

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

**Actualización del estudio de cortocircuito en la Refinería de
Petróleo “Camilo Cienfuegos”.**

Autor: Jorge David Pérez Suárez

Tutores: Msc. Emilio Andrés Francesena Bacallao

Ing. Isidro Fraga Hurtado

Santa Clara

2016

“Año 58 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

**Actualización del estudio de cortocircuito en la Refinería de
Petróleo “Camilo Cienfuegos”.**

Autor: Jorge David Pérez Suárez

e- mail: jorgedavid92@nauta.cu

Tutores: Msc. Emilio Andrés Francesena Bacallao

e- mail: emiliof@uclv.edu.cu

Ing. Isidro Fraga Hurtado

e- mail: ifraga@cuenpetrol.cu

Santa Clara

2016

“Año 58 de la Revolución”



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-
Técnica

PENSAMIENTO

Aprender es descubrir que algo es posible.

(Fritz Perls)

DEDICATORIA

A mis padres por haberme educado de la forma que han hecho, por darme todo en esta vida y creer siempre en mí.

A mi familia por estar siempre a mi lado y apoyarme.

A todas las personas que creyeron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Georgina y mi padre Jorge por su amor sincero y siempre guiarme en esta vida.

A mi familia por ser parte de mi vida y enseñarme cada día cosas nuevas.

A mis amigos por estar conmigo en las buenas y en las malas.

A todos mis compañeros de aula por vivir conmigo momentos inolvidables en estos últimos cinco años.

A mi tutores Emilio Francesena Bacallao e Isidro Fraga Hurtado por asesorarme en la elaboración de esta tesis.

A todos mis profesores por su dedicación y por haber contribuido en mi formación como profesional.

A todas las personas que han formado parte de mi vida y han creído en mí.

Gracias.

TAREA TÉCNICA

1. Revisión de la literatura relacionada con el tema.
2. Definición de los escenarios que se analizarán.
3. Elaboración de plantilla en el programa ETAP con el equipamiento eléctrico de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”.
4. Corridas en el programa ETAP de los escenarios definidos para obtener los valores máximos y mínimos de cortocircuito en las barras de análisis.
5. Redacción del Informe.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

El presente trabajo fue motivado por la necesidad de hacer el estudio de los niveles de cortocircuito en la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” en la provincia Cienfuegos, pues esta se encuentra inmersa en un proceso de expansión de sus unidades de proceso y de modernización del equipamiento existente de las subestaciones, pues este es de tecnología rusa y ya no se cuenta con repuestos.

Los valores de cortocircuito son de vital transcendencia en la selección del equipamiento eléctrico, tanto para las nuevas subestaciones asociadas a las nuevas unidades de proceso como para la modernización de las subestaciones existentes.

Este trabajo muestra las diferencias entre las dos normas internacionales por las cuales se realizan los estudios de cortocircuito y los valores de cortocircuito máximo y mínimo calculado por cada una de ellas.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	v
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO	4
1.1 Fundamentos de cortocircuito	5
1.2 Tipos de cortocircuitos en los sistemas trifásicos de potencia.....	5
1.3 Fuentes que contribuyen al cortocircuito	9
1.3.1 La reactancia en las maquinas rotativas	11
1.4 Corrientes de cortocircuito	12
1.5 Normas de referencia usadas en el cálculo de cortocircuitos.....	15
1.5.1 Corrientes consideradas	16
1.5.2 Modelación del decaimiento de la componente de corriente alterna.....	17
1.5.3 Modelación del decaimiento de la componente de corriente directa.....	20
1.5.4 Voltajes de prefalla.....	21
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	22

2.1	Introducción al capítulo.....	22
2.2	Características de los Sistemas Eléctricos en la Industria de Petróleo.....	22
2.2.1	Localización de las subestaciones.....	22
2.2.2	Configuraciones aceptadas.....	23
2.3	Descripción del circuito en estudio.....	28
2.4	Definición de las condiciones de operación del sistema eléctrico.....	29
2.5	Modelación del Sistema Eléctrico con el ETAP.....	31
2.5.1	Configuración del equipamiento con el ETAP.....	32
2.5.2	Análisis de cortocircuito con el ETAP.....	37
2.5.3	Norma ANSI/IEEE:.....	38
2.5.4	Norma IEC 60909:.....	39
CAPÍTULO 3. CÁLCULO DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO.....		42
3.1	Descripción de las características de las variantes con las que se simularon las plantillas creadas.....	42
3.2	Cálculo de los valores de cortocircuito para el escenario Máximo.....	44
3.2.1	Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de medio ciclo (1/2 ciclo).....	44
3.2.2	Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de interrupción (1½-4 ciclos).....	45
3.2.3	Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de estado estable (30 ciclos).....	46
3.2.4	Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito máximo.....	47
3.2.5	Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito mínimo.....	48
3.3	Calculo de los valores de cortocircuito para el escenario Mínimo.....	49

3.3.1 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de medio ciclo (1/2 ciclo).	49
3.3.2 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de interrupción (1½-4 ciclos).....	50
3.3.3 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de estado estable (30 ciclos).	51
3.3.4 Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito máximo.....	52
3.3.5 Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito mínimo.	53
3.4 Análisis de los resultados obtenidos.	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
Conclusiones.....	56
Recomendaciones.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

INTRODUCCIÓN

La Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” es una empresa mixta creada entre la empresa cubana CUPET y la empresa Venezolana PDVSA, radica en la Finca Carolina en el municipio Cienfuegos, provincia Cienfuegos.

Las instalaciones eléctricas de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” se encuentran en proceso de modernización con la instalación del equipamiento asociado al SCADA eléctrico y construcción de nuevas plantas pertenecientes al Proyecto Expansión.

Las nuevas subestaciones se conectarán a la subestación principal, para el diseño de estas se hace necesario tener los valores de cortocircuito en la subestación principal.

El estudio de cortocircuito y las premisas por el que se diseñó la instalación eléctrica de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” no se encuentra disponible.

Teniendo lo anterior en consideración y previo a la ingeniería básica de las nuevas instalaciones se solicitó actualizar el estudio de cortocircuito de la instalación existente con un programa certificado, a fin de obtener los valores para el diseño de las nuevas instalaciones y tener una plantilla que permita incorporar las nuevas instalaciones.

A partir de estos antecedentes cabe entonces el planteamiento de la **Interrogante Científica** siguiente:

¿Cuáles son los valores actuales de cortocircuito mínimo y máximo en las 18 barras de las ocho subestaciones de 6 kV y en las 46 barras de las 23 subestaciones de 0.48 kV en la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”?

Para dar respuesta a esta interrogante en el presente trabajo se planteó como **Objetivo General** el siguiente:

Determinar los valores de cortocircuito mínimo y máximo en las 18 barras de 6 kV y en las 46 barras de 0.48 kV en la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”.

De este objetivo general se derivan los **objetivos específicos** siguientes:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica para obtener la fundamentación teórica del cortocircuito y la base normativa que rige estos estudios.
2. Realizar un levantamiento de la instalación existente y definir las condiciones extremas de operación del sistema eléctrico, para simular los escenarios de cálculo de los valores mínimos y máximos de cortocircuito.
3. Elaborar la plantilla en el programa ETAP 12.6 de la instalación existente y correr en esta los diferentes escenarios para obtener los valores máximos y mínimos en cada barra.
4. Elaborar el informe de investigación de acuerdo a las normas para su presentación y discusión.

Descripción de los contenidos.

Capítulo 1: Se hace una búsqueda bibliográfica sobre el estudio de cortocircuito y la base normativa que se usa para el cálculo de cortocircuito en la actualidad.

Capítulo 2: Se hace una descripción del circuito que se va a analizar en cuanto a la configuración de la red, se definen las condiciones de operación de la planta que establecen las condiciones extremas de operación del sistema eléctrico para la creación de los escenarios. Se hace una descripción del programa que se usa para los cálculos.

Capítulo 3: Se corren los distintos escenarios para obtener los valores de cortocircuito máximo y mínimo en las barras de análisis.

Por último se exponen las **conclusiones** y se emiten las **recomendaciones** del análisis realizado.

CAPÍTULO 1. ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO

La planeación, diseño y operación de toda instalación eléctrica requiere de continuos estudios que asisten en la evaluación inicial y futura del rendimiento, disponibilidad, seguridad y habilidad del sistema para adaptarse a cambios de operación. Uno de estos cambios es la operación en condiciones de cortocircuito, en las cuales los equipos y/o sistemas puedan sufrir daños severos que impidan su correcto funcionamiento durante y después del cortocircuito. Es por ello que el diseño también considera el correcto desempeño de la instalación durante la ocurrencia del cortocircuito. [1-4]

En explotación normal los sistemas eléctricos sufren perturbaciones debido a los cortocircuitos, estos se deben a distintas causas y su gran mayoría están fuera del control humano, pero todas las que derivan en un cortocircuito tienen la misma consecuencia, un elevado valor de corriente que provoca un fuerte incremento del calor generado que puede destruir o envejecer el aislamiento del equipamiento de la instalación, debido a esto es necesario disminuir al mínimo el tiempo durante el cual la corriente de falla se presenta en el sistema mediante el uso de dispositivos de monitoreo, detección y señalización. [1-4]

El estudio de cortocircuito permite determinar los valores de corriente ante la ocurrencia de una falla, por lo general el estudio de cortocircuito es un requerimiento de las empresas ante nuevos proyectos y modernizaciones, estos valores se usan en general para: [5-9]

- Determinar las capacidades interruptivas de los elementos de protección.
- Realizar el estudio de coordinación de protecciones.
- Realizar los estudios térmicos y dinámicos que consideren los efectos de las corrientes de cortocircuito en los elementos del sistema.
- Realizar los estudios de estabilidad.
- Calcular las mallas de tierra.

Los pasos para realizar un estudio de cortocircuito mediante el uso de ordenadores son los siguientes: [10]

- Recolectar todos los datos necesarios del equipamiento y el sistema.
- Preparar los ficheros de datos que son requeridos por el programa.
- Definir los escenarios.
- Correr el programa y obtener los resultados.

1.1 Fundamentos de cortocircuito.

Toda instalación eléctrica debe de estar protegida apropiadamente contra los cortocircuitos en cada punto que se presenta una discontinuidad eléctrica, lo que corresponde casi siempre con un cambio en la sección de los conductores. La intensidad de la corriente debe calcularse para cada uno de los diversos niveles de la instalación para poder determinar las características de los componentes que deberán soportar o cortar la corriente de defecto. [5, 9, 11-13]

Un cortocircuito es una conexión anormal y no deseada entre dos o más puntos de distinto potencial en un sistema eléctrico. Caracterizándose por corrientes circulantes hasta el punto de falla con una magnitud muchas veces mayor que la corriente de carga. [14-17]

Parte esencial en el diseño de un sistema de potencia es el cálculo de las corrientes que fluyen en sus componentes cuando fallas de varios tipos ocurren. La magnitud de la corriente que fluye durante un cortocircuito en un sistema está limitada por el tipo de falla, las fuentes presentes de corriente a la falla y la impedancia entre las fuentes y el punto de falla. [2, 5, 17, 18]

1.2 Tipos de cortocircuitos en los sistemas trifásicos de potencia.

En los sistemas trifásicos de potencia los cortocircuitos se clasifican usando varios criterios, uno de ellos es en función de la combinación de conductores involucrados en la falla: [12-14, 19]

Trifásicos: Los cortocircuitos trifásicos son los cortocircuitos donde los tres conductores están unidos entre ellos con cero impedancias entre ellos (Figura

1.1). Son los únicos cortocircuitos que se comportan como sistemas equilibrados, ya que todas las fases están afectadas por igual. Las tensiones en el punto de cortocircuito son nulas. Esta falla no ocurre con frecuencia, pero es la que por lo general provoca las mayores exigencias de corriente en el sistema. [15, 16, 20-22]

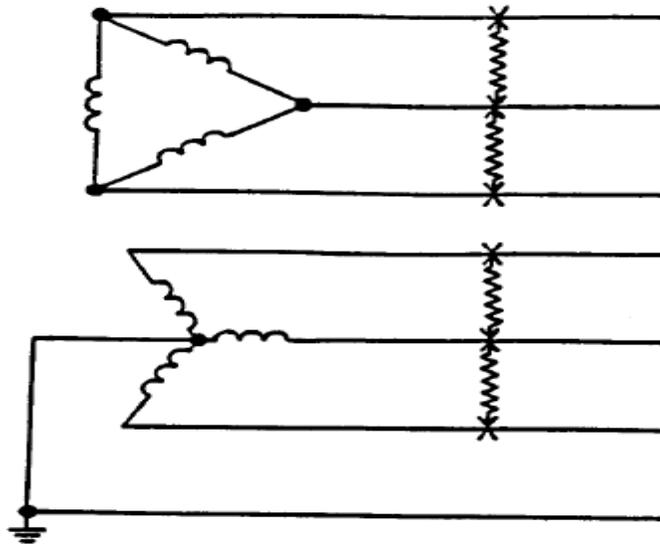


Figura 1.1. Cortocircuito trifásico.

Línea a Línea: Los cortocircuitos bifásicos consisten en el contacto de dos fases entre sí (Figura 1.2), esta falla es más común que la falla trifásica y el valor de la corriente representa aproximadamente el 87% de la corriente de falla trifásica. [15, 16, 20-22]

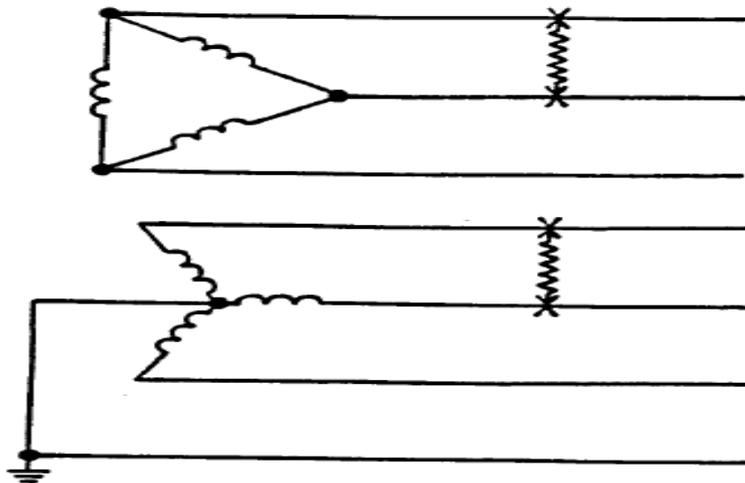


Figura 1.2. Cortocircuito bifásico o de línea a línea.

Línea-Línea a Tierra: En este tipo de cortocircuito, dos de las fases toman contacto entre sí con tierra en el punto de fallo (Figura 1.3), por lo general esta es una falla de línea a tierra que ha evolucionado hasta incluir un segundo conductor y el valor de la corriente se encuentra entre la falla bifásica y la trifásica. [15, 16, 20-22]

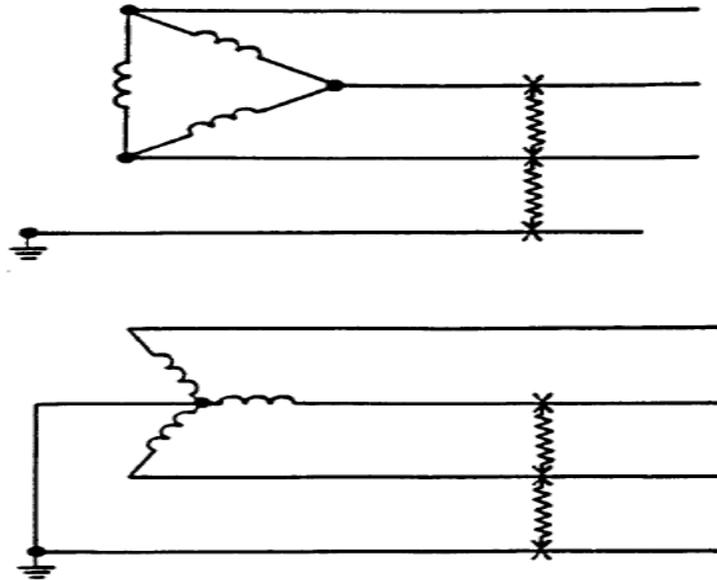


Figura 1.3. Cortocircuito línea-línea a tierra.

