla 6.38. Protecciones seleccionadas para tablero TIL
Fuente: Propia.

Tablero:		TIL		
Isc Asym 1/2 ciclo:		16 784 A		
Tensión nominal:		480 Vac		
Alimentador:		4x#2AWG (3F, N) + 1x#4AWG (T)		
Cap. Soporte conductor		40kA		
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
Ramal	20	EDB3B14020EPD	18	€69.302,44

Al sumar la cantidad de disyuntores seleccionados con las cotizaciones realizadas (adjuntas en el Anexo 6) se obtiene un total de €15 859 812 como una inversión de los disyuntores. El estudio de corrientes de cortocircuito permite optimizar la selección de las protecciones, sin realizar sobredimensiones ni poner en peligro el sistema eléctrico y la integridad del personal en un evento de falla de este tipo. Esto permite resaltar la importancia de realizar un estudio de corrientes de cortocircuito a nivel económico.

Los demás tableros son elegidos de forma similar a las anteriores. Se presenta las tablas a continuación:

Tabla 6.39. Protecciones seleccionadas para tablero TBE4
Fuente: Propia.

Tablero:		TBE4		
Isc Asym 1/2 ciclo:		21306 A		
Tensión nominal:		480Vac		
Alimentador:		4x 250MCM (3F, N) +1x2 AWG (T)		
Cap. Soporte conductor		105kA		
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
TXBO	70	HDA36070	25	€278.980,40

Tabla 6.40. Protecciones seleccionadas para BY-PASS de UPS
Fuente: Propia.

Tablero:	BYPASS			
Isc Asym 1/2 ciclo:	2420 A			
Tensión nominal:	208Vac			
Alimentador:	4x#3/0AWG (3F, N) + 1x#4 AWG (T)			
Cap. Soporte conductor	90kA			
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
PPL	200	JDA36200	25	€401.929,44
LOAD	175	JDA36175	25	€401.929,44
UPS	200	JDA36200	25	€401.929,44

Tabla 6.41. Protecciones seleccionadas para tablero TUPS
Fuente: Propia.

Tablero:	TUPS			
Isc Asym 1/2 ciclo:	363 A			
Tensión nominal:	208Vac			
Alimentador:	4x#2/0AWG(3F, N)+ 1x#4 AWG (T)			
Cap. Soporte conductor	70kA			
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
TIT1	100	QO3100	10	€108.996,59
TIT2	50	QO3050	10	€60.571,49
TIT3	50	QO3050	10	€60.571,49

Tabla 6.42. Protecciones seleccionadas para tablero TCE
Fuente: Propia.

Tablero:	TCE			
Isc Asym 1/2 ciclo:	1664 A			
Tensión nominal:	208Vac			
Alimentador:	4x#2 AWG (3F,N)+ 1x#4 AWG (T)			
Cap. Soporte conductor	40kA			
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
TXBO	70	QO3070	10	€86.308,13

Tabla 6.43. Protecciones seleccionadas para tablero TCE1
Fuente: Propia.

Tablero:	TCE1			
Isc Asym 1/2 ciclo:	1505 A			
Tensión nominal:	208Vac			
Alimentador:	4x#4 AWG(3F,N) + 1x#8 AWG (T)			
Cap. Soporte conductor	25kA			
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
BPOT1	20	QO3020	10	€58.146,55
BPOT2	20	QO3020	10	€58.146,55

Tabla 6.44. Protecciones seleccionadas para tablero TIL2
Fuente: Propia.

Tablero:	TIL2			
Isc Asym 1/2 ciclo:	16784 A			
Tensión nominal:	480Vac			
Alimentador:	4x#2 AWG (3F, N) + 1x#4 AWG (T)			
Cap. Soporte conductor	40kA			
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
Ramal	20	EDB3B14020EPD	18	€69.302,44

Tabla 6.45. Protecciones seleccionadas para tablero TAP4
Fuente: Propia.

Tablero:	TAP4			
Isc Asym ½ ciclo:	25056 A			
Tensión nominal:	480Vac			
Alimentador:	3-(4x#2/0 AWG (3F, N)+ 1x#4 AWG (T))			
Cap. Soporte conductor	70kA			
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
TEXT	400	LGA36400E53	35	€574.781,77
TXPROD	200	LGA36250E20	35	€574.781,77

Tabla 6.46. Protecciones seleccionadas para tablero TPROD
Fuente: Propia.

Tablero:	TPROD			
Isc Asym 1/2 ciclo:	6161 A			
Tensión nominal:	208Vac			
Alimentador:	2-(4x#2/0 AWG (3F, N) + 1x#4 AWG (T))			
Cap. Soporte conductor	70kA			
Protección	Capacidad nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
TCAL	100	QO3100	10	€108.996,59
TPR1	100	QO3100	10	€108.996,59
TPR2	100	QO3100	10	€108.996,59
TPR3	100	QO3100	10	€108.996,59
TPR4	100	QO3100	10	€108.996,59

Tabla 6.47. Protecciones seleccionadas para tablero TEXT
Fuente: Propia.

Tablero:	TEXT			
Isc Asym ½ ciclo:	17 600 A			
Tensión nominal:	480Vac			
Alimentador:	2-(4x#3/0 AWG (3F, N) + 1x#4 AWG (T))			
Cap. Soporte conductor	90kA			
Protección	Cap. Nominal (A)	Modelo	C. Int (kA)	Precio
PPL	400	LGA36400E53	18	€574.781,77
MAN1	125	HDA36125	18	€337.164,90
MAN2	100	HDA36100	18	€338.604,41
MAN3	100	HDA36100	18	€338.604,41
MAN4	20	HDA36020	18	€243.944,54
MAN5	20	HDA36020	18	€243.944,54
MAN6	100	HDA36100	18	€338.604,41
MAN7	30	HDA36030	18	€243.944,54

CAPÍTULO 7

7. Conclusiones y recomendaciones

Con base en la investigación realizada en la distinta bibliografía y en las normas internacionales ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993, los cálculos manuales mediante los criterios de las normas mencionadas, simulación mediante *software* Power Tools de SKM con los criterios utilizados por la oficina de ingeniería, comparación y discusión de resultados se alcanzaron las siguientes conclusiones.

- Mediante la investigación de las recomendaciones de las normas ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993 se obtuvo una serie de criterios para la simulación de cargas y comportamiento de equipos comúnmente encontrados en sistemas eléctricos industriales, esto para futuros estudios de cortocircuito realizados por Energética Soluciones y Consultoría.
- Valorando las recomendaciones de las normas ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993 se concluye que debido a la pronta descarga de los capacitores que forman los bancos de condensadores y filtros armónicos en un sistema industrial, no debe tomarse en cuenta su aporte en el estudio de cortocircuito. Los convertidores, alternadores y variadores de frecuencia con protección de red (*grid-protection*) no permiten el paso de corriente de falla en ninguna dirección. Los transformadores conectados a la red en una de sus derivaciones, se debe contemplar el cambio de impedancia inversamente proporcional al cambio de base en la tensión prefalla y al factor de derivación del transformador en el momento de la falla.
- Por medio del cálculo manual de corrientes de falla a medio ciclo para un cortocircuito trifásico con el método de la norma ANSI/IEEE 551-2006 se concluye que los criterios utilizados para la simulación de estudios de cortocircuito por parte de Energética Soluciones y Consultoría brindan

valores confiables y conservadores con diferencias porcentuales cercanas al 6%.

- Se alcanzó la selección de protecciones y verificación de conductores del rediseño del sistema eléctrico de Laboratorios Stein mediante el análisis de las corrientes de falla asimétricas a medio ciclo por un cortocircuito trifásico según recomendaciones de las normas ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993.
- Se realizó una comparación de los métodos de la norma ANSI/IEEE 551-2006 y el *software* DAPPER Power Tools de SKM, logrando definir las diferencias de procedimiento como manipulación de impedancias, cálculos de corrientes asimétrica, factores de asimetría, justificando las diferencias porcentuales de los resultados realizados con ambos métodos y a su vez, obteniéndose una base teórica de las recomendaciones de las normas internacionales ANSI/IEEE 551-2006 y ANSI/IEEE 141-1993 para complementar los futuros estudios realizados por Energética Soluciones y Consultoría.

Como tareas recomendadas para realizar después de este proyecto se encuentra:

- Realizar un estudio de coordinación de protecciones al sistema eléctrico de Laboratorios Stein, para complementar los accesorios de las protecciones previamente seleccionadas en este proyecto de graduación.
- Garantizar, con ese mismo estudio de coordinación de protecciones, la coordinación selectiva de forma ascendente en todos los casos, para optimizar los tiempos de disparo y evitar desconexiones completas del sistema.
- Desarrollar un estudio de arco eléctrico para el sistema eléctrico de Laboratorios Stein, obteniendo la energía incidente disponible en cada tablero eléctrico y preparar el equipo de protección personal para las

labores de mantenimiento que se deban realizar con el equipo energizado.

- Verificar el diagrama unifilar y planos eléctricos al finalizar la construcción del nuevo sistema eléctrico y la instalación de nuevas cargas y con esto verificar los posibles cambios en el estudio de corrientes de cortocircuito realizados en este proyecto de graduación.
- Efectuar un estudio de corrientes de cortocircuito al menos cada dos años, cuando la empresa de suministro de energía eléctrica recomiende realizarlo o cuando se realicen cambios del sistema eléctrico de la planta para mantener la confiabilidad de las protecciones y conductores respecto a la capacidad de soportar un cortocircuito trifásico.

CAPÍTULO 8

8. Bibliografía

- Barahona, G. (2015). *Análisis de Corto Circuitos*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Electromecánica.
- Barrantes, J. (2014, 16 de julio). *Estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones en CVG ALUNASA*. (1 ed.).
- Colegio de Ingenieros Electricistas Mecánicos e Industriales (2015). *Procedimiento para el planeamiento y diseño de instalaciones eléctricas en edificio comerciales, industriales e institucionales*. (1 ed.).
- Colmenares, A. (2012, 09 de mayo). *Tema N° 5 La Estructura de Desglose del Trabajo (EDT) según La Guía del PMBOK® / 30-04-2012 / Sesión 10 segunda parte | formulaproyectosurbanospmipe* Recuperado de <https://formulaproyectosurbanospmipe.wordpress.com/2012/05/09/tema-n-5-la-estructura-de-desglose-del-trabajo-edt-segun-la-guia-del-pmbok-30-04-2012-sesion-10-segunda-parte/>
- EATON. (2014). *Selecting Protective Devices Electrical Protection Handbook*. Bussmann.
- Macdowell, J., St. pierre, C. & Huening, W. (2006, 09 de mayo). *IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit in Industrial and Commercial Power Systems*. (2006 ed.)
- Moylan, W., Huening, W. & St. Pierre, C. (1993, 02 de diciembre). *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. (1993 ed.).
- National Fire Protection Association. (2014). *NFPA70 2014 Handbook*. (2014 ed.) publicado.
- Schneider Electric. (2012). *Digest 176 Platine IL*.
- SKM System Analysis, Inc. (2006). *DAPPER Reference Manual*.
- St. Pierre, C. (2011). *A practical Guide to Short-Circuit Calculations*. (3 ed.) Schenectady: Thompson-Shore Inc.