Línea a Tierra: El cortocircuito monofásico (contacto de una fase a tierra) es responsable de la mayor cantidad de cortocircuitos en el sistema (Figura 1.4). Las corrientes de cortocircuito tienen valores desde cerca de cero para los sistemas aislados hasta un valor ligeramente superior a la falla trifásica para los sistemas sólidamente aterrados, también depende de la impedancia de retorno por tierra. [15, 16, 20-22]

El contacto línea a tierra como se puede observar en la (Figura 1.4) no siempre se convierte en un cortocircuito, cuando el neutro de los transformadores de línea se encuentra aislado de tierra o cuando el sistema es una delta aislada este contacto no provoca un cortocircuito. [23]

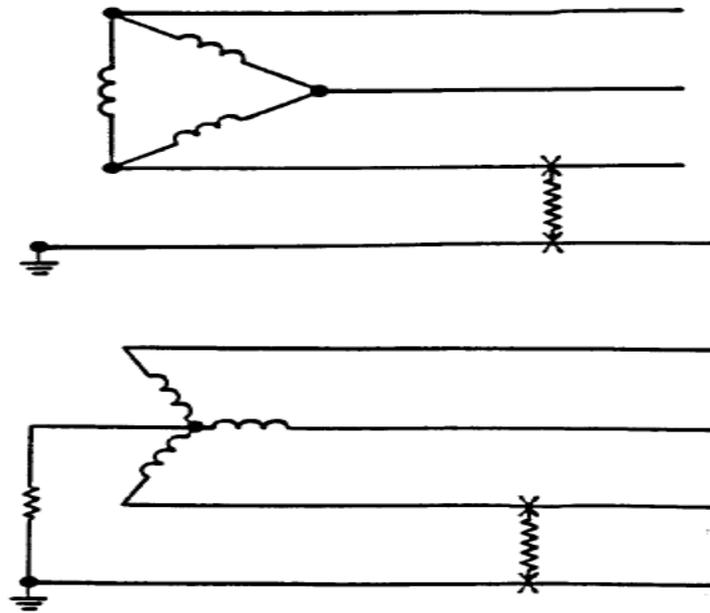


Figura 1.4. Cortocircuito línea a tierra.

Doble contacto a tierra: En redes con neutro aislado o puesta a tierra con impedancias de gran valor, puede aparecer el cortocircuito por doble contacto a tierra (Figura 1.5), es decir, el primer contacto a tierra no provoca cortocircuito, es el segundo contacto siempre y cuando afecte a otro conductor activo el que provoca el cortocircuito. Este cortocircuito presenta valores de corriente inferiores al resto de los cortocircuitos. [19, 24, 25]

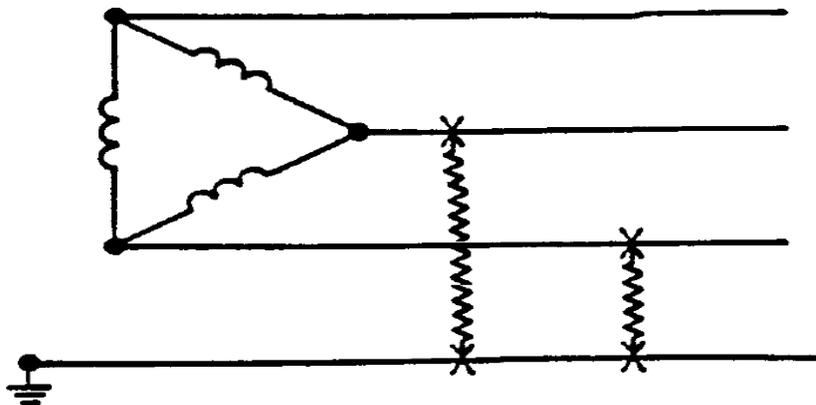


Figura 1.5. Cortocircuito doble contacto a tierra.

Los cortocircuitos trifásicos en muchos casos resultan ser los más dañinos sin embargo, existen importantes excepciones, por ejemplo las corrientes de

cortocircuito de línea a tierra pueden superar los niveles de cortocircuito trifásico cuando se producen en las proximidades de: [6]

- Una máquina sincrónica sólidamente aterrada a tierra.
- El lado estrella de un transformador delta-estrella sólidamente aterrado.
- El lado estrella aterrada de un autotransformador delta-estrella.
- La estrella aterrada, delta-terciaria de un transformador de tres devanados.

1.3 Fuentes que contribuyen al cortocircuito.

Cuando se calcula la corriente de cortocircuito es extremadamente importante que todas las fuentes de corriente al cortocircuito sean tenidas en cuenta y que a la vez sean conocidas sus reactancias, existen tres fuentes básicas de corriente al cortocircuito: [3, 5, 10, 25]

- Los Generadores o el Sistema de Suministro.
- Los Motores y Condensadores Sincrónicos.
- Los Motores de Inducción.

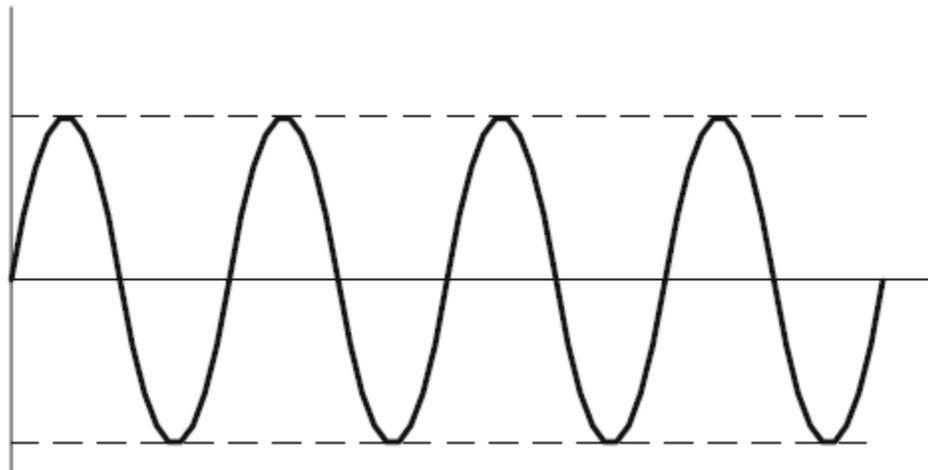


Figura 1.6. El sistema de suministro.

El sistema de suministro (Figura 1.6).

Las empresas de distribución por lo general proporcionan información acerca de los valores de cortocircuito en los puntos de entrega, esta es la mayor fuente de

corriente de cortocircuito pues solo está limitada por la impedancia del transformador principal. Esta corriente no decrece con el tiempo. [8]

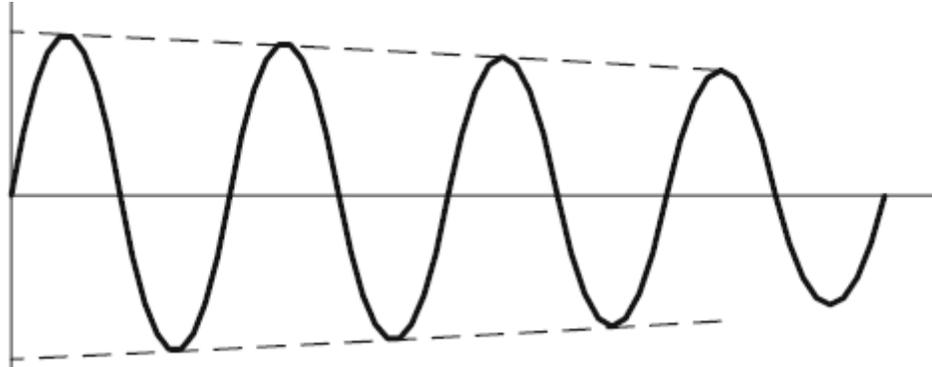


Figura 1.7. El generador.

El generador (Figura 1.7).

En muchas industrias ya sea por economía o ubicación los generadores reemplazan a la compañía suministradora, en caso de cortocircuito estos continúan produciendo tensión pues continua teniendo excitación de campo y además el motor primario continua rodando, esta corriente generada solo está limitada por la reactancia de la máquina y la impedancia presente entre la falla y el generador. Esta corriente decrece con el tiempo.

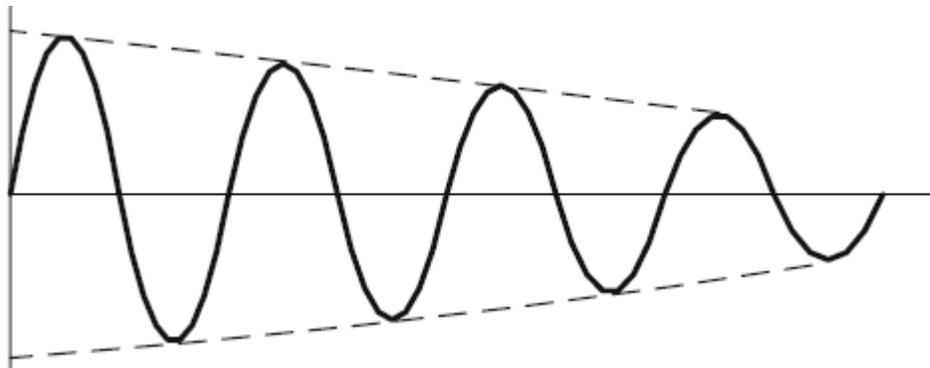


Figura 1.8. El motor sincrónico.

El motor sincrónico (Figura 1.8).

Al establecerse el cortocircuito la tensión se reduce y el motor sincrónico se desacelera, la inercia de la carga y la excitación lo mantienen entregando corriente por muchos ciclos después de la falla. Esta corriente decrece con el tiempo.

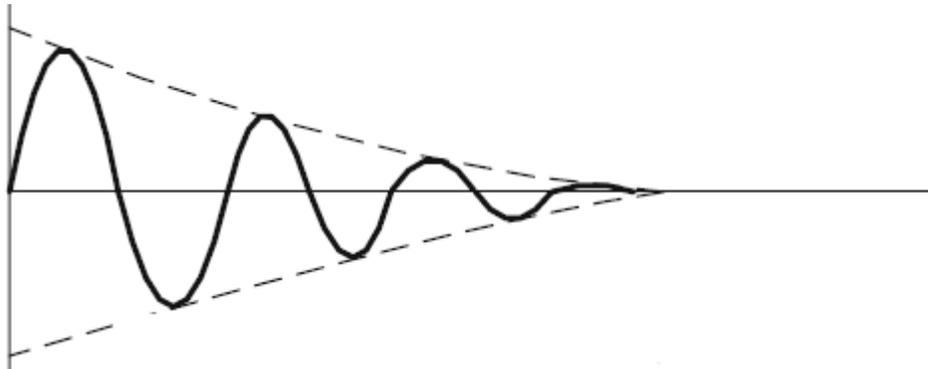


Figura 1.9. El motor asincrónico.

El motor asincrónico (Figura 1.9).

Al establecerse el cortocircuito la tensión se reduce y el motor asincrónico se desacelera, la inercia de la carga y el flujo del rotor lo mantienen entregando corriente por algunos ciclos después de la falla. Esta corriente decrece con el tiempo.

1.3.1 La reactancia en las máquinas rotativas.

En las máquinas rotativas de corriente alterna generalmente la impedancia puede modelarse como una reactancia inductiva debido a la naturaleza inductiva de sus enrollados, por lo que generalmente se consideran tres reactancias asociadas a cada uno de los intervalos en los que por facilidad para los cálculos se divide la falla: [3, 5, 6, 16, 26]

- La reactancia subtransitoria X_d'' que es la reactancia aparente del enrollado del estator en el instante del cortocircuito y determina el flujo de corriente en los primeros 30 ciclos (hasta $\frac{1}{2}$ segundo) aproximadamente, este intervalo es llamado "Período subtransitorio".

- La reactancia transitoria X' que determina la corriente durante el período siguiente al subtransitorio y abarca el rango de tiempo entre $\frac{1}{2}$ y 2 segundos después de la ocurrencia del cortocircuito, este intervalo es llamado “Período transitorio”
- La reactancia sincrónica X_s , la cual determina el flujo de corriente cuando se establece el período estacionario, este intervalo es llamado “Período estable”.

1.4 Corrientes de cortocircuito.

Las corrientes de cortocircuito pueden ser simétricas y asimétricas. La palabra simétrica describe el desplazamiento de la onda de corriente alterna del eje cero. Cuando la onda de la corriente es simétrica con respecto al eje cero, entonces esta es llamada “corriente simétrica” (Figura 1.10); si por el contrario no es simétrica con respecto al eje cero es llamada “corriente asimétrica” (Figura 1.11).

[1, 24]

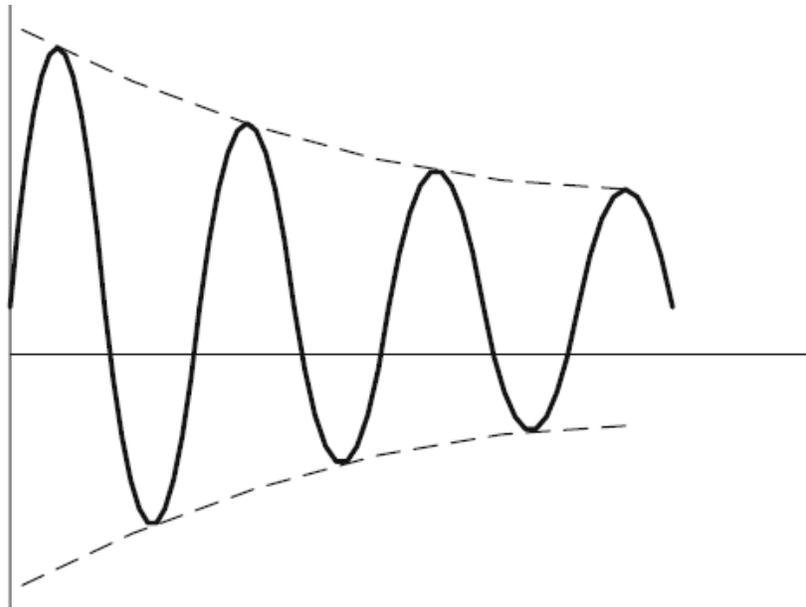


Figura 1.10. Forma de onda simétrica formada por la contribución de todas las fuentes.

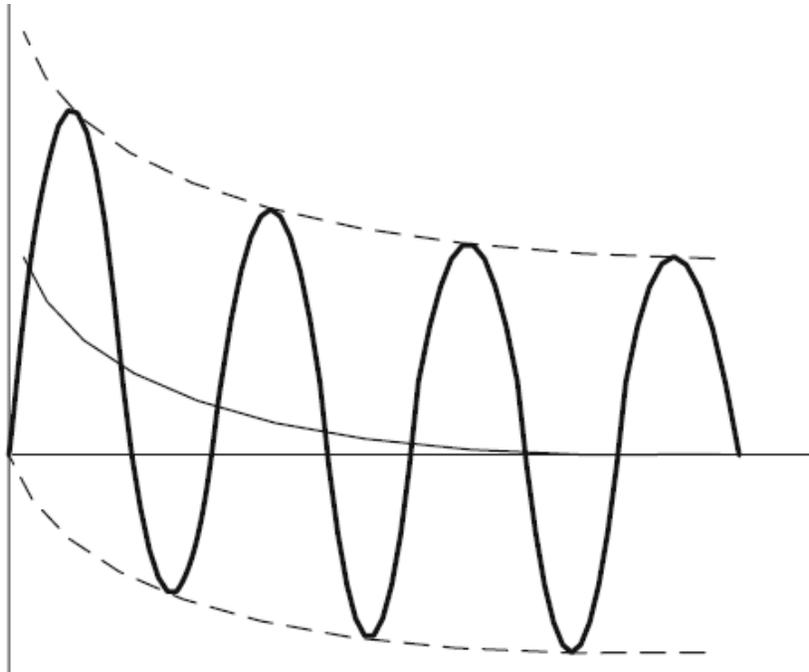


Figura 1.11. Forma de onda asimétrica formada por la contribución de todas las fuentes incluyendo la componente de corriente directa.

En un circuito que solo contenga reactancia, si el cortocircuito ocurre en el pico de la forma de onda de voltaje, la forma de onda de corriente va a ser simétrica respecto al eje cero (Figura 1.12), ahora si el cortocircuito ocurre a voltaje cero, la forma de onda de corriente va a ser asimétrica respecto al eje cero (Figura 1.13). Si la falla ocurre en un punto entre cero y el valor pico de onda de voltaje, la forma de onda va a resultar asimétrica en dependencia del punto de la forma de onda de voltaje en el que el cortocircuito ocurra. En circuitos que contengan reactancias y resistencias el grado de asimetría puede variar entre cero y el valor para el caso del circuito con solo reactancia. En cualquier punto de la forma de onda de voltaje donde ocurra el cortocircuito, el valor máximo de la corriente asimétrica de cortocircuito depende de la relación entre la reactancia y la resistencia del circuito. [1, 3]

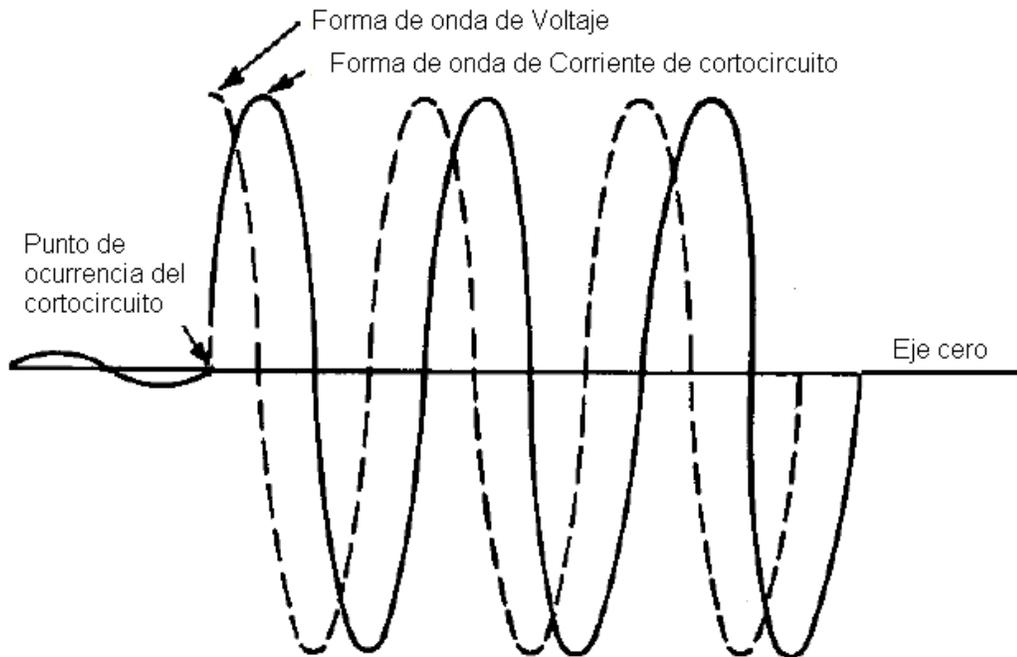


Figura 1.12. Forma de onda de corriente de cortocircuito simétrica.

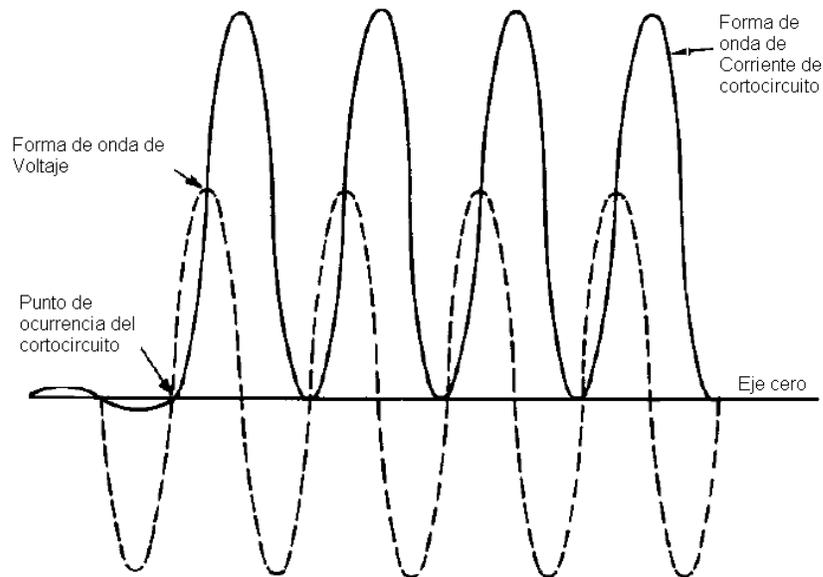


Figura 1.13. Forma de onda de corriente de cortocircuito asimétrica.

Para facilitar el cálculo de la corriente de cortocircuito asimétrica esta es tratada en dos componentes, una es la componente simétrica de corriente alterna y la otra es la componente de corriente directa. La suma de estas dos componentes

en cualquier instante es igual a la magnitud de la corriente asimétrica en ese mismo instante. La figura 1.14 muestra estas características de corriente asimétrica. [1, 3]

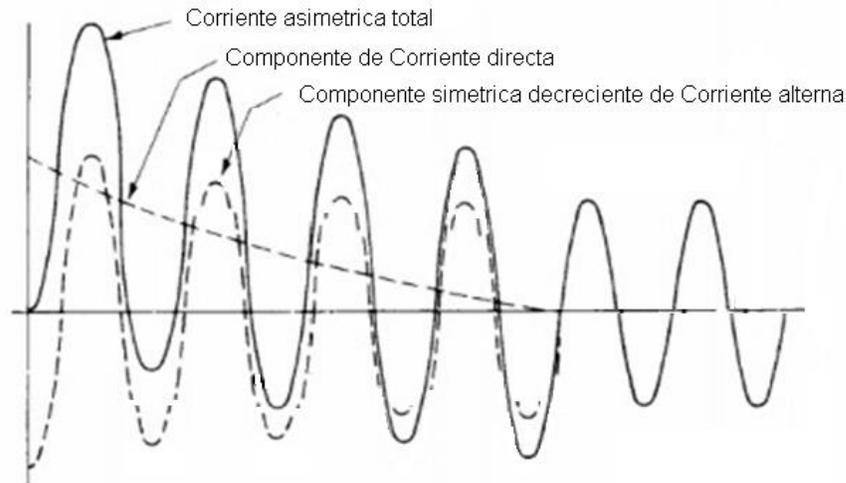


Figura 1.14. Corriente de cortocircuito asimétrica.

1.5 Normas de referencia usadas en el cálculo de cortocircuitos.

Internacionalmente existen dos normas principales que definen el procedimiento en los cálculos de corrientes de cortocircuito, la IEC 60909 está respaldada por la IEC en Europa y la ANSI C37 está respaldada por la ANSI/IEEE en Estados Unidos. Estas normas son usadas en estos países y en otros que por influencia tecnológica, las han adoptado. [1, 12, 17, 27]

Estas normas tienen diferencias fundamentales (modelo matemático, procedimiento de cálculo, etc.) que originan resultados diferentes, estas diferencias deben ser comprendidas para poder evaluar el impacto técnico-económico de la utilización de una u otra norma.

Como se menciona anteriormente para facilitar el cálculo de la corriente asimétrica de cortocircuito esta es tratada en dos componentes, una es la componente simétrica de corriente alterna y la otra es la componente de

corriente directa, la modelación y determinación del decaimiento de estas componentes tiene una gran complejidad, ahora si se adoptan simplificaciones teniendo en consideración suposiciones sobre los modelos de los componentes, entonces se disminuye esta complejidad. [1, 3, 28]

1.5.1 Corrientes consideradas.

Cada norma considera y nombra unos tipos de corriente de falla.

Tipos de corriente por la norma ANSI/IEEE.

La norma ANSI/IEEE para facilitar los cálculos define tres tipos de falla, asociada con tres intervalos de tiempo durante el tiempo que está presente la falla y formada con los valores de reactancia de los elementos de la red. En estas tres redes se diferencian en el valor de la reactancia de las máquinas rotativas.

Corriente de primer ciclo: Es el valor de la corriente medio ciclo después que se presenta la falla, en esta red está asociada a la reactancia subtransitoria, no considera que haya comenzado los decaimientos de corriente alterna ni los de corriente directa, esa corriente también es llamada “momentánea” o de “cierre sobre falla”. [1]

Corriente de interrupción: Es la corriente que está presente desde uno y medio ciclo hasta cuatro ciclos, esta red está asociada a la reactancia transitoria y los decaimientos de corriente alterna y corriente directa, esta corriente también es llamada de régimen de interrupción o de apertura. [1]

Corriente de cortocircuito de estado estable: Es la corriente que está presente treinta ciclos después de ocurrida la falla y considerando que los interruptores no han operado, esta red está asociada a la reactancia sincrónica y considera que ya no existen los decaimientos de corriente alterna y corriente directa. [1]

Tipos de corriente por la norma IEC.

Corriente de cortocircuito simétrica inicial (I''_k): Es el valor rms de la componente de corriente alterna de cortocircuito simétrica en el $t=0$. [28]

Pico (I_p): Es el valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito incluyendo la componente de corriente directa. [28]

Ruptura o interrupción (I_b): Es el valor rms de un ciclo completo de la componente de corriente alterna de cortocircuito disponible en el instante de la separación de los contactos del primer polo de un interruptor. [28]

Estado permanente (I_k): Es el valor rms de la corriente de cortocircuito que permanece después del decaimiento del fenómeno transitorio. [28]

La tabla 1.1 lista lo que pudiera considerarse una correspondencia entre estos tipos de corrientes, aunque cualitativamente sean diferentes, como se podrá apreciar en el tercer capítulo.

Tabla 1.1. Tipos de corrientes según IEC y ANSI.

Corriente ANSI	Corriente IEC
Primer ciclo.	Corriente de corto circuito simétrica inicial (I''_k)
	Pico (i_p)
Interrupción.	Ruptura (I_b)
Estado estable.	Estado Permanente (I_k)

1.5.2 Modelación del decaimiento de la componente de corriente alterna.

El decaimiento de la componente de corriente alterna está relacionado a la tendencia de las máquinas de incrementar su reactancia, desde la reactancia

subtransitoria, pasando por la reactancia transitoria hasta la reactancia sincrónica. [1, 27]

La norma ANSI recomienda factores de multiplicación (Tabla 1.2) para las reactancias subtransitorias y transitorias, estos factores dependen del tipo de red que se esté analizando, el voltaje de la red, del tamaño de la maquina rotativa en caballos de fuerza (HP) y de su velocidad en revoluciones por minuto (rpm), para el caso de los generadores se usan curvas en dependencia de si el generador es considerado local o remoto (Figura 1.15). [1, 27]

Tabla 1.2 Factores de multiplicación para la reactancia de las Máquinas Rotativas. [1]

Tipo de máquina	Medio y alto voltaje	Bajo voltaje
Red de primer ciclo.		
Todos los turbogeneradores, hidrogeneradores con devanado amortiguador y condensadores sincrónicos.	$X''d$	$X''d$
Hidrogeneradores sin devanado amortiguador.	$0,75 X''d$	$0,75 X''d$
Motores sincrónicos.	$X''d$	$X''d$
Motores de inducción Grandes.		
Mayores de 1000 HP.	X''	X''
Mayores de 250 HP, 3600 rpm.	X''	X''
Motores de inducción Medios.		
Demás motores por encima de 50 HP.	$1,2 X''$	$1,2 X''$

Motores de inducción Pequeños.		
Menores de 50 HP.	-	X''
Red de Interrupción.		
Todos los turbogeneradores, hidrogeneradores con devanado amortiguador y condensadores sincrónicos.	$X''d$	N/A
Hidrogeneradores sin devanado amortiguador.	$0,75 X''d$	N/A
Motores sincrónicos.	$1,5 X''d$	N/A
Motores de inducción Grandes.		
Mayores de 1000 HP.	$1,5 X''$	N/A
Mayores de 250 HP, 3600 rpm.	$1,5 X''$	N/A
Motores de inducción Medios.		
Demás motores por encima de 50 HP.	$3 X''$	N/A
Motores de inducción Pequeños.		
Menores de 50 HP.	-	N/A

La norma IEC modela el decaimiento de corriente alterna considerando el tipo de máquina, el tamaño en Megawatt (MW), la velocidad y la proximidad de la máquina a la falla, las máquinas rotativas son consideradas como cercana o lejana a la falla para cuantificar el aporte de estas al cortocircuito. [27, 28]

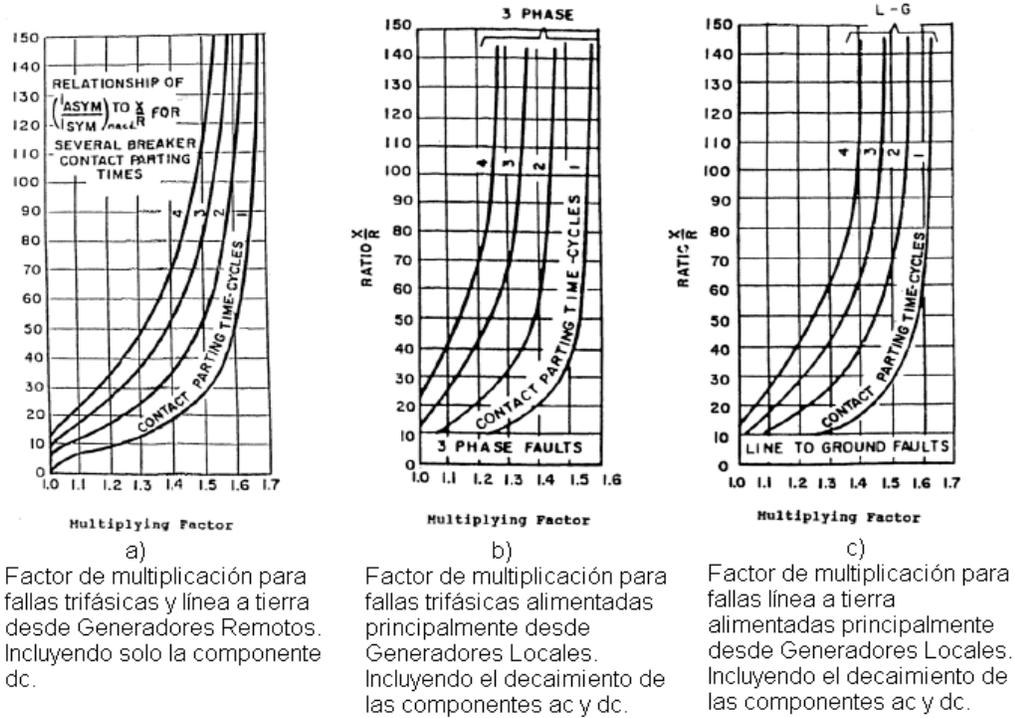


Figura 1.15 Factores de multiplicación para Generadores.

1.5.3 Modelación del decaimiento de la componente de corriente directa.

El decaimiento de la componente de corriente directa está relacionado con el valor de la onda de voltaje cuando ocurre el cortocircuito y con las propiedades de amortiguamiento (relación X/R) del circuito interrumpido.

La norma ANSI al igual que para el decaimiento de corriente alterna recomienda factores de multiplicación de la corriente simétrica de falla para obtener las asimétricas. Estos factores de multiplicación son función de la relación X/R y del tiempo de apertura de los contactos del interruptor. Para facilitar los cálculos se crea una red de reactancia para hallar la reactancia equivalente y otra de resistencias para hallar la resistencia equivalente y con ellas calcular la relación X/R en el punto de falla. [1, 27, 29].