- Unidad Ingeniería de Bomberos. (2014). *Estadísticas de investigación de Incendios*. (2014 ed.).
- Rodolakis, A., Hall, W., St Pierre, C. (1997). *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis*. (1997 ed.).
- Parise, G., Adducce, M. (1998). *Conductor Protection Against Short Circuit Current: Available I²t*. IEEE. Department of Electrical Engineering. University of Rome “La Sapienza”, Italy.

ANEXO 1

A1. Impedancias comunes según ANSI/IEEE 141-1993

Tabla A1.1. Datos de impedancia a 60Hz, para cables de cobre a 75°C en ohms /100ft
Fuente: ANSI/IEEE 141-1993.

AWG or kcmil	In magnetic duct						In nonmagnetic duct					
	600 V and 5 kV nonshielded			5 kV shielded and 15 kV			600 V and 5 kV nonshielded			5 kV shielded and 15 kV		
	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
8	0.811	0.0754	0.814	0.811	0.0860	0.816	0.811	0.0603	0.813	0.811	0.0688	0.814
8 (solid)	0.786	0.0754	0.790	0.786	0.0860	0.791	0.786	0.0603	0.788	0.786	0.0688	0.789
6	0.510	0.0685	0.515	0.510	0.0796	0.516	0.510	0.0548	0.513	0.510	0.0636	0.514
6 (solid)	0.496	0.0685	0.501	0.496	0.0796	0.502	0.496	0.0548	0.499	0.496	0.0636	0.500
4	0.321	0.0632	0.327	0.321	0.0742	0.329	0.321	0.0506	0.325	0.321	0.0594	0.326
4 (solid)	0.312	0.0632	0.318	0.312	0.0742	0.321	0.312	0.0506	0.316	0.312	0.0594	0.318
2	0.202	0.0585	0.210	0.202	0.0685	0.214	0.202	0.0467	0.207	0.202	0.0547	0.209
1	0.160	0.0570	0.170	0.160	0.0675	0.174	0.160	0.0456	0.166	0.160	0.0540	0.169
1/0	0.128	0.0540	0.139	0.128	0.0635	0.143	0.127	0.0432	0.134	0.128	0.0507	0.138
2/0	0.102	0.0533	0.115	0.103	0.0630	0.121	0.101	0.0426	0.110	0.102	0.0504	0.114
3/0	0.0805	0.0519	0.0958	0.0814	0.0605	0.101	0.0766	0.0415	0.0871	0.0805	0.0484	0.0939
4/0	0.0640	0.0497	0.0810	0.0650	0.0583	0.0929	0.0633	0.0398	0.0748	0.0640	0.0466	0.0792
250	0.0552	0.0495	0.0742	0.0557	0.0570	0.0797	0.0541	0.0396	0.0670	0.0547	0.0456	0.0712
300	0.0464	0.0493	0.0677	0.0473	0.0564	0.0736	0.0451	0.0394	0.0599	0.0460	0.0451	0.0644
350	0.0378	0.0491	0.0617	0.0386	0.0562	0.0681	0.0368	0.0393	0.0536	0.0375	0.0450	0.0586
400	0.0356	0.0490	0.0606	0.0362	0.0548	0.0657	0.0342	0.0392	0.0520	0.0348	0.0438	0.0559
450	0.0322	0.0480	0.0578	0.0328	0.0538	0.0630	0.0304	0.0384	0.0490	0.0312	0.0430	0.0531
500	0.0294	0.0466	0.0551	0.0300	0.0526	0.0505	0.0276	0.0373	0.0464	0.0284	0.0421	0.0508
600	0.0257	0.0463	0.0530	0.0264	0.0516	0.0580	0.0237	0.0371	0.0440	0.0246	0.0412	0.0479
750	0.0216	0.0445	0.0495	0.0223	0.0497	0.0545	0.0194	0.0356	0.0405	0.0203	0.0396	0.0445