La norma IEC modela el decaimiento de corriente directa considerando más de una relación X/R . [27, 28]

1.5.4 Voltajes de prefalla.

La norma ANSI recomienda un voltaje de prefalla de 1.0 en p.u o usar el voltaje que existe en la barra, previo cálculo del voltaje existente después de correr el flujo de potencia. [1, 27, 29]

La norma IEC usa el procedimiento del voltaje equivalente y recomienda usar factores de multiplicación (Tabla 1.3) en fin de obtener el voltaje de prefalla. Estos factores de multiplicación se dan para dos condiciones de cálculo, una para cálculo del máximo valor de corriente de cortocircuito y para el mínimo valor de corriente de cortocircuito y tienen en consideración el nivel de voltaje, el estado de carga antes del fallo, la posición de los taps del transformador y el tipo de excitación de los generadores. [27-29]

Tabla 1.3 Factores de voltaje de prefalla.

Voltaje nominal	C _{máx}	C _{mín}
Bajo voltaje (100 V a 1000 V)		
230/400	1	0,95
Demás	1,05	1
Medio voltaje (1000 V a 35 kV)	1,10	1
Alto voltaje (35 kV a 230 kV)	1,10	1

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1 Introducción al capítulo.

En el presente capítulo se describen las configuraciones típicas recomendadas por el Instituto Americano del Petróleo (API) para la Industria del Petróleo, así como de ellas la utilizada en la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” de la provincia Cienfuegos, se definen los escenarios de operación del sistema eléctrico que conllevan a las condiciones extremas de operación para el cálculo de las corrientes de cortocircuito y se describe el programa que se usó para los cálculos del capítulo tres.

2.2 Características de los Sistemas Eléctricos en la Industria de Petróleo.

La Industria del Petróleo es de las industrias que trabajan “7x24”, es decir las 24 horas del día, los siete días de la semana. El arranque de una Refinería es un proceso que puede tardar entre ocho y veinticuatro horas, pues conlleva la estabilización de los procesos químicos, por lo que se hace vital evitar las paradas por fallo del equipamiento y de la red eléctrica. Estas características típicas de estas industrias obligan a definir diseños y esquemas que mitiguen los efectos de estos fallos. [2, 8]

Estos diseños definen esquemas de operación con equipamiento redundante para eliminar el riesgo de parada por fallo del equipamiento, es importante señalar que todo el equipamiento no es redundante, solo es redundante el equipamiento que fue definido como vital. [2, 8]

Los esquemas que se utilizan son esquemas que utilizan más de una fuente de suministro para en caso del fallo de una fuente el equipamiento pueda continuar funcionando desde la otra fuente. [2, 8]

2.2.1 Localización de las subestaciones.

Al igual que en muchas industrias la mayor consideración en referencia a la ubicación de una subestación es la económica. La subestación de distribución

y/o de transmisión debe situarse tan cerca como sea posible de las cargas que esta alimenta, siempre y cuando esta cercanía mantenga la ubicación de la subestación en una zona desclasificada. Ubicar la subestación en una zona clasificada trae elevación de los costos pues la construcción de la parte civil es diferente, además hay que desclasificar el área interior de la subestación o comparar equipamiento certificado para trabajar en zonas clasificadas. [2]

2.2.2 Configuraciones aceptadas.

Las configuraciones de los sistemas eléctricos en la Industria del Petróleo establecen para el escenario de alimentación eléctrica desde líneas de transmisión sin generación interna, dos configuraciones, estas dos configuraciones se muestran en las figuras 2.1 y 2.2. Escoger entre una u otra configuración solo es una cuestión técnico-económica. [2]

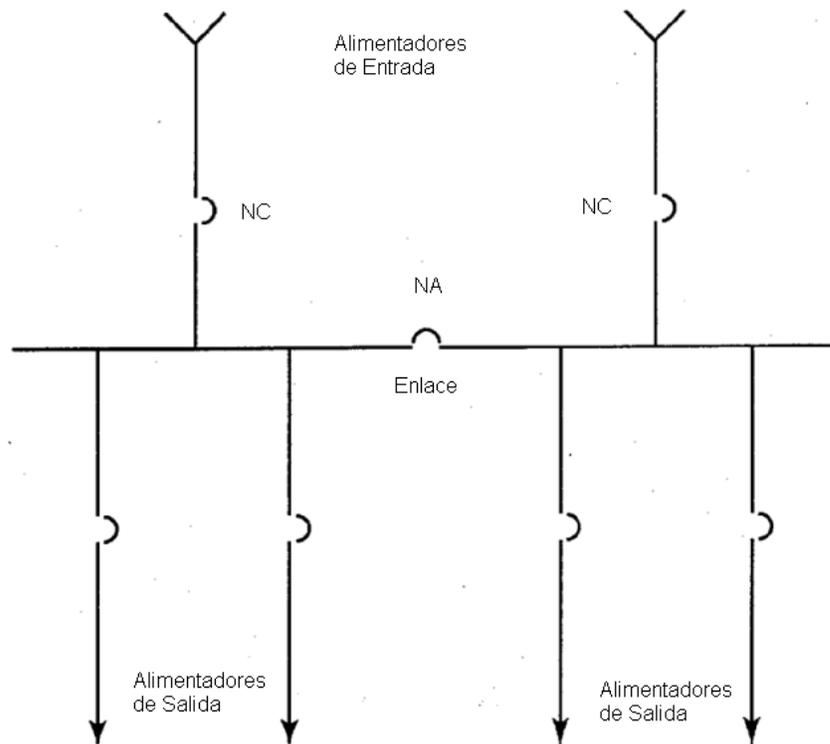


Figura 2.1. Operación con alimentadores divididos.

Para la distribución de energía eléctrica dentro de la industria existen 4 configuraciones típicas: radial, radial con primario-selectivo, radial con

secundario-selectivo y paralelo con secundario-selectivo. La selección de una u otra configuración depende de factores como: la continuidad del servicio, flexibilidad, regulación, eficiencia, costos de operación, costos de inversión y disponibilidad de la fuente de potencia. Cada una de estas configuraciones se describe a continuación. [2]

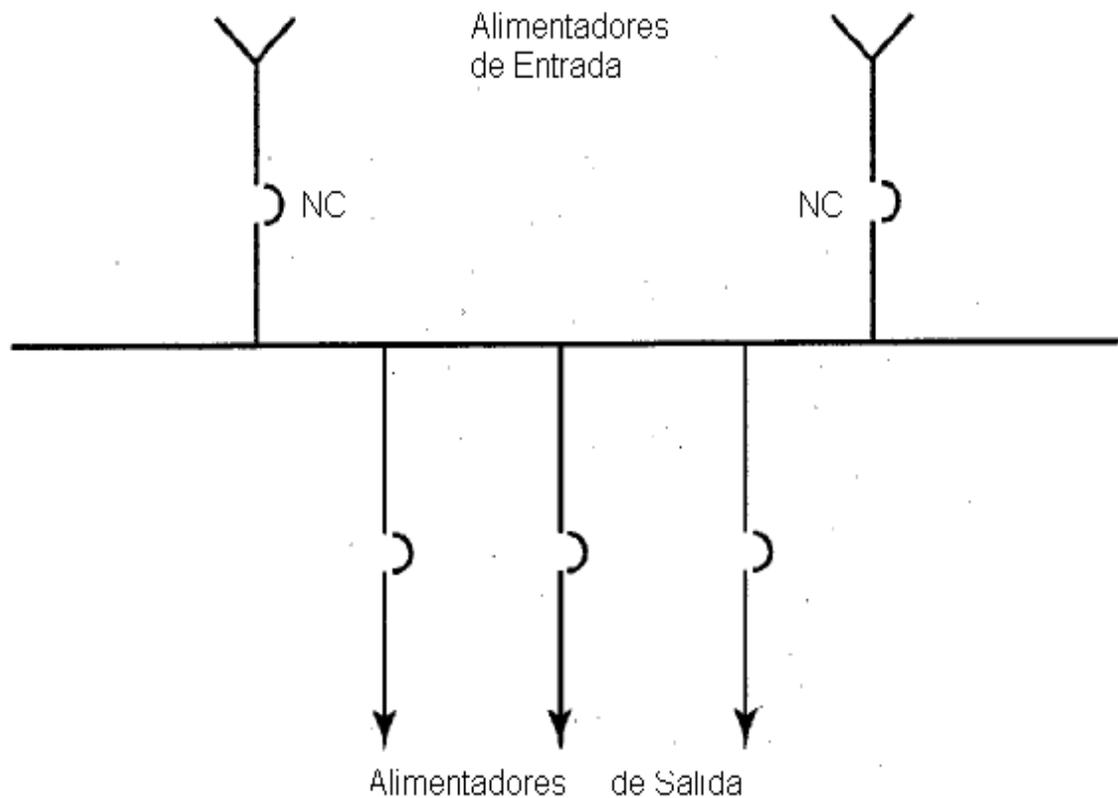


Figura 2.2. Operación con alimentadores en paralelo.

Sistema Radial simple. (Figura 2.3).

El más simple de los sistemas para entenderlo, operarlo y resolver averías es el sistema radial simple. Este es el sistema más barato de instalar pero tiene la gran desventaja que no proporciona una fuente de potencia alternativa, es decir

en caso de fallo del interruptor primario, cable, transformador o interruptor secundario todo el proceso se detendría.

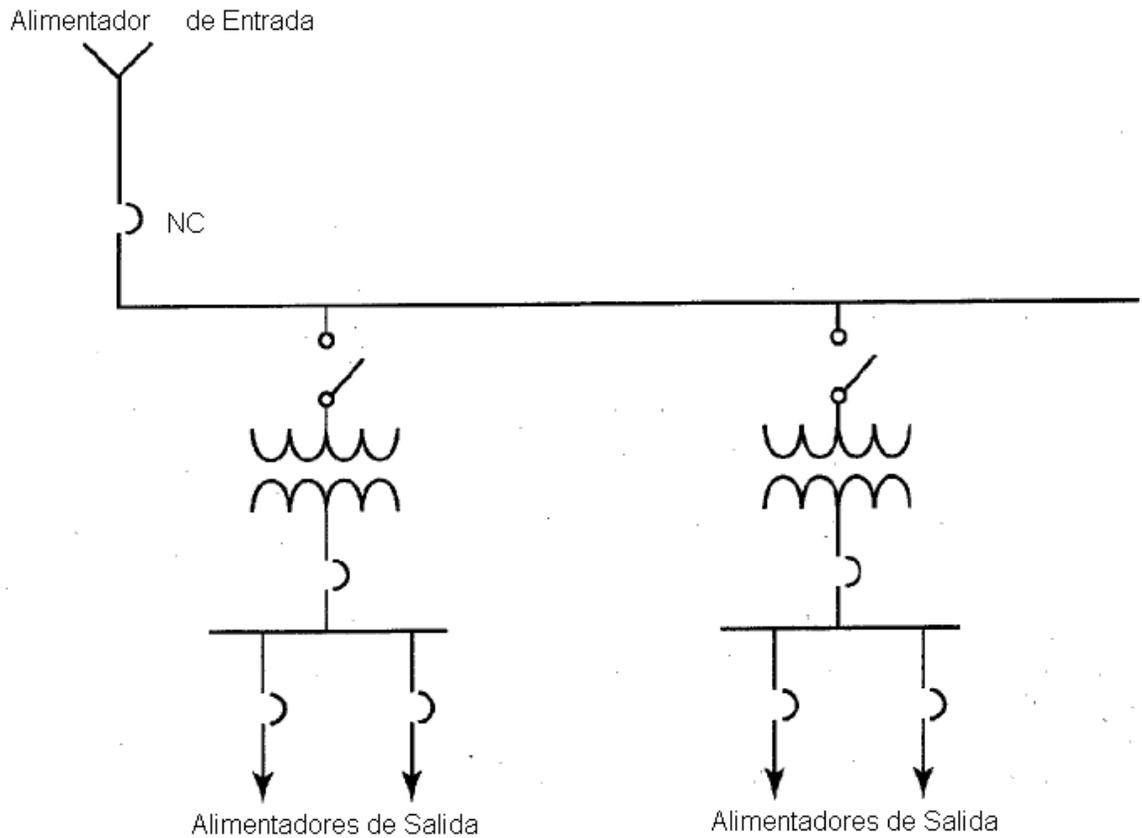


Figura 2.3 Sistema radial simple.

Sistema radial con primario selectivo (Figura 2.4).

Este sistema se derivó del sistema radial simple para solucionar la desventaja referente a una segunda fuente de potencia y también soluciona los casos donde la mayor cantidad de interrupciones se deben a las averías en las líneas, pero mantiene la detención de todo el proceso para una avería en el transformador o en el interruptor secundario.

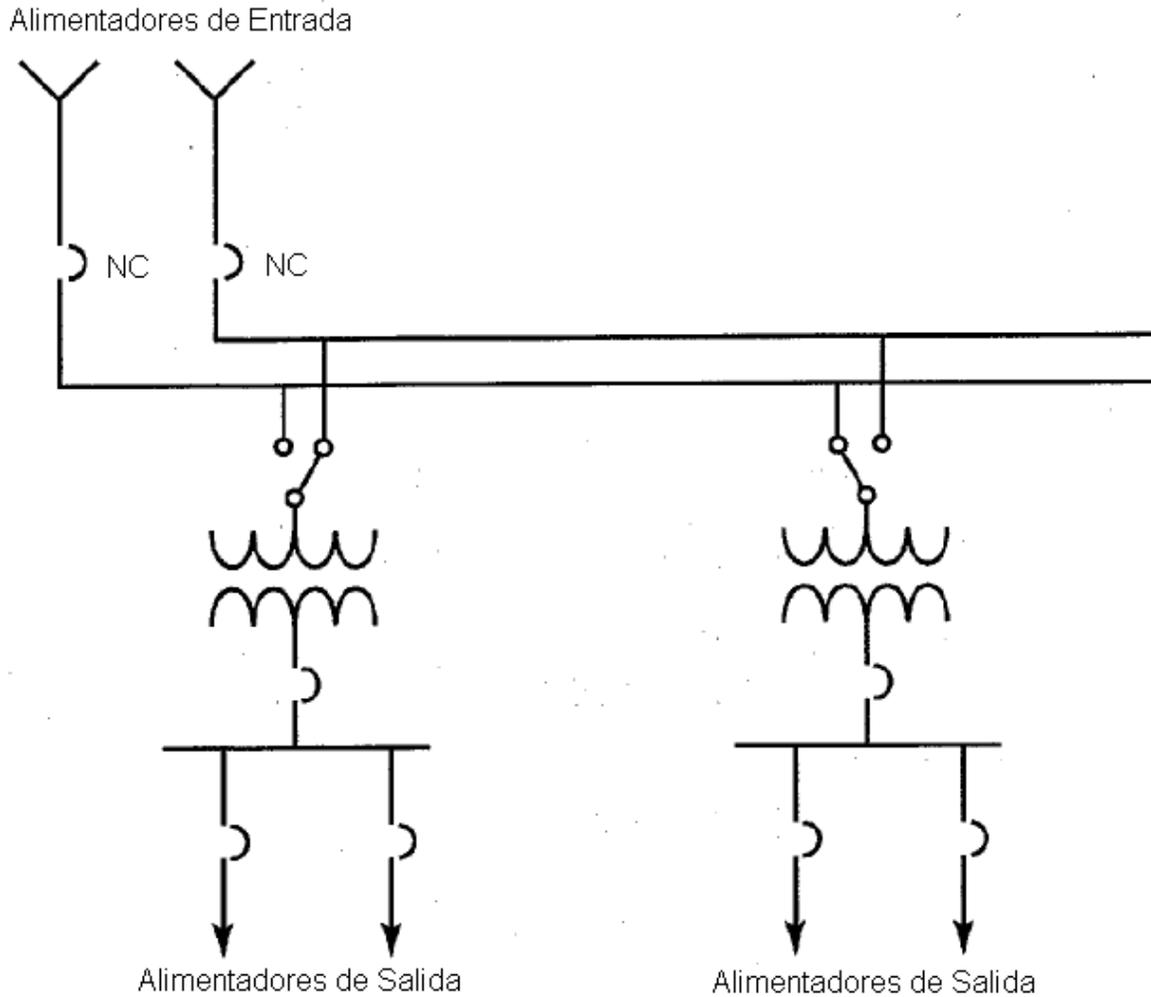


Figura 2.4 Sistema radial con primario selectivo.