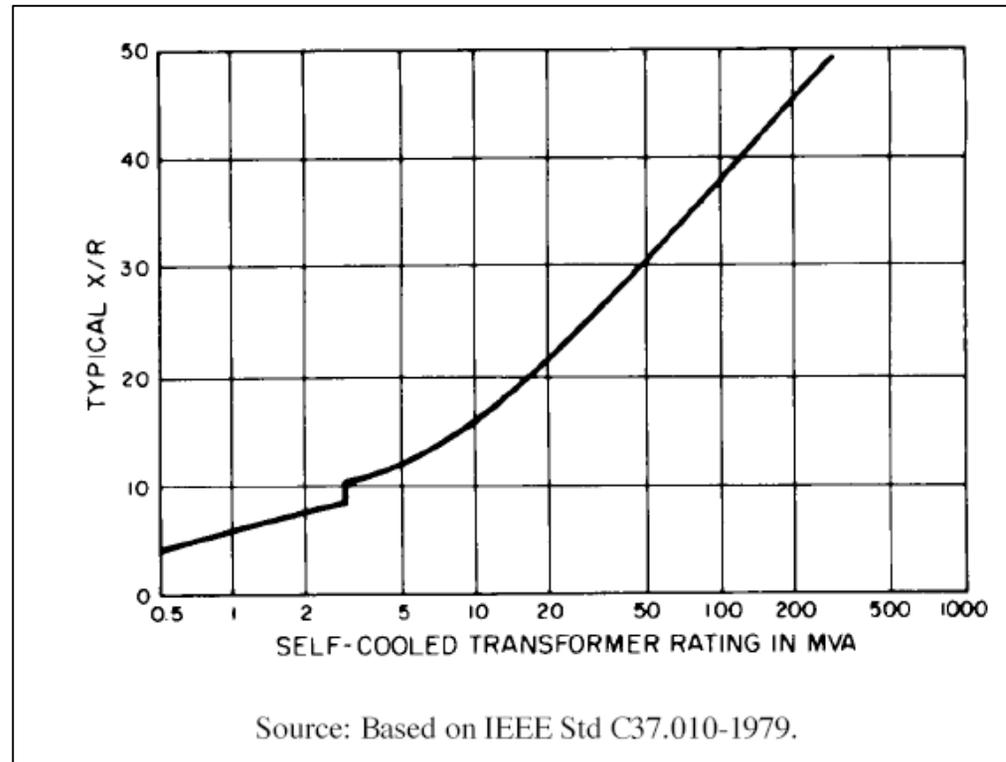


Figura A1.27. Valores típicos de X/R para transformadores
Fuente: ANSI/IEEE 141-1993.

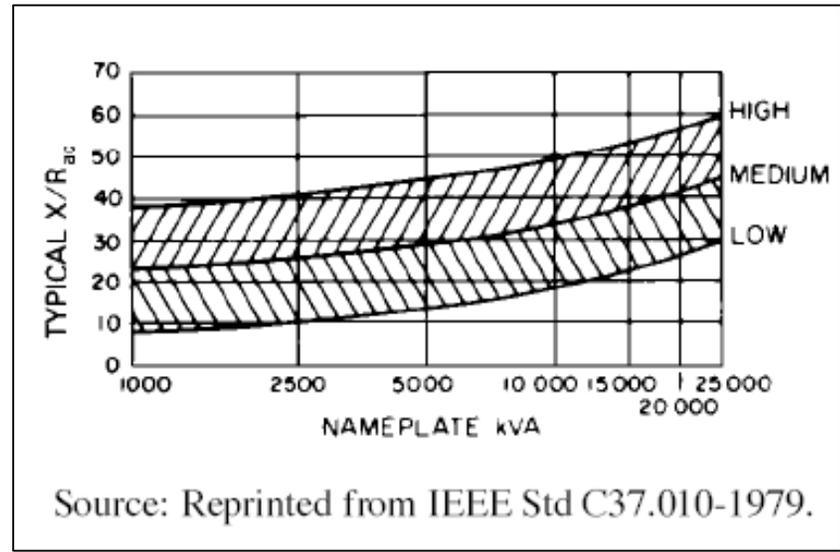


Figura A1. 28. Valores X/R típicos para motores síncronos y pequeños generadores
Fuente: ANSI/IEEE 141-1993.

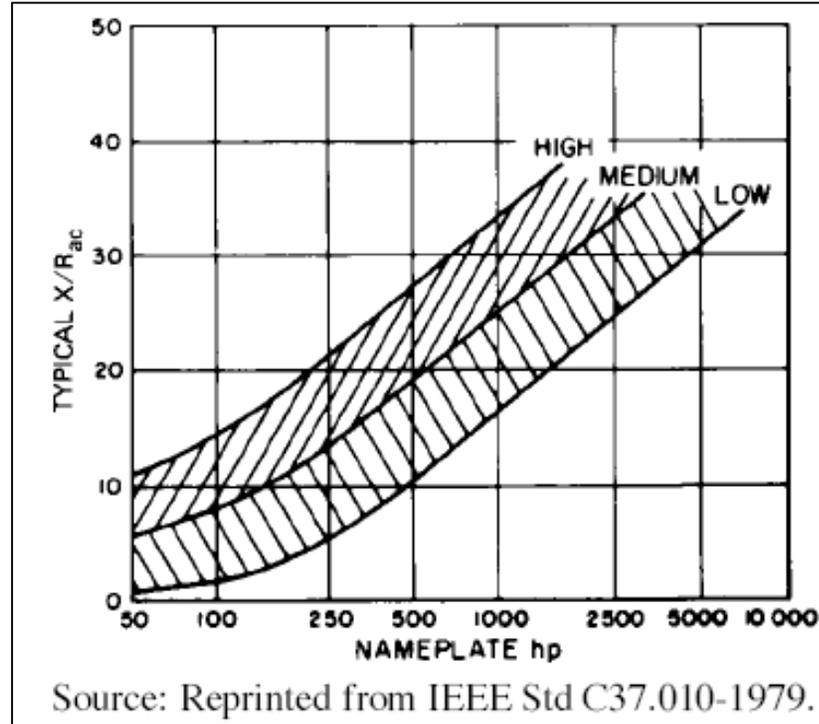


Figura A1.29. Valores X/R típicos de motores asíncronos
Fuente: ANSI/IEEE 141-1993

ANEXO 3

A3. Glosario

En este anexo se presenta el significado de toda la nomenclatura utilizada para los distintos componentes eléctricos del sistema de Laboratorios Stein. Entre estos se encuentran los motores contemplados como fuentes de corriente de falla, transformadores, tableros y alimentadores.

Nomenclatura	Equipo
CHILL	Chiller de 100 ton
COMP1	Compresor 1 de 70hp
COMP2	Compresor 2 de 70 hp
COMP3	Compresor 3 de 30 hp
BPT1	Bomba de planta de tratamiento 1
BPT2	Bomba de planta de tratamiento 1
BPOT1	Bomba de agua potable 1
BPOT2	Bomba de agua potable 2
MAN1	Manejadora 1 de 40 hp
MAN2	Manejadora 2 de 30 hp
MAN3	Manejadora 3 de 30 hp
MAN4	Manejadora 4 de 15 hp
MAN5	Manejadora 5 de 3 hp
MAN6	Manejadora 6 de 25 hp
MAN7	Manejadora 7 de 7 hp
GEN	Generador de planta de respaldo
TX-1	Transformador principal
TX-OF	Transformador seco de oficinas
TX-BO	Transformador seco de bodega fría
TX-IT	Transformador de sistema IT
TX-CM	Transformador seco de cuarto de máquinas
TX-PROD	Transformador seco de producción
TP	Tablero principal
TAAA2	Tablero de Área Administrativa A2
TBE4	Tablero bodega especial4
TBE2	Tablero bodega especial2
TBE22	Tablero bodega especial2-2
TBF	Tablero de bodega fría
BY-PASS	Respaldo de UPS

TUPS	Tablero de UPS
TCE	Tablero de cuarto eléctrico principal
TCE-1	Tablero de cuarto eléctrico1
BAC	Banco de capacitores
TCOM	Tablero de compresores
TIL1	Tablero de iluminación 1
TIL2	Tablero de iluminación 2
TAAA4	Tablero de Área Administrativa A4
TPROD	Tablero de protección
TCAL	Tablero de cuarto de calderas
TPRX	Tablero de producción X
TEXT	Tablero de sistema de extracción
TCO	Tablero de cocina
TSA	Tablero de salón administrativo.
TFG	Tablero de flexografía
TEA	Tablero Edificio Administrativo 1
TEA2	Tablero de Edificio Administrativo 2
FDR-XXXX	Alimentador de - XXXX

El nombre de los tableros se trató de mantener con base al nombre del sistema eléctrico anterior. Los alimentadores tienen como nombre las letras FDR debido a su traducción al inglés *feeder* y después del guion el nombre de la carga que alimenta. En caso de los tableros de producción la X, presenta una variable que puede variar el número. En el diseño solo existen cuatro tableros del área de producción.

ANEXO 4

A4. Memoria de cálculos

Se presenta los pasos de los cálculos realizados en el estudio de cortocircuito en el rediseño de la instalación eléctrica de Laboratorios STEIN, Costa Rica, según con los criterios de las normas ANSI/IEEE 141-1993 y ANSI/IEEE 551-2006.

A4.1 Impedancias equivalentes y valores por unidad

El primer paso a seguir es definir una base para los valores en por unidad de todos los componentes. La base seleccionada fue 1500kVA para perfiles de tensión de 34 500V, 480V y 208V. Las corrientes e impedancias base se calcularon con las ecuaciones siguientes:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{LLbase} \sqrt{3}} \quad (13)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{LNbase}}{I_{base}} \quad (14)$$

Con estas ecuaciones para los distintos perfiles de tensión se obtienen los siguientes resultados.

Tabla A4.48. Valores base para el cálculo impedancias en por unidad
Fuente: Propia.

Potencia (kVA)	1500		
Tensión (V)	34 500	480	208
Corriente (A)	25,102	1804,219	4163,584
Impedancia (Ω)	793,500	0,154	0,029

El segundo paso realizado, es tomar los valores de reactancia y resistencia de los calibres del Anexo 1, calcular las distancias de los alimentadores mediante la visita en sitio y las posibles canalizaciones por diseñar y el número de conductores en paralelo para cada uno de los alimentadores. Las reactancias y resistencias presentan

unidades de ohm por cada 1000 pies. Estos son convertidos a Ohm por metro de la siguiente forma:

$$X \left(\frac{\Omega}{m} \right) = X \left(\frac{\Omega}{1000ft} \right) * \frac{3,2808}{1000} \quad (15)$$

Al obtener los valores de reactancia y resistencia en Ω/m es posible obtener la resistencia y reactancia de cada uno de los alimentadores, multiplicar por la distancia (d) y dividir entre el número de conductores en paralelo (#j).

$$X (\Omega) = X \left(\frac{\Omega}{m} \right) * \frac{d (m)}{\#j} \quad (16)$$

Ahora se debe tomar estas impedancias y dividir las entre la impedancia base para cada uno de los perfiles de voltaje, con la siguiente ecuación:

$$X (p.u) = \frac{X (\Omega)}{X (base)} \quad (17)$$

Al realizarlo para cada uno de los alimentadores se obtiene la Tabla 3.1, en el Capítulo 3.

Ahora se debe realizar el cambio de bases para los transformadores ubicados dentro de la planta, obteniéndose las impedancias de los datos de placa o del fabricante y el factor X/R típico es tomado del Anexo 1. Las impedancias son presentadas en porcentaje de la base del transformador y se requiere obtener el valor de resistencia y reactancia por aparte:

$$R (\%) = \frac{Z (\%)}{\sqrt{(X/R)^2 + 1}} \quad (18)$$

$$X (\%) = \left(\frac{X}{R} \right) * R (\%) \quad (19)$$

Obteniendo estas reactancias y resistencias porcentuales se realiza el cambio de base multiplicando por la potencia base (1500kVA), dividiéndola por la potencia aparente de los transformadores (Tx) y dividiendo entre 100.

$$X (p.u) = \frac{X (\%)}{100} * \frac{S_{base}}{S_{tx}} \quad (20)$$

Con este paso se obtiene los valores de la Tabla 3.2 en el Capítulo 3.