Sistema radial con secundario selectivo (Figura 2.5).

Este sistema proporciona continuidad del servicio pues si bien una falla en un cable, transformador, interruptor secundario ocasiona al igual que en los dos sistemas anteriores una detención del proceso, este puede restaurarse rápidamente a través del interruptor de enlace de forma manual o automática. Comparado con los sistemas anteriores este sistema tiene un mayor costo de inversión.

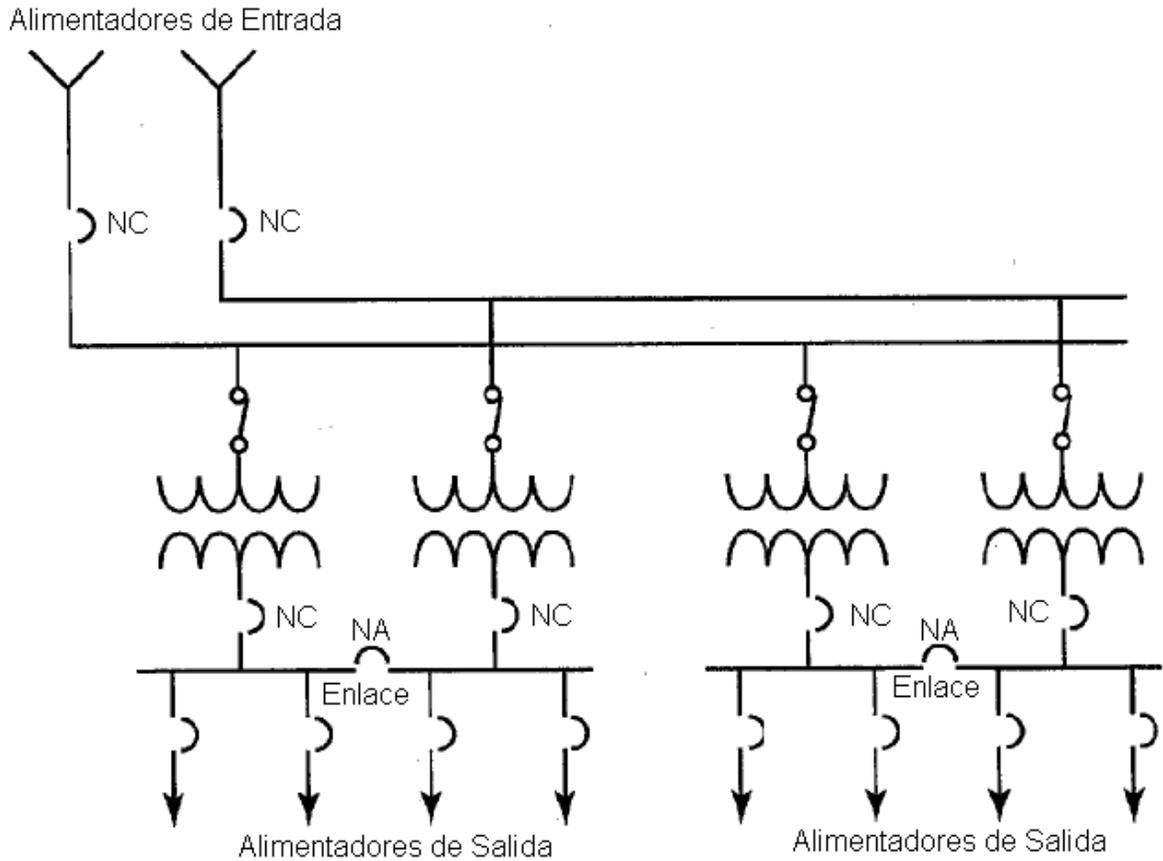


Figura 2.5 Sistema radial con secundario selectivo.

Sistema paralelo con secundario selectivo (Figura 2.6).

Este sistema proporciona un servicio ininterrumpido a todas las cargas. El interruptor de enlace se encuentra normalmente cerrado y el fallo de una de las alimentaciones no interrumpe el suministro eléctrico a ninguna de las cargas. Esta configuración es la más compleja y costosa, pero se justifica en los casos donde la interrupción del servicio es muy costosa o tiene grandes consecuencias. Hay que tener en consideración que un disturbio en uno de los bus puede afectar a las cargas conectadas en el otro bus, además el equipamiento tiene que estar dimensionado teniendo en consideración las dos fuentes de potencia alimentando la falla.

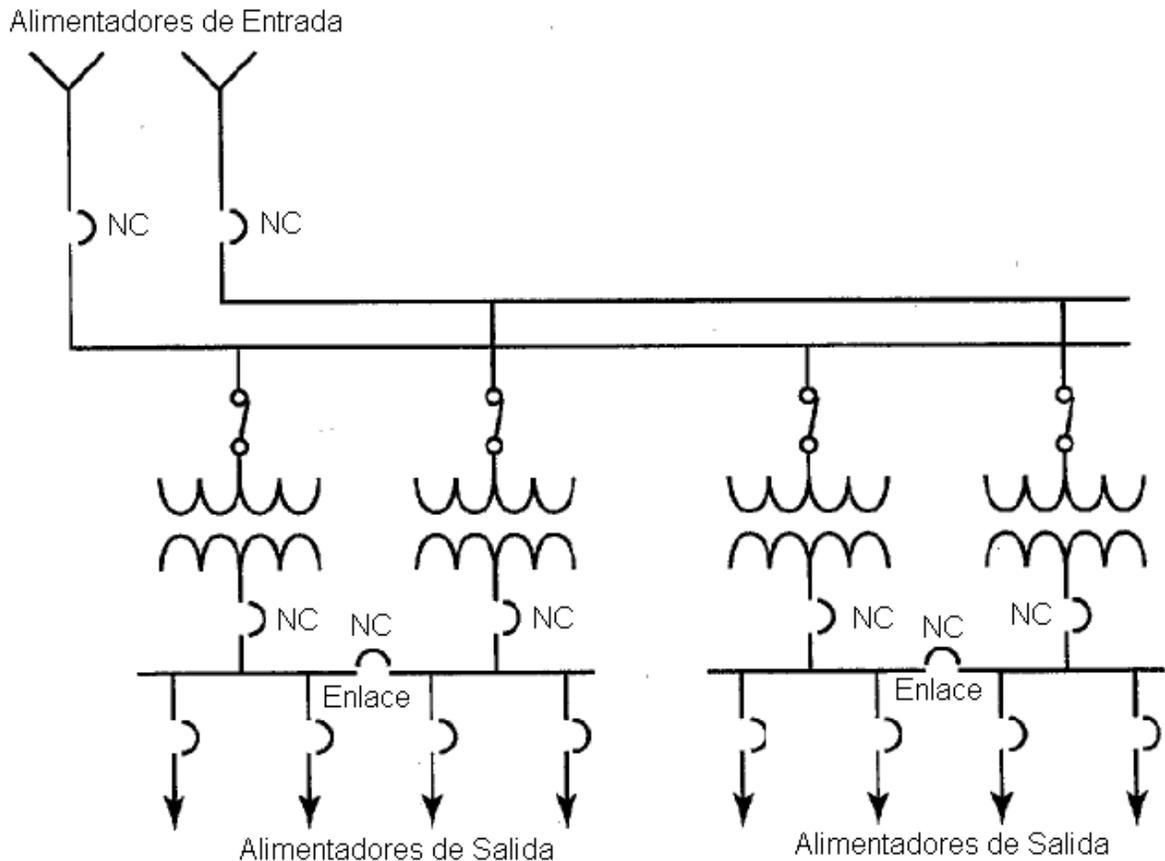


Figura 2.6 Sistema paralelo con secundario selectivo.

2.3 Descripción del circuito en estudio.

La subestación principal, perteneciente a la Refinería “Camilo Cienfuegos”, tiene la función de suministrar energía eléctrica a un grupo de cargas y de distribuir a un grupo de subestaciones, está alimentada por dos líneas de 110kV provenientes una de la Subestación Cantarrana 220/110kV y la otra de la Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

Posee dos transformadores de potencia de 110/6.3/6.3 kV, inmersos en aceite con una capacidad de 20/25 MVA a 65° con enfriamiento por aire natural (AN) y forzado (AF) y operan con cambiador de tomas bajo carga en el lado de alta tensión.

La configuración seleccionada para la distribución eléctrica fue el radial con secundario selectivo, pues se tuvo en consideración que en una Refinería el equipamiento vital se encuentra redundante y en caso de fallo de algún bus se conectarían los equipos de reserva que se encuentran en el otro bus. Esta configuración puede ser encontrada en las subestaciones de distribución de 6kV, en las subestaciones transformadores de 6kV a 0.48kV y en los Centro de control de motores, en caso de falla de la energía eléctrica la entrada del enlace puede escogerse entre manual y automático pero en las subestaciones de 6 kV cuando retorna la energía eléctrica la conexión de la entrada fallida y la desconexión del enlace es manual debido a que los transformadores de potencial se encuentran en la barra.

El estudio de cortocircuito va a contemplar todas las cargas que operan en un día típico de operación pero los cálculos se van a limitar a las subestaciones de 6kV.

2.4 Definición de las condiciones de operación del sistema eléctrico.

Para definir las condiciones de operación del sistema eléctrico se asumen las siguientes consideraciones:

Los valores máximos de cortocircuito en cada barra se tienen considerando los máximos aportes, es decir desde la fuente de alimentación con mayor valor máximo de cortocircuito y el mayor aporte de las máquinas rotativas de la industria a esa barra.

Los valores mínimos de cortocircuito en cada barra se tienen considerando los mínimos aportes, es decir desde la fuente de alimentación con menor valor mínimo de cortocircuito y sin el aporte de las máquinas rotativas de la industria a esa barra.

El estudio de cortocircuito debe tener en cuenta las siguientes condiciones de operación del sistema eléctrico: [8]

- Operando como sistema radial, es decir en condiciones normales de operación, todos los interruptores de enlace abiertos y considerando todas las fuentes de contribución a la falla.
- Operando como sistema radial con secundario selectivo, es decir en condiciones de operación con una sola fuente de alimentación con el interruptor de enlace cerrado, considerando la fuente de mayor aporte de corriente de cortocircuito.
- Operando como sistema radial con secundario selectivo, es decir en condiciones de operación con una sola fuente de alimentación con el interruptor de enlace cerrado, considerando la fuente de menor aporte de corriente de cortocircuito.

Se considera como entrada #1 la alimentación eléctrica desde la subestación de Cantarrana y se considera como entrada #2 la alimentación eléctrica desde la subestación de salida de la Planta de Generación Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, más conocida como CMC.

Teniendo en consideración los valores máximo y mínimos de cortocircuito en cada entrada de la Refinería, se seleccionó un escenario para cada condición de operación del sistema eléctrico, para cada escenario se tuvo en consideración como factores de peso los valores de cortocircuito de cada entrada y la cantidad de barras que aportaban al cortocircuito.

Escenarios para los valores máximos.

Variante 1: Operación normal teniendo en consideración los valores máximos de cortocircuito desde cada entrada.

Variante 2: Operación desde la entrada #1 y enlace cerrado teniendo en consideración los valores máximos de cortocircuito desde esta entrada.

Variante 3: Operación desde la entrada #2 y enlace cerrado teniendo en consideración los valores máximos de cortocircuito desde esta entrada.

En este escenario fue seleccionada la variante 3 pues es la que tiene el mayor valor de cortocircuito desde la fuente de alimentación (CMC) y al estar el enlace cerrado tiene el aporte de las cargas de las dos barras, esta variante será

llamada escenario de máximo valor, estos valores son importantes a la hora de seleccionar los interruptores en cada subestación.

Escenarios para los valores mínimos.

Variante 1: Operación normal teniendo en consideración los valores mínimos de cortocircuito desde cada entrada.

Variante 2: Operación desde la entrada #1 y enlace cerrado teniendo en consideración los valores mínimos de cortocircuito desde esta entrada.

Variante 3: Operación desde la entrada #2 y enlace cerrado teniendo en consideración los valores mínimos de cortocircuito desde esta entrada.

En este escenario fue seleccionada la variante 2 (Cantarrana) pues es la que tiene el menor valor de cortocircuito desde la fuente de alimentación y se considera que no hay aporte de los motores, esta variante será llamada escenario de mínimo valor, estos valores son importantes a la hora de parametrizar las protecciones en cada subestación.

2.5 Modelación del Sistema Eléctrico con el ETAP.

Existen muchos métodos para el cálculo de los sistemas eléctricos de potencia, unos con o sin ordenadores, unos muy exactos otros aproximados, pero en todos se necesita al menos la información primaria del equipamiento involucrado, la configuración de la red y las condiciones de operación.

En el estudio eléctrico para el cálculo de cortocircuito mediante ordenadores primeramente se elabora el diagrama unifilar y posteriormente la modelación del sistema, la cual consiste en la configuración de los equipos y de los escenarios.

El módulo de análisis de cortocircuito del ETAP analiza el efecto de las fallas trifásicas, línea a tierra, línea a línea, y línea a línea a tierra en los sistemas de distribución eléctrica. El programa calcula la corriente total así como las contribuciones individuales de los motores, generadores y enlaces entre las fuentes de suministro. El cálculo de las fallas está en correspondencia con las últimas ediciones de las normas ANSI/IEEE (Serie C37) y las normas IEC (IEC 60909). [30]

2.5.1 Configuración del equipamiento con el ETAP.

En el caso de nuestro sistema en estudio los elementos que se necesitan configurar para obtener los valores de cortocircuito son los siguientes: Fuente de Suministro, Transformadores, Cables, Motores y Cargas. En caso de no contar con la información de los datos de los equipos puede disponer de los valores típicos de la librería del programa. [30]

Red de Potencia (Figura 2.7):

Se establecen los siguientes parámetros: tipo de conexión, configuración, voltaje nominal, valor del cortocircuito trifásico, monofásico y la relación X/R y el tipo de conexión a tierra.

The screenshot shows the 'Power Grid Editor - CMC' window with the 'Short Circuit' tab selected. The source is configured as '110 kV Swing'. The 'Grounding' section shows a Y-grounding symbol. The 'SC Rating' section contains the following data:

	MVA _{sc}	MVA _{sc}	X/R	kA _{sc}
3-Phase	1200		10	6.298
1-Phase	1515.791	505.264	10	7.956
	$\sqrt{3}V_{ll} I_f$	$V_{ln} I_f$		

The 'SC Impedance (100 MVA_b)' section shows the following data:

	% R	% X
Pos.	0.8292	8.29198
Neg.	0.8292	8.29198
Zero	0.31095	3.10948

The bottom of the window features a toolbar with icons for file operations, a dropdown menu set to 'CMC', and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 2.7 Configuración de la fuente de suministro.

Transformadores (Figura 2.8):

Se establecen los siguientes parámetros: tipo y conexión del transformador, potencia, nivel de voltaje por primario y secundario, impedancias de secuencia positiva y cero, % de impedancia y tipo de puesta a tierra.

	Reliability	Remarks	Comment
Info	Rating	Impedance	Tap
	Grounding	Protection	Harmonic

25 12.5 12.5 MVA 110 6.3 6.3 kV

	kV	MVA	Max MVA	FLA	Nom. kV
Prim.	110	25	25	131.2	110
Sec.	6.3	12.5	12.5	1146	6.3
Ter.	6.3	12.5	12.5	1146	6.3

T1

Figura 2.8 Configuración de un transformador.

Cables (Figura 2.9):

Se establecen los siguientes parámetros: longitud, número de conductores, calibre del conductor y dimensiones del conductor.

Induction Machine Editor - P-1240

Cable/Vd Cable Amp Protection Reliability Remarks Comment
 Info Nameplate Imp Model Inertia Load Start Dev Start Cat

1 630 kW 6.3 kV Cable Info not available

Ratings

Design Other

	FL	75 %	50 %	NL	OL
100 %	100 %	75 %	50 %	0 %	100 %
kW	630	472.5	315	0	630
kV	6.3	6.3	6.3	0	6.3
% PF	90	90	90	0	90
kVA	749	561.75	374.5	0	749
FLA	68.62	51.465	34.31	0	68.62
% Eff	93.49	93.49	93.49	0	93.49
%FLA	100	75	50	0	100

% Slip 0.05 RPM 1799 Poles 4 RPM 1800 SF 1

Library... None

Loading

			Motor Load			Feeder Loss	
	Loading Category	% Loading	kW	kW	kvar	kW	kvar
1	Design	100	630	673.9	326.4	0	0
2	Normal	70	441	471.7	228.5	0	0
3	Brake	0	0	0	0	0	0
4	Winter Load	0	0	0	0	0	0
5	Summer Load	0	0	0	0	0	0
6	FL Reject	0	0	0	0	0	0
7	Emergency	0	0	0	0	0	0

Operating Load: 674 kW + i 326 kvar

P-1240 OK Cancel

Figura 2.10 Configuración de un Motor de Inducción.

Motores Sincrónicos (Figura 2.11):

Se establecen los siguientes parámetros: voltaje, impedancia de rotor bloqueado, potencia, deslizamiento, revoluciones, número de polos, factor de servicio.

Synchronous Motor Editor - Syn1

Starting Mode Cable/Vd Cable Amp Protection Reliability Remarks Comment
 Info Nameplate Model LR Model Inertia Exciter Load Start Dev Start Cat

1 2000 kW 6.3 kV Cable Info not available

Ratings

kW 2000 kV 6.3 % PF 92.78 100 % 92.78 75 % 92.78 50 % 92.78 Poles 8
 MVA 2.25 FLA 206.2 % Eff 95.82 95.82 95.82 95.82 RPM 900

Library... None SF 1

Loading

			Motor Load			Feeder Loss	
	Loading Category	% Loading	HP	MW	Mvar	MW	Mvar
1	Design	100	2000	2.087	0.839	0	0
2	Normal	90	1800	1.879	0.755	0	0
3	Brake	0	0	0	0	0	0
4	Winter Load	0	0	0	0	0	0
5	Summer Load	0	0	0	0	0	0
6	FL Reject	0	0	0	0	0	0
7	Emergency	0	0	0	0	0	0
8	Shutdown	0	0	0	0	0	0
9	Accident	0	0	0	0	0	0
10	Backup	0	0	0	0	0	0

Operating Load: 0 MW + i 0 Mvar

Syn1 OK Cancel

Figura 2.11 Configuración de un Motor Síncrono.

Cargas (Figura 2.12):

Se establecen los siguientes parámetros: Potencia, nivel de voltaje, tipo de carga, factor de potencia.

Static Load Editor - TP-01-T 1

Info Loading Cable/Vd Cable Amp Harmonic Reliability Remarks Comment

1 245 kW 197 kvar 0.48 kV Cable Info not available

Ratings

kV kVA kW kvar % PF Amps

Grounding  Calculator...

Loading

			Load		Feeder Loss	
	Loading Category	% Loading	kW	kvar	kW	kvar
1	Design	100	244.7	196.8	0	0
2	Normal	100	244.7	196.8	0	0
3	Brake	0	0	0	0	0
4	Winter Load	0	0	0	0	0
5	Summer Load	0	0	0	0	0
6	FL Reject	0	0	0	0	0
7	Emergency	0	0	0	0	0
8	Shutdown	0	0	0	0	0
9	Accident	0	0	0	0	0
10	Backup	0	0	0	0	0

Operating Load: kW + j kvar

TP-01-T 1 OK Cancel

Figura 2.12 Configuración de una carga.

2.5.2 Análisis de cortocircuito con el ETAP

El módulo de cálculos de cortocircuitos del ETAP calcula los valores de fallas trifásicas, línea a tierra, línea a línea y línea a línea a tierra. El programa calcula

la corriente de cortocircuito total en base a las contribuciones individuales de motores, generadores y otras cargas. Este módulo de análisis utiliza las normas ANSI/IEEE (Series C37) y las normas IEC 60909. [30, 31]

2.5.3 Norma ANSI/IEEE:

Para escoger que base normativa se utilizara se selecciona ANSI en el menú Normas del Caso de Estudio de Cortocircuitos del Editor de Proyectos (Figura 2.13). [30]

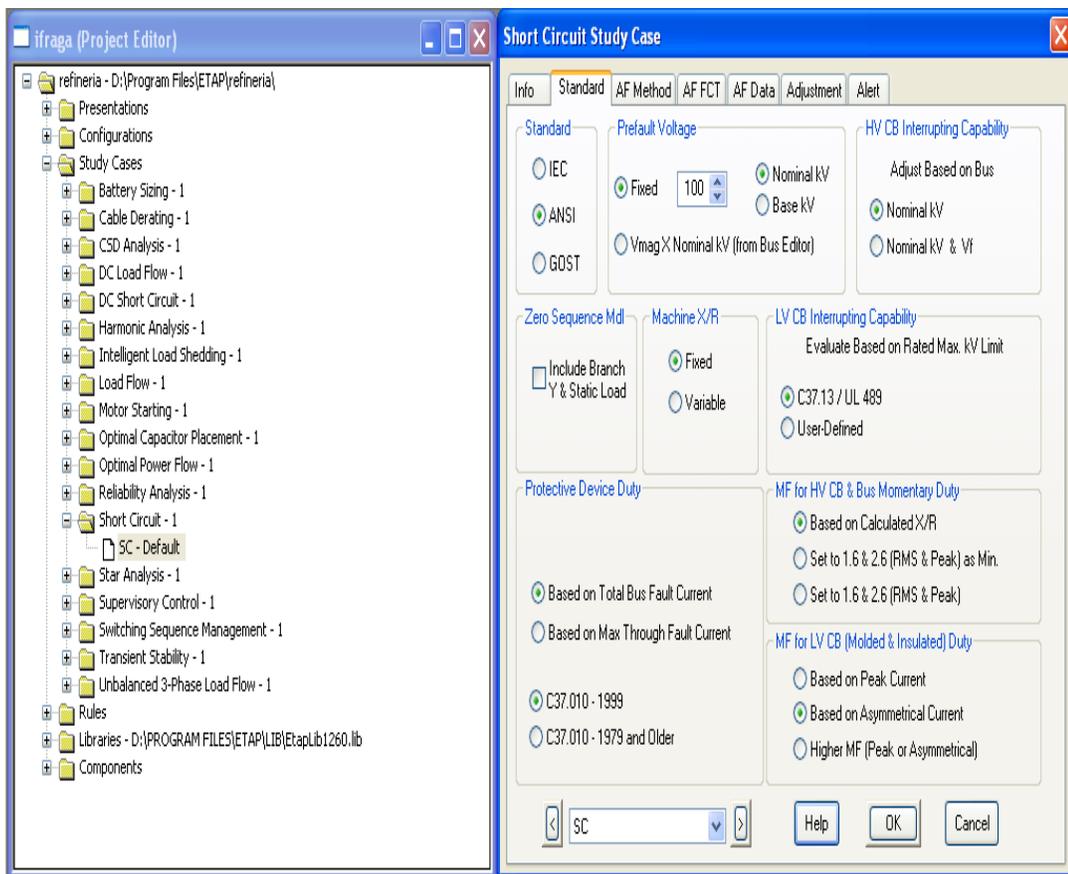


Figura 2.13 Selección de Norma ANSI en el Estudio de Cortocircuito.

Con base a la norma ANSI el programa permite realizar el análisis de cortocircuito a $\frac{1}{2}$ ciclo (máximo), $1\frac{1}{2}$ a 4 ciclos, 30 ciclos (mínimo), para los diferentes tipos de falla de cortocircuito. En la figura 2.14 se muestra la barra de herramientas para el cálculo de cortocircuito. [30]

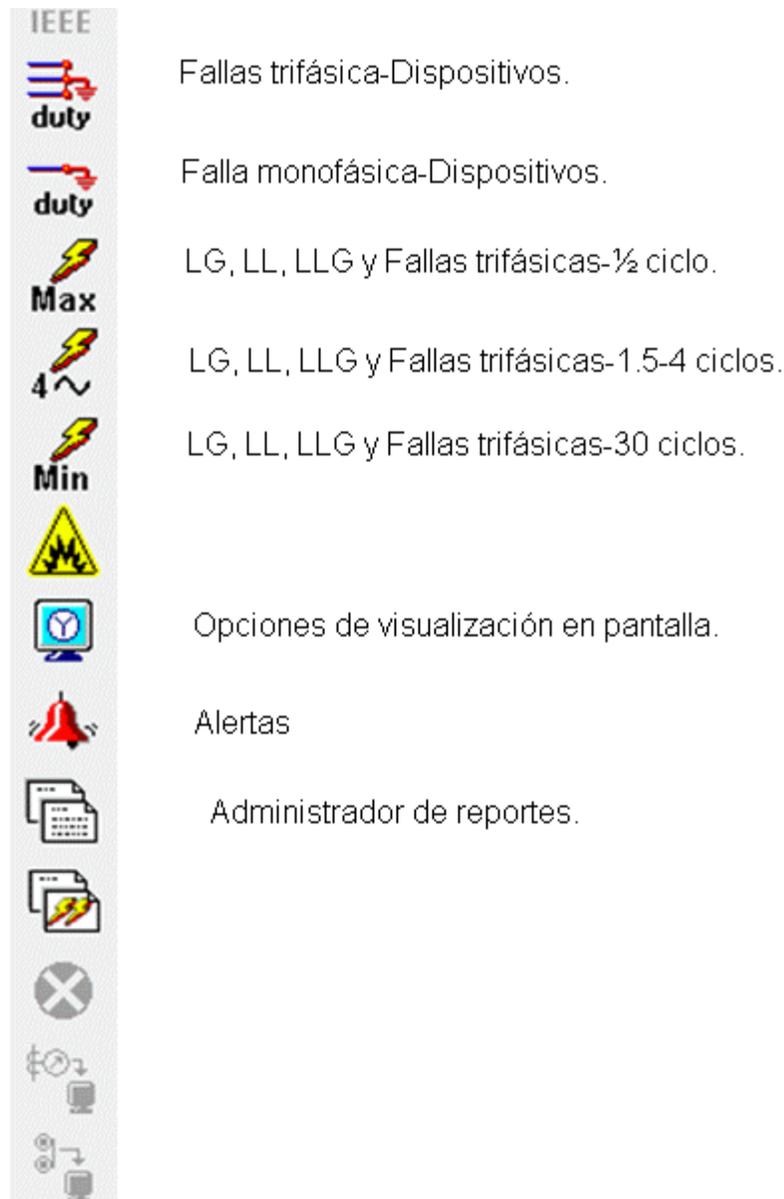


Figura 2.14 Barra de herramientas para el cálculo de cortocircuito según la norma ANSI/IEEE.

2.5.4 Norma IEC 60909:

Para escoger que base normativa se utilizara se selecciona ANSI en el menú Normas del Caso de Estudio de Cortocircuitos del Editor de Proyectos (Figura 2.15). [30]

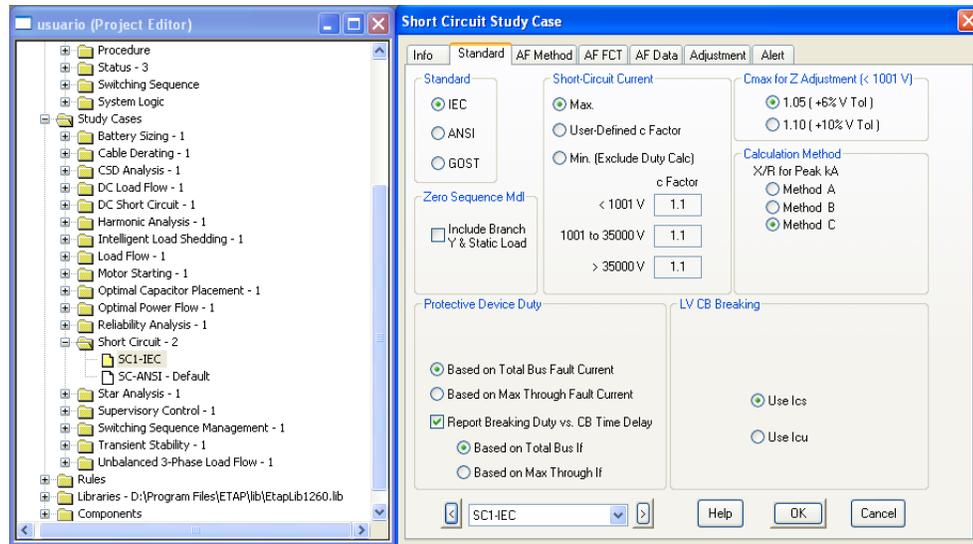


Figura 2.15 Selección de la Norma IEC 60909 en el Estudio de Cortocircuito.

Con base a la norma IEEE el programa permite realizar el análisis de cortocircuito para la corriente de cortocircuito simétrica inicial (I''_k), corriente pico (I_p), la corriente de ruptura (I_b) y la corriente de estado permanente (I_k). [30]

En la figura 2.16 se muestra la barra de herramientas para el cálculo de cortocircuito.



Figura 2.16 Barra de herramientas para el cálculo de cortocircuito según la norma IEC 60909.

CAPÍTULO 3. CÁLCULO DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO.

En los capítulos anteriores se ha descrito la importancia que el estudio de cortocircuito tiene en el diseño, en la modernización y en las expansiones de los sistemas eléctricos de potencia por su incidencia en las especificaciones del equipamiento. Se describieron las dos normas internacionales que rigen la realización de los estudios de cortocircuito con las diferencias entre ellas.

Mundialmente existen dos grandes agrupaciones que rigen la fabricación del equipamiento eléctrico, una es la ANSI y la otra es la IEC, es decir si usted realiza una solicitud de compra de algún tipo de equipamiento eléctrico (motores, transformadores, interruptores, relés, CCM. etc.) se encontrará que está certificado por una u otra norma. Ambas normas tienen diferencias conceptuales que implican resultados diferentes, lo que nos lleva a realizar en los casos donde el valor de cortocircuito sea una especificación, dos solicitudes de compra, una para el caso de equipamiento fabricado bajo la norma ANSI y otra para el equipamiento fabricado bajo la norma IEC.

En los siguientes epígrafes se muestran los resultados de los valores de cortocircuito en cada barra de estudio para los dos escenarios y se muestran las diferencias entre los valores de cortocircuito bajo la norma ANSI y bajo la norma IEC.

3.1 Descripción de las características de las variantes con las que se simularon las plantillas creadas.

Para los cálculos se definieron dos escenarios para las cuales se tuvo en consideración, los valores de cortocircuito de la fuente, el estado del interruptor de enlace, el estado de los interruptores de entrada y la contribución de los motores. La Tabla 3.1 muestra para cada uno de los escenarios como se implementaron estas consideraciones.

Tabla 3.1 Escenarios con sus consideraciones.

Consideraciones	Escenario Máximo	Escenario Mínimo
Valor de CC Máximo entrada #1	-	-
Valor de CC Máximo entrada #2	1200 MVA	-
Valor de CC Mínimo entrada #1		300 MVA
Estado interruptor de Enlace	Cerrado	Cerrado
Estado interruptor Entrada #1	Abierto	
Estado interruptor Entrada #2		Abierto
Contribución de Motores	Ambas	-

En programa ETAP en el caso de las normas ANSI calcula para cada escenario los valores de cortocircuito para las 3 redes y para la norma IEC se calcula para cada escenario el cortocircuito máximo y mínimo.

En cada subestación en los escenarios el enlace de barras está conectado por lo que los valores de cortocircuito que se mostraran son los correspondientes a la entrada #1.

3.2 Cálculo de los valores de cortocircuito para el escenario Máximo.

3.2.1 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de medio ciclo (1/2 ciclo).