Para los motores presentes y el generador, no se logró obtener los valores propios de impedancias subtransitorias, debido a que los motores son parte de conjuntos mecánicos y no se logra obtener información detallada de la procedencia del motor. Por lo anterior, se presenta las reactancias subtransitorias las cuales son asumidas con criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 como un 16.7% de la impedancia base con la capacidad del equipo. Estas deben ser multiplicadas por los factores de la Tabla 1, en el Capítulo 2. Por lo que las impedancias resultantes serán:

$$Z_{<50hp} = 16.7\% * 1.67 = 27.78\% \quad (21)$$

$$Z_{>50hp} = 16.7\% * 1.2 = 20.83\% \quad (22)$$

Los factores X/R son tomados del Anexo 1, tomando como referencia gráficos de la norma ANSI/IEEE 141-1993. Las impedancias en porcentaje deben ser cambiadas a valores por unidad lo cual es realizado con la ecuación 8 de esta minuta de cálculos y la resistencia se calcula dividiendo esta reactancia entre el valor X/R.

Para el cálculo de la impedancia equivalente del aporte de la empresa de suministro se toma la corriente trifásica disponible con la tensión de servicio y se calcula una impedancia en Ohms.

$$Z (\Omega) = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} * I_{FSC}} = \frac{34500}{\sqrt{3} * 1900} = 10.483\Omega \quad (23)$$

Es impedancia con el factor X/R de 15, es dividido en una reactancia y una resistencia equivalente usando las ecuaciones 6 y 7. Estos valores son divididos entre la impedancia base a 34500V con la ecuación número 5 obteniendo:

$$X (p.u) = 0.01318$$

$$R (p.u) = 0.0008$$

A4.2 Cálculo de aportes equivalentes

Al obtener todas las impedancias de los distintos alimentadores, transformadores, motores, generadores y la impedancia equivalente del aporte de la empresa de suministro, se realizaron los aportes equivalentes de cada carga conectada en distintos puntos. Esto para acelerar el cálculo de las impedancias equivalentes en el punto a estudiar.

El siguiente procedimiento explicará cómo obtener la reactancia equivalente de las cargas de TCOM, se explicará únicamente este, ya que para la resistencia solo se requiere cambiar los valores por los resistivos de la tabla presente en el Capítulo 3.

En el tablero TCOM, están conectados los tres compresores (COMP1, COMP2, COMP3) y las dos bombas de la planta de tratamiento (BPT1, BPT2), cada una de estas reactancias y resistencias poseen otra conectada en serie que sería su respectivo alimentador. Estas equivalencias están todas en paralelo, teniendo un aporte equivalente de todas las cargas conectadas en el tablero TCOM.

Tabla A4.49. Valores de reactancias de los equipos conectados a TCOM Fuente Propia.

Equipo	X (p.u.)	1/X (p.u.)
COMP1	4,464	0,224
FDR-COMP1	0,009	108,879
COMP2	4,464	0,224
FDR-COMP2	0,009	108,879
COMP3	13,890	0,072
FDR-COMP3	0,011	93,636
BPT1	138,900	0,007
FDR-BPT1	0,020	50,889
BPT2	138,900	0,007
FDR-BPT2	0,020	50,889

Con los valores de reactancia de la tabla anterior, se suma los valores de cada equipo con su respectivo alimentador, obteniéndose el aporte equivalente de cada equipo en el tablero TCOM. Cada uno de estos aportes está conectado en paralelo sobre TCOM por lo que puede tomarse un aporte equivalente de las cargas (MAQ_{EQ})

y esta equivalencia está conectada en serie con el alimentador del tablero TCOM (FDR-TCOM).

Tabla A4.50. Reactancia equivalente del tablero TCOM en p.u.
Fuente Propia.

Equivalencia	X	1/X	Observación
XC1	4,473	0,224	COMP1+FDR-COMP1
XC2	4,473	0,224	COMP2+FDR-COMP2
XC3	13,901	0,072	COMP3+FDR-COMP3
XBPT1	138,920	0,007	BPT1+FDR-BPT1
XBPT2	138,920	0,007	BPT2+FDR-BPT2
MAQ _{EQ}	1,874	0,533	SUM 1/X
FDR-TCOM	0,017		
XCOM	1,892		SUM X

Se realiza el mismo procedimiento para los valores de resistencia y así se obtiene la reactancia y resistencia independientemente, según los criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006.

$$R_{COM} (p.u) = 0,325$$

El mismo procedimiento aplica para los tableros TEXT y TCME1, La diferencia radica que en TEXT se requiere tomar en cuenta también el alimentador del tablero TAP4, (FDR-TAP4) para tener el aporte equivalente hasta TP. En TCME1 se requiere contemplar el alimentador FDR-TCM1, la impedancia del transformador TXCM y su alimentador FDR-TXCM todas estas conectadas en serie.

$$X_{AP4} (p.u) = 2,801$$

$$R_{AP4} (p.u) = 0,636$$

$$X_{CM1} (p.u) = 43,839$$

$$R_{CM1} (p.u) = 11,480$$

En el caso del *chiller*, generador y empresa de suministro, para llegar a TP, solo se requiere sumar las reactancias y resistencias en serie. Por ejemplo, en el caso de la empresa de suministro, la reactancia equivalente, el alimentador FDR-TX1 el

transformador TX-1, y el alimentador de la transferencia FDR-ATSN son sumadas en serie. En caso del generador y el *chiller* es solo sus reactancias sumadas con su alimentador.