Short-Circuit Summary Report

1/2 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
ID	kV	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.
Bus II	6.30	1.703	-21.950	22.016	0.000	0.000	0.000	19.003	1.472	19.060	19.003	1.472	19.060
Bus IV	6.30	1.656	-20.747	20.813	0.000	0.000	0.000	17.950	1.426	18.006	17.950	1.426	18.006
BusRP1E1	6.30	6.924	-14.292	15.880	0.000	0.000	0.000	12.376	5.993	13.751	12.376	5.993	13.751
BusRP2E1	6.30	6.731	-13.265	14.875	0.000	0.000	0.000	11.485	5.820	12.875	11.485	5.820	12.875
BusRP3E1	6.30	4.502	-17.383	17.957	0.000	0.000	0.000	15.032	3.896	15.548	15.032	3.896	15.548
BusRP6E1	6.30	4.912	-14.755	15.551	0.000	0.000	0.000	12.772	4.245	13.459	12.772	4.245	13.459
BusRP7E1	6.30	5.529	-7.594	9.393	0.000	0.000	0.000	6.558	4.780	8.115	6.558	4.780	8.115
BusRP8E1	6.30	4.332	-2.369	4.937	0.000	0.000	0.000	2.052	3.751	4.276	2.052	3.751	4.276
BusRP11E1	6.30	3.924	-4.300	5.821	0.000	0.000	0.000	3.724	3.397	5.041	3.724	3.397	5.041
BusTP1-E1	0.48	8.931	-14.175	16.754	8.642	-16.359	18.502	12.276	7.734	14.509	8.354	17.201	19.122
BusTP2-E1	0.48	8.929	-14.461	16.995	8.606	-16.588	18.687	12.523	7.732	14.718	8.625	17.266	19.300
BusTP3-E1	0.48	6.479	-20.949	21.928	6.530	-21.631	22.595	18.142	5.611	18.990	14.855	16.790	22.418
BusTP4-E1	0.48	9.464	-14.621	17.417	9.210	-17.013	19.346	12.662	8.196	15.083	8.470	18.135	20.015
BusTP06-E1	0.48	6.543	-20.761	21.768	6.576	-21.498	22.481	17.979	5.665	18.850	14.679	16.810	22.316
BusTP07-E1	0.48	6.543	-20.761	21.768	6.576	-21.498	22.481	17.979	5.665	18.850	14.679	16.810	22.316
BusTP08-E1	0.48	7.777	-11.124	13.573	7.830	-11.372	13.807	9.633	6.735	11.754	5.692	12.550	13.780
BusTP9-E1	0.48	7.548	-11.015	13.353	7.672	-11.294	13.654	9.539	6.536	11.564	5.639	12.330	13.559
BusTP10-E1	0.48	6.552	-20.225	21.259	6.462	-20.736	21.719	17.514	5.673	18.410	14.335	16.308	21.713
BusTP11-E1	0.48	7.174	-19.846	21.103	6.904	-20.486	21.618	17.187	6.211	18.275	13.890	16.785	21.787
BusTP12-E1	0.48	7.028	-19.087	20.340	6.826	-19.945	21.081	16.530	6.086	17.615	13.247	16.515	21.171
BusTP13-E1	0.48	7.818	-18.982	20.528	7.394	-19.903	21.231	16.438	6.770	17.778	13.003	17.196	21.559
BusTP14-E1	0.48	8.181	-18.157	19.915	7.701	-19.331	20.808	15.724	7.084	17.246	12.192	17.364	21.217
BusTP15-E1	0.48	7.608	-9.975	12.546	7.732	-10.557	13.085	8.639	6.588	10.864	4.718	12.186	13.067
BusTP16-E1	0.48	7.582	-10.649	13.072	7.699	-11.038	13.458	9.222	6.565	11.321	5.314	12.292	13.392
BusTP17-E1	0.48	7.720	-10.017	12.647	7.812	-10.590	13.159	8.675	6.685	10.952	4.733	12.293	13.172
BusTP18E1	0.48	6.017	-23.648	24.402	6.104	-23.010	23.806	20.479	5.209	21.131	-23.568	5.992	24.318
BusTP19E1	0.48	5.953	-21.249	22.068	6.044	-21.436	22.272	18.402	5.155	19.110	-21.472	5.659	22.205
BusTP20-E1	0.48	10.944	-15.209	18.737	11.450	-16.265	19.891	13.166	9.475	16.221	7.167	18.220	19.579
BusTP21-E1	0.48	10.836	-16.218	19.505	11.362	-17.014	20.458	14.039	9.382	16.886	8.068	18.337	20.033
BusTP22-E1	0.48	11.407	-17.817	21.156	11.687	-17.911	21.386	15.120	9.770	18.002	-21.359	-0.431	21.363
BusTP25-E1	0.48	9.013	-10.124	13.555	8.870	-9.891	13.286	8.768	7.805	11.739	-13.134	-2.972	13.466

Figura 3.1 Resultados de la simulación para la corriente de primer ciclo.

3.2.2 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de interrupción (1½-4 ciclos).

Short-Circuit Summary Report

1.5-4 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
ID	kV	Real	Imag	Mag	Real	Imag	Mag	Real	Imag	Mag	Real	Imag	Mag
Bus II	6.30	1.361	-19.300	19.348	0.000	0.000	0.000	17.601	1.354	17.653	17.601	1.354	17.653
Bus IV	6.30	1.326	-18.472	18.520	0.000	0.000	0.000	16.684	1.308	16.735	16.684	1.308	16.735
BusRP1E1	6.30	5.959	-13.141	14.429	0.000	0.000	0.000	11.760	5.510	12.987	11.760	5.510	12.987
BusRP2E1	6.30	5.835	-12.399	13.703	0.000	0.000	0.000	10.986	5.351	12.220	10.986	5.351	12.220
BusRP5E1	6.30	3.854	-15.480	15.952	0.000	0.000	0.000	14.055	3.591	14.506	14.055	3.591	14.506
BusRP6E1	6.30	4.233	-13.502	14.150	0.000	0.000	0.000	12.087	3.905	12.702	12.087	3.905	12.702
BusRP7E1	6.30	5.057	-7.271	8.857	0.000	0.000	0.000	6.356	4.538	7.810	6.356	4.538	7.810
BusRP8E1	6.30	4.208	-2.329	4.809	0.000	0.000	0.000	2.024	3.688	4.206	2.024	3.688	4.206
BusRP11E1	6.30	3.741	-3.987	5.468	0.000	0.000	0.000	3.578	3.321	4.881	3.578	3.321	4.881
BusTP1-E1	0.48	8.721	-13.695	16.236	8.572	-15.976	18.131	11.887	7.599	14.109	7.980	16.903	18.692
BusTP2-E1	0.48	8.725	-13.981	16.480	8.537	-16.209	18.319	12.135	7.600	14.318	8.250	16.975	18.874
BusTP3-E1	0.48	6.291	-20.343	21.294	6.434	-21.258	22.210	17.691	5.488	18.522	14.426	16.506	21.922
BusTP4-E1	0.48	9.243	-14.137	16.890	9.135	-16.623	18.968	12.271	8.056	14.679	8.096	17.823	19.576
BusTP6-E1	0.48	6.347	-20.180	21.155	6.476	-21.128	22.098	17.533	5.537	18.387	14.263	16.530	21.832
BusTP7-E1	0.48	6.347	-20.180	21.155	6.476	-21.128	22.098	17.533	5.537	18.387	14.263	16.530	21.832
BusTP8-E1	0.48	7.501	-10.045	12.537	7.728	-10.717	13.213	8.832	6.591	11.020	4.922	12.114	13.076
BusTP9-E1	0.48	7.383	-10.587	12.907	7.581	-10.997	13.357	9.175	6.420	11.198	5.312	12.122	13.235
BusTP10-E1	0.48	6.241	-19.026	20.023	6.348	-20.026	21.008	16.648	5.512	17.537	13.497	15.811	20.788
BusTP11-E1	0.48	6.855	-18.657	19.877	6.801	-19.774	20.911	16.325	6.046	17.409	13.049	16.282	20.866
BusTP12-E1	0.48	6.815	-18.542	19.755	6.730	-19.588	20.712	16.107	5.951	17.172	12.856	16.232	20.706
BusTP13-E1	0.48	7.489	-17.802	19.313	7.305	-19.182	20.525	15.586	6.602	16.927	12.161	16.679	20.642
BusTP14-E1	0.48	7.857	-17.001	18.728	7.622	-18.600	20.101	14.880	6.915	16.408	11.350	16.846	20.312
BusTP15-E1	0.48	7.449	-9.558	12.118	7.649	-10.249	12.789	8.280	6.475	10.512	4.392	11.975	12.755
BusTP16-E1	0.48	7.419	-10.225	12.633	7.611	-10.737	13.161	8.860	6.450	10.960	4.988	12.083	13.072
BusTP17-E1	0.48	7.455	-8.950	11.648	7.727	-9.907	12.564	7.879	6.545	10.243	3.952	11.843	12.485
BusTP18E1	0.48	5.764	-21.013	21.789	6.124	-22.067	22.901	19.218	5.254	19.923	-21.812	5.203	22.424
BusTP19E1	0.48	5.723	-19.982	20.786	6.026	-20.881	21.733	17.702	5.132	18.431	14.607	15.499	21.297
BusTP20-E1	0.48	10.705	-14.721	18.202	11.325	-15.912	19.531	12.765	9.324	15.808	6.827	17.930	19.186
BusTP21-E1	0.48	10.592	-15.712	18.949	11.231	-16.663	20.095	13.629	9.229	16.460	7.721	18.045	19.628
BusTP22-E1	0.48	10.892	-15.964	19.326	11.594	-17.088	20.650	14.126	9.657	17.112	8.123	18.353	20.070
BusTP25-E1	0.48	8.871	-9.679	13.129	8.792	-9.616	13.029	8.400	7.701	11.396	4.058	12.452	13.097

Figura 3.2 Resultados de la simulación para la corriente de interrupción.

3.2.3 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de estado estable (30 ciclos).

Short-Circuit Summary Report

30 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
ID	kV	Real	Imag	Mag.	Real	Imag	Mag.	Real	Imag	Mag.	Real	Imag	Mag.
Bus II	6.30	1.162	-16.228	16.269	0.000	0.000	0.000	14.053	1.006	14.089	14.053	1.006	14.089
Bus IV	6.30	1.162	-16.228	16.269	0.000	0.000	0.000	14.053	1.006	14.089	14.053	1.006	14.089
BusRP1E1	6.30	4.988	-11.464	12.502	0.000	0.000	0.000	9.928	4.320	10.827	9.928	4.320	10.827
BusRP2E1	6.30	5.033	-11.334	12.401	0.000	0.000	0.000	9.816	4.359	10.740	9.816	4.359	10.740
BusRP5E1	6.30	3.292	-13.082	13.490	0.000	0.000	0.000	11.330	2.851	11.683	11.330	2.851	11.683
BusRP6E1	6.30	3.676	-12.098	12.644	0.000	0.000	0.000	10.477	3.183	10.950	10.477	3.183	10.950
BusRP7E1	6.30	4.564	-6.962	8.325	0.000	0.000	0.000	6.030	3.953	7.210	6.030	3.953	7.210
BusRP8E1	6.30	4.023	-2.243	4.606	0.000	0.000	0.000	1.943	3.484	3.989	1.943	3.484	3.989
BusRP11E1	6.30	3.482	-3.750	5.117	0.000	0.000	0.000	3.247	3.015	4.431	3.247	3.015	4.431
BusTP1-E1	0.48	8.547	-13.547	16.018	8.408	-15.802	17.899	11.732	7.402	13.872	7.850	16.685	18.439
BusTP2-E1	0.48	8.567	-13.827	16.266	8.390	-16.034	18.096	11.975	7.419	14.087	8.111	16.773	18.631
BusTP3-E1	0.48	6.187	-19.992	20.928	6.329	-20.942	21.877	17.314	5.358	18.124	14.079	16.349	21.576
BusTP4-E1	0.48	9.051	-13.982	16.656	8.952	-16.455	18.715	12.109	7.839	14.424	7.962	17.583	19.301
BusTP06-E1	0.48	6.244	-19.936	20.891	6.372	-20.901	21.851	17.265	5.408	18.092	14.018	16.388	21.566
BusTP07-E1	0.48	6.244	-19.936	20.891	6.372	-20.901	21.851	17.265	5.408	18.092	14.018	16.388	21.566
BusTP08-E1	0.48	7.363	-9.770	12.233	7.559	-10.400	12.856	8.461	6.376	10.594	4.586	11.929	12.780
BusTP9-E1	0.48	7.297	-10.547	12.825	7.498	-10.963	13.282	9.134	6.319	11.107	5.279	12.025	13.133
BusTP10-E1	0.48	6.090	-18.604	19.575	6.160	-19.572	20.518	16.111	5.274	16.953	13.006	15.594	20.306
BusTP11-E1	0.48	6.693	-18.246	19.435	6.611	-19.324	20.424	15.802	5.796	16.831	12.569	16.052	20.388
BusTP12-E1	0.48	6.648	-18.308	19.478	6.575	-19.368	20.454	15.855	5.757	16.868	12.633	16.025	20.406
BusTP13-E1	0.48	7.279	-17.365	18.829	7.083	-18.695	19.992	15.038	6.304	16.306	11.663	16.392	20.118
BusTP14-E1	0.48	7.686	-16.630	18.320	7.435	-18.163	19.626	14.402	6.657	15.866	10.912	16.603	19.868
BusTP15-E1	0.48	7.370	-9.530	12.048	7.571	-10.223	12.721	8.254	6.383	10.434	4.373	11.886	12.665
BusTP16-E1	0.48	7.335	-10.190	12.555	7.530	-10.706	13.089	8.824	6.352	10.873	4.960	11.989	12.974
BusTP17-E1	0.48	7.350	-8.695	11.385	7.589	-9.592	12.231	7.530	6.365	9.860	3.634	11.689	12.240
BusTP18E1	0.48	5.565	-19.142	19.935	5.772	-19.959	20.777	16.577	4.820	17.264	13.580	15.244	20.416
BusTP19E1	0.48	5.565	-19.142	19.935	5.772	-19.959	20.777	16.577	4.820	17.264	13.580	15.244	20.416
BusTP20-E1	0.48	10.531	-14.626	18.023	11.147	-15.821	19.353	12.667	9.120	15.608	6.752	17.731	18.973
BusTP21-E1	0.48	10.411	-15.597	18.752	11.048	-16.557	19.905	13.507	9.017	16.240	7.623	17.838	19.399
BusTP22-E1	0.48	10.511	-14.842	18.186	11.128	-15.986	19.478	12.853	9.102	15.750	6.945	17.761	19.070
BusTP25-E1	0.48	8.813	-9.572	13.012	8.740	-9.533	12.933	8.290	7.632	11.268	3.956	12.379	12.996

Figura 3.3 Resultados de la simulación para la corriente de cortocircuito de estado estable.

3.2.4 Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito máximo.