$$XCH (p.u) = 1,05$$

$$RCH (p.u) = 0,105$$

$$XUT (p.u) = 0,072$$

$$RUT (p.u) = 0,013$$

$$XGEN (p.u) = 0,116$$

$$RGEN (p.u) = 0,007$$

A4.3 Cálculo de impedancias equivalentes

Con el paso anterior, se agiliza el procedimiento para obtener las impedancias equivalentes en los puntos a analizar. Dentro del proyecto de graduación se realizó el estudio en TP, tanto con el aporte de la empresa de suministro, el aporte con el generador y el aporte de la empresa de suministro más el caso hipotético en que las cargas de TEXT no posean un VFD. También se analizó en TCOM, TAP4, TEXT tanto con aporte de las unidades manejadoras de aire y sin él. Además, se analizó el alimentador del banco de capacitores valorando la descarga del dicho banco.

Similar al caso anterior, se explicará a detalle el procedimiento de la impedancia equivalente de TP con el aporte de la empresa de suministro y TEXT con VFD y sin ellos. Los demás puntos serán explicados brevemente, siguiendo una línea similar a los explicados a detalle.

A4.3.1 Impedancia equivalente para TP con aporte de la empresa de suministro

En el panel principal del sistema eléctrico de Laboratorios Stein, se realizó el estudio de corrientes de cortocircuito, utilizando los aportes equivalentes calculados

anteriormente. Según la conexión del sistema eléctrico todos los aportes anteriores están conectados en paralelo sobre TP. En este caso la impedancia equivalente será calculada con los inversos de las variables eléctricas de los aportes de la siguiente manera:

Tabla A4.51. Cálculo de reactancia equivalente en TP en p.u.
Fuente: Propia.

Aporte	X (p.u.)	1/X (1/p.u.)
XCOM		0,529
XCM1		0,023
XCH		0,952
XUT	0,072	13,818
XTP	0,065	15,322

Tabla A4.52. Cálculo de resistencia equivalente en TP
Fuente: Propia.

Aporte	R (p.u.)	1/R (1/p.u.)
RCOM		3,081
RCM1		0,087
RCH		9,514
RUT	0,013	76,940
RTP	0,011	89,622

En estos casos XTP y RTP son las reactancias y resistencia equivalente para el panel TP. En el cálculo no es contemplado el aporte XAP4 y RAP4, el cual equivale al aporte de las cargas del sistema de extracción conectado en TEXT y TAP4. La impedancia equivalente es el número complejo formado por esta resistencia y reactancia.

$$Z_{TP} = 0,011 + 0,064j \text{ p.u.}$$

A4.3.2 Impedancia equivalente en TEXT con aporte de empresa de suministro

Para el caso del tablero del sistema de extracción de aire TEXT, se realizaron dos escenarios para evidenciar la importancia de los variadores de frecuencia. En el primero caso, con los VFD conectados, la corriente de falla viene aguas arriba del

tablero en su totalidad, por lo que los aportes de las cargas y la empresa de suministro están en paralelo sobre TP, y este aporte en serie con las impedancias de los alimentadores FDR-TAP4 y FDR-TEXT.

Tabla A4.53. Cálculo de reactancia equivalente en p.u. para TEXT con VFD
Fuente: Propia.

Aporte	X (p.u.)	1/X (1/p.u.)
XCM1		0,023
XCH		0,952
XUT		13,818
XCOM		0,529
XTP	0,065	15,322
FDR-TAP4	0,007	
FDR-TEXT	0,013	
XEXT	0,085	11,761

Tabla A4.54. Cálculo de resistencia equivalente en p.u. para TEXT con VFD
Fuente: Propia.

Aporte	R (p.u.)	1/R (1/p.u.)
RCM1		0,087
RCH		9,514
RUT		76,940
RTP	0,012	86,541
FDR-TAP4	0,019	
FDR-TEXT	0,043	
REXT	0,073	13,692

La impedancia equivalente será el número complejo conformado por estas variables.

$$Z_{TP} = 0,073 + 0,085j \text{ p.u.}$$

En caso no tener VFD, se requiere agregar en paralelo a esta última reactancia el aporte equivalente de todas las unidades manejadoras de aire del sistema eléctrico. Esto es realizado de la siguiente manera:

Tabla A4.55. Cálculo de reactancia equivalente en p.u. para TEXT sin VFD
Fuente: Propia.

Aporte	X (p.u.)	1/X (1/p.u.)
XEXT	0,085	11,761
MANEQ		0,360
XEXT-II	0,083	12,121

Tabla A4.56. Cálculo de resistencia equivalente en p.u. para TEXT sin VFD
Fuente: Propia.

Aporte	R (p.u.)	1/R (1/p.u.)
REXT	0,073	13,692
MANEQ		1,740
REXT-II	0,065	15,432

La impedancia equivalente será el número complejo conformado por estas variables.

$$Z_{TP} = 0,065 + 0,083j \text{ p.u.}$$

Se puede observar que la impedancia en este segundo caso es menor, lo que implica una mayor corriente de cortocircuito simétrica.

Las demás impedancias equivalentes se ubican en las tablas del Capítulo 4. Todas las demás impedancias tienen un método de cálculo similar a los expuestos en esta sección.

A4.4 Cálculo de corrientes de falla

Para el cálculo de las corrientes de falla por cortocircuito se utilizará las impedancias calculadas en el paso anterior para cada uno de los puntos estudiados. De igual forma, se explicará, como un ejemplo el caso de TP con el aporte de la empresa de suministro para el cálculo de la corriente simétrica a medio ciclo, asimétrica a medio ciclo, factor X/R y factor de asimetría. Los demás puntos seleccionados se analizaron con el mismo procedimiento.

Para el caso de TP, se tiene una impedancia equivalente tomada del paso anterior, siendo necesario tomar el módulo de este número complejo, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$Z_{TP} = 0,011 + 0,064j$$

$$Z_{TP} = \sqrt{0,011^2 + 0,064^2}$$

$$|Z_{TP}| = 0,066$$

La corriente simétrica a medio ciclo se calcula mediante la ley de Ohm, en donde el voltaje prefalla, según criterios de la norma ANSI/IEEE 551-2006 es 1 p.u., es dividido por la impedancia equivalente. Esta corriente en p.u. puede calcularse en amperios al multiplicar por la corriente base de la Tabla 1, en este caso a voltaje 480V.

$$I_{SYM} = \frac{V}{Z} = \frac{1}{0,066}$$

$$I_{SYM} = 15,103 \text{ p.u}$$

$$I_{SYM} = 27248 \text{ A}$$

Ya con la corriente simétrica, se puede proceder al cálculo de la corriente asimétrica; para esta como primer paso se requiere el cálculo del factor X/R, el cual es calculado de esa misma forma.

$$\frac{X}{R} = \frac{0,0064}{0,011} = 5,849$$

Es factor X/R es necesario para el cálculo del factor de asimetría y la corriente asimétrica, el cual responde a la ecuación del Capítulo 2.

$$I_{asim} = I_{sim} \sqrt{1 + 2e^{-2\pi/(\frac{X}{R})}}$$

$$I_{asim} = I_{sim} \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2\pi}{5,849}}}$$

$$I_{asim} = I_{sim} * 1,297$$

$$I_{asim} = 35351 \text{ A}$$

ANEXO 5

A5. Cotización disyuntores



Céd. Jur. 3-101-06021405
 Almacén El Electrico S.A.
 San Francisco de Dos Ríos, 100 Oeste de la Estación
 de Servicio delta Apdo, San José, Costa Rica
 Tel.: (506) 4055-1700 Fax.: (506) 2286-3078
 www.elelectrico.com

PROFORMA		
No. 257786		
Día	Mes	Año
5	5	2016

CA001971

ENERGETICA SOLUCIONES Y CONSULTORIA IAC S.A.

De acuerdo a su estimable solicitud nos es grato presentar a su consideración nuestra cotización como sigue:

Moneda: COL

#	Artículo	Descripción	Qty	Precio	I.V.	Desc	Total Línea
1	689	BREAKER QO 320 3P/20A ENCHUFAR	1	58.146,55	IV	0%	58.146,55
2	24467	HDA36020 BREAKER INDUSTRIAL 3P/20A 600V I-LINE	1	243.944,54	IV	0%	243.944,54
3	5237	EDB14020 BREAKER INDUSTRIAL 1P/20A 480V	1	69.302,44	IV	0%	69.302,44
4	26381	HJA36040 BREAKER INDUSTRIAL 3P 40AMP	1	294.001,47	IV	0%	294.001,47
5	18826	HJA36050 BREAKER INDUSTRIAL 3P/50A 600V	1	386.844,04	IV	0%	386.844,04
6	692	BREAKER QO 350 3P/50A ENCHUFAR	1	60.571,49	IV	0%	60.571,49
7	27348	HJA36070 BREAKER INDUSTRIAL 3P 100A 240/415 VAC a 50 / 60Hz	1	338.604,41	IV	0%	338.604,41
8	15808	HDA36070 BREAKER INDUSTRIAL 3P/70A 600V	1	278.980,40	IV	0%	278.980,40
9	694	BREAKER QO 370 3P/70A ENCHUFAR	1	86.308,13	IV	0%	86.308,13
10	27348	HJA36090 BREAKER INDUSTRIAL 3P 90A 240/415 VAC a 50 / 60Hz	1	338.604,41	IV	0%	338.604,41
11	16860	HDA36090 BREAKER INDUSTRIAL 3P/90A 600V	1	278.980,40	IV	0%	278.980,40
12	697	BREAKER QO 3100 3P/100A ENCHUFAR	1	108.996,59	IV	0%	108.996,59
13	16860	HDA36100 BREAKER INDUSTRIAL 3P/100A 600V	1	278.980,40	IV	0%	278.980,40
14	697	BREAKER QO 3100 3P/100A ENCHUFAR	1	108.996,59	IV	0%	108.996,59
15	15524	HDA36125 BREAKER INDUSTRIAL 3P/125A 600V	1	337.164,90	IV	0%	337.164,90
16	14153	JDA36175 BREAKER INDUSTRIAL 3P/175A 600V	1	401.929,44	IV	0%	401.929,44
17	15499	JDA36200 BREAKER INDUSTRIAL 3P/200A 600V	1	401.929,44	IV	0%	401.929,44
18	20767	JJA36250 BREAKER INDUSTRIAL 3P/250A 600V	1	633.126,04	IV	0%	633.126,04
19	15522	JDA36250 BREAKER INDUSTRIAL 3P/250A 600V	1	395.829,49	IV	0%	395.829,49

-----Última Línea-----