Short-Circuit Summary Report

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	KV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault				*Line-to-Line-to-Ground			
		I _k	i _p	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k	I _k	i _p	I _b
Bus II	6.300	24.472	39.986	17.506	0.000	0.000	0.000	0.000	20.866	51.146	20.866	20.866	20.866	51.146	20.866	20.866
Bus IV	6.300	23.208	56.993	17.506	0.000	0.000	0.000	0.000	19.739	48.475	19.739	19.739	19.739	48.475	19.739	19.739
BusRP1E1	6.300	18.086	33.171	13.839	0.000	0.000	0.000	0.000	15.509	28.445	15.509	15.509	15.509	28.445	15.509	15.509
BusRP2E1	6.300	16.966	30.672	13.742	0.000	0.000	0.000	0.000	14.529	26.266	14.529	14.529	14.529	26.266	14.529	14.529
BusRP5E1	6.300	20.137	42.283	14.680	0.000	0.000	0.000	0.000	17.213	36.145	17.213	17.213	17.213	36.145	17.213	17.213
BusRP6E1	6.300	17.513	34.954	13.829	0.000	0.000	0.000	0.000	14.969	29.878	14.969	14.969	14.969	29.878	14.969	14.969
BusRP7E1	6.300	11.018	18.253	9.503	0.000	0.000	0.000	0.000	9.429	15.619	9.429	9.429	9.429	15.619	9.429	9.429
BusRP8E1	6.300	6.320	9.319	5.792	0.000	0.000	0.000	0.000	5.458	8.047	5.458	5.458	5.458	8.047	5.458	5.458
BusRP11E1	6.300	7.103	11.543	6.050	0.000	0.000	0.000	0.000	6.090	9.896	6.090	6.090	6.090	9.896	6.090	6.090
BusTP1-E1	0.480	19.797	33.457	18.565	21.439	36.232	21.439	21.439	16.983	28.702	16.983	16.983	22.130	37.400	22.130	22.130
BusTP2-E1	0.480	20.057	34.065	18.834	21.638	36.749	21.638	21.638	17.209	29.228	17.209	17.209	22.321	37.910	22.321	22.321
BusTP3-E1	0.480	25.185	50.196	23.658	25.720	51.263	25.720	25.720	21.649	43.149	21.649	21.649	25.600	51.023	25.600	25.600
BusTP4-E1	0.480	20.574	34.571	19.308	22.406	37.649	22.406	22.406	17.655	29.666	17.655	17.655	23.142	38.886	23.142	23.142
BusTP06-E1	0.480	25.008	49.630	23.620	25.591	50.787	25.591	25.591	21.490	42.649	21.490	21.490	25.478	50.564	25.478	25.478
BusTP07-E1	0.480	25.008	49.630	23.620	25.591	50.787	25.591	25.591	21.490	42.649	21.490	21.490	25.478	50.564	25.478	25.478
BusTP08-E1	0.480	16.248	26.498	13.960	15.962	26.050	15.962	15.962	13.728	22.388	13.728	13.728	16.177	26.382	16.177	16.177
BusTP9-E1	0.480	15.510	25.234	14.557	15.603	25.384	15.603	15.603	13.274	21.596	13.274	13.274	15.585	25.356	15.585	15.585
BusTP10-E1	0.480	24.832	48.647	22.184	24.878	48.739	24.878	24.878	21.166	41.466	21.166	21.166	25.084	49.143	25.084	25.084
BusTP11-E1	0.480	24.717	47.251	22.077	24.805	47.419	24.805	24.805	21.064	40.268	21.064	21.064	25.194	48.164	25.194	25.194
BusTP12-E1	0.480	23.479	44.963	22.120	24.081	46.117	24.081	24.081	20.172	38.631	20.172	20.172	24.225	46.393	24.225	24.225
BusTP13-E1	0.480	24.145	44.812	21.458	24.423	45.327	24.423	24.423	20.571	38.178	20.571	20.571	24.975	46.352	24.975	24.975
BusTP14-E1	0.480	23.520	42.774	20.942	23.991	43.631	23.991	23.991	20.025	36.417	20.025	20.025	24.627	44.788	24.627	24.627
BusTP15-E1	0.480	14.684	23.472	13.772	15.033	24.014	15.033	15.033	12.568	20.075	12.568	12.568	15.086	24.098	15.086	15.086
BusTP16-E1	0.480	15.227	24.607	14.285	15.407	24.898	15.407	15.407	13.029	21.055	13.029	13.029	15.415	24.912	15.415	15.415
BusTP17-E1	0.480	15.311	24.621	13.100	15.319	24.635	15.319	15.319	12.916	20.770	12.916	12.916	15.572	25.041	15.572	15.572
BusTP18E1	0.480	28.554	58.624	22.553	27.238	55.923	27.238	27.238	24.269	49.826	24.269	24.269	28.010	57.508	28.010	28.010
BusTP19E1	0.480	25.510	51.529	22.553	25.403	51.313	25.403	25.403	21.835	44.105	21.835	21.835	25.462	51.432	25.462	25.462
BusTP20-E1	0.480	21.751	35.152	20.542	22.770	36.798	22.770	22.770	18.658	30.153	18.658	18.658	22.457	36.293	22.457	22.457
BusTP21-E1	0.480	22.529	36.907	21.275	23.340	38.236	23.340	23.340	19.329	31.666	19.329	19.329	23.059	37.776	23.059	23.059
BusTP22-E1	0.480	25.053	41.316	20.706	24.620	40.603	24.620	24.620	20.886	34.445	20.886	20.886	24.986	41.207	24.986	24.986
BusTP25-E1	0.480	16.515	26.181	15.481	15.943	25.273	15.943	15.943	14.145	22.424	14.145	14.145	16.246	25.754	16.246	16.246

Figura 3.4 Resultados de la simulación para la corriente de cortocircuito máxima.

3.2.5 Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito mínimo.

Short-Circuit Summary Report

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault				*Line-to-Line-to-Ground			
		I _k	i _p	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k
Bus II	6.300	22.465	55.148	16.148	0.000	0.000	0.000	0.000	19.159	47.031	19.159	19.159	19.159	47.031	19.159	19.159
Bus IV	6.300	21.306	52.389	16.148	0.000	0.000	0.000	0.000	18.126	44.569	18.126	18.126	18.126	44.569	18.126	18.126
BusRP1E1	6.300	16.738	31.149	12.819	0.000	0.000	0.000	0.000	14.352	26.707	14.352	14.352	26.707	14.352	14.352	14.352
BusRP2E1	6.300	15.707	28.849	12.731	0.000	0.000	0.000	0.000	13.449	24.701	13.449	13.449	24.701	13.449	13.449	13.449
BusRP5E1	6.300	18.508	39.282	13.542	0.000	0.000	0.000	0.000	15.822	33.582	15.822	15.822	33.582	15.822	15.822	15.822
BusRP6E1	6.300	16.118	32.611	12.763	0.000	0.000	0.000	0.000	13.777	27.875	13.777	13.777	27.875	13.777	13.777	13.777
BusRP7E1	6.300	10.262	17.283	8.844	0.000	0.000	0.000	0.000	8.782	14.789	8.782	8.782	14.789	8.782	8.782	8.782
BusRP8E1	6.300	6.096	9.016	5.570	0.000	0.000	0.000	0.000	5.264	7.785	5.264	5.264	7.785	5.264	5.264	5.264
BusRP11E1	6.300	6.676	10.965	5.678	0.000	0.000	0.000	0.000	5.723	9.401	5.723	5.723	9.401	5.723	5.723	5.723
BusTP1-E1	0.480	17.297	29.561	16.230	18.657	31.885	18.657	18.657	14.840	25.363	14.840	14.840	19.194	32.804	19.194	19.194
BusTP2-E1	0.480	17.516	30.078	16.458	18.824	32.323	18.824	18.824	15.031	25.810	15.031	15.031	19.355	33.236	19.355	19.355
BusTP3-E1	0.480	21.786	43.522	20.481	22.238	44.424	22.238	22.238	18.728	37.412	18.728	18.728	22.122	44.192	22.122	22.122
BusTP4-E1	0.480	17.988	30.571	16.891	19.508	33.154	19.508	19.508	15.438	26.237	15.438	15.438	20.079	34.126	20.079	20.079
BusTP06-E1	0.480	21.636	43.056	20.450	22.128	44.037	22.128	22.128	18.593	37.002	18.593	18.593	22.016	43.814	22.016	22.016
BusTP07-E1	0.480	21.636	43.056	20.450	22.128	44.037	22.128	22.128	18.593	37.002	18.593	18.593	22.016	43.814	22.016	22.016
BusTP08-E1	0.480	14.101	23.050	12.124	13.831	22.608	13.831	13.831	11.916	19.477	11.916	11.916	14.004	22.891	14.004	14.004
BusTP9-E1	0.480	13.434	21.891	12.614	13.502	22.002	13.502	13.502	11.498	18.735	11.498	11.498	13.479	21.964	13.479	13.479
BusTP10-E1	0.480	21.487	42.245	19.211	21.514	42.298	21.514	21.514	18.316	36.011	18.316	18.316	21.674	42.612	21.674	21.674
BusTP11-E1	0.480	21.406	41.129	19.135	21.462	41.237	21.462	21.462	18.244	35.053	18.244	18.244	21.772	41.831	21.772	21.772
BusTP12-E1	0.480	20.335	39.145	19.171	20.837	40.112	20.837	20.837	17.472	33.634	17.472	17.472	20.935	40.300	20.935	20.935
BusTP13-E1	0.480	20.939	39.130	18.625	21.150	39.524	21.150	21.150	17.841	33.341	17.841	17.841	21.589	40.345	21.589	21.589
BusTP14-E1	0.480	20.423	37.439	18.200	20.793	38.118	20.793	20.793	17.390	31.880	17.390	17.390	21.298	39.044	21.298	21.298
BusTP15-E1	0.480	12.766	20.452	11.970	13.036	20.886	13.036	13.036	10.919	17.494	10.919	10.919	13.066	20.933	13.066	13.066
BusTP16-E1	0.480	13.202	21.381	12.391	13.342	21.607	13.342	13.342	11.297	18.295	11.297	11.297	13.338	21.601	13.338	13.338
BusTP17-E1	0.480	13.331	21.506	11.417	13.305	21.464	13.305	13.305	11.248	18.146	11.248	11.248	13.504	21.785	13.504	13.504
BusTP18E1	0.480	24.687	50.750	19.516	23.541	48.394	23.541	23.541	20.983	43.135	20.983	20.983	24.223	49.796	24.223	24.223
BusTP19E1	0.480	22.057	44.620	19.516	21.956	44.417	21.956	21.956	18.880	38.193	18.880	18.880	22.021	44.548	22.021	22.021
BusTP20-E1	0.480	18.893	30.629	17.854	19.745	32.011	19.745	19.745	16.208	26.276	16.208	16.208	19.447	31.527	19.447	19.447
BusTP21-E1	0.480	19.530	32.065	18.456	20.212	33.184	20.212	20.212	16.758	27.513	16.758	16.758	20.003	32.840	20.003	20.003
BusTP22-E1	0.480	21.741	35.944	17.989	21.336	35.275	21.336	21.336	18.130	29.974	18.130	18.130	21.703	35.880	21.703	21.703
BusTP25-E1	0.480	14.592	23.359	13.686	14.086	22.550	14.086	14.086	12.501	20.012	12.501	12.501	14.345	22.964	14.345	14.345

Figura 3.5 Resultados de la simulación para la corriente de cortocircuito mínimo.

3.3 Calculo de los valores de cortocircuito para el escenario Mínimo.

3.3.1 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de medio ciclo (1/2 ciclo).

Short-Circuit Summary Report

1/2 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus	ID	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
			Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.
Bus II		6.30	0.902	-11.233	11.269	0.000	0.000	0.000	9.728	0.781	9.759	9.728	0.781	9.759
Bus IV		6.30	0.902	-11.233	11.269	0.000	0.000	0.000	9.728	0.781	9.759	9.728	0.781	9.759
BusRP1E1		6.30	3.065	-8.895	9.408	0.000	0.000	0.000	7.703	2.655	8.148	7.703	2.655	8.148
BusRP2E1		6.30	3.095	-8.840	9.366	0.000	0.000	0.000	7.656	2.680	8.111	7.656	2.680	8.111
BusRP3E1		6.30	2.041	-9.653	9.866	0.000	0.000	0.000	8.360	1.768	8.544	8.360	1.768	8.544
BusRP6E1		6.30	2.648	-8.852	9.240	0.000	0.000	0.000	7.666	2.293	8.002	7.666	2.293	8.002
BusRP7E1		6.30	3.268	-6.022	6.852	0.000	0.000	0.000	5.215	2.831	5.934	5.215	2.831	5.934
BusRP8E1		6.30	3.519	-2.431	4.278	0.000	0.000	0.000	2.106	3.048	3.704	2.106	3.048	3.704
BusRP11E1		6.30	2.894	-3.687	4.687	0.000	0.000	0.000	3.193	2.506	4.059	3.193	2.506	4.059
BusTP1-E1		0.48	5.658	-17.955	18.826	5.849	-19.085	19.962	15.550	4.900	16.304	12.529	15.082	19.607
BusTP2-E1		0.48	5.487	-18.310	19.115	5.718	-19.349	20.176	15.857	4.752	16.554	12.874	15.008	19.773
BusTP3-E1		0.48	5.774	-19.223	20.072	6.031	-20.371	21.245	16.648	5.001	17.382	13.493	15.832	20.802
BusTP4-E1		0.48	5.962	-18.832	19.753	6.175	-20.079	21.007	16.309	5.163	17.107	13.113	15.913	20.619
BusTP06-E1		0.48	5.825	-19.176	20.042	6.069	-20.336	21.223	16.607	5.045	17.356	13.442	15.867	20.795
BusTP07-E1		0.48	5.825	-19.176	20.042	6.069	-20.336	21.223	16.607	5.045	17.356	13.442	15.867	20.795
BusTP08-E1		0.48	7.081	-9.653	11.972	7.353	-10.307	12.661	8.360	6.133	10.368	4.542	11.657	12.511
BusTP9-E1		0.48	7.007	-10.348	12.497	7.290	-10.817	13.045	8.962	6.068	10.823	5.163	11.734	12.819
BusTP10-E1		0.48	5.755	-17.859	18.764	5.923	-19.015	19.916	15.466	4.984	16.250	12.424	15.147	19.590
BusTP11-E1		0.48	6.249	-17.648	18.722	6.298	-18.866	19.890	15.284	5.412	16.214	12.134	15.535	19.712
BusTP12-E1		0.48	6.161	-17.761	18.799	6.229	-18.949	19.947	15.382	5.336	16.281	12.252	15.482	19.743
BusTP13-E1		0.48	6.831	-16.814	18.149	6.771	-18.255	19.470	14.561	5.916	15.717	11.266	15.872	19.463
BusTP14-E1		0.48	7.240	-16.111	17.663	7.125	-17.735	19.113	13.953	6.270	15.297	10.541	16.083	19.229
BusTP15-E1		0.48	7.099	-9.319	11.715	7.374	-10.057	12.471	8.071	6.148	10.145	4.244	11.601	12.353
BusTP16-E1		0.48	7.096	-8.622	11.167	7.396	-9.523	12.058	7.467	6.145	9.671	3.625	11.445	12.005
BusTP17-E1		0.48	7.100	-8.750	11.268	7.394	-9.622	12.135	7.578	6.149	9.759	3.738	11.478	12.071
BusTP18E1		0.48	5.327	-18.332	19.090	5.599	-19.364	20.157	15.876	4.613	16.532	12.926	14.873	19.705
BusTP19E1		0.48	5.327	-18.332	19.090	5.599	-19.364	20.157	15.876	4.613	16.532	12.926	14.873	19.705
BusTP20-E1		0.48	9.892	-14.629	17.659	10.653	-15.817	19.070	12.669	8.567	15.293	6.889	17.174	18.508
BusTP21-E1		0.48	9.791	-15.220	18.097	10.576	-16.274	19.408	13.181	8.479	15.673	-18.929	0.262	18.931
BusTP22-E1		0.48	9.908	-14.520	17.578	10.665	-15.732	19.006	12.574	8.580	15.223	6.800	17.162	18.461
BusTP25-E1		0.48	8.475	-9.505	12.735	8.516	-9.488	12.749	8.231	7.340	11.029	-12.509	-2.604	12.778

Figura 3.6 Resultados de la simulación para la corriente de primer ciclo.

3.3.2 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de interrupción (1½-4 ciclos).

Short-Circuit Summary Report

1.5-4 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
ID	kV	Real	Imag	Mag	Real	Imag	Mag	Real	Imag	Mag	Real	Imag	Mag
Bus II	6.30	0.902	-11.233	11.269	0.000	0.000	0.000	9.728	0.781	9.759	9.728	0.781	9.759
Bus IV	6.30	0.902	-11.233	11.269	0.000	0.000	0.000	9.728	0.781	9.759	9.728	0.781	9.759
BusRP1E1	6.30	3.065	-8.895	9.408	0.000	0.000	0.000	7.703	2.655	8.148	7.703	2.655	8.148
BusRP2E1	6.30	3.095	-8.840	9.366	0.000	0.000	0.000	7.656	2.680	8.111	7.656	2.680	8.111
BusRP5E1	6.30	2.041	-9.653	9.866	0.000	0.000	0.000	8.360	1.768	8.544	8.360	1.768	8.544
BusRP6E1	6.30	2.648	-8.852	9.240	0.000	0.000	0.000	7.666	2.293	8.002	7.666	2.293	8.002
BusRP7E1	6.30	3.268	-6.022	6.852	0.000	0.000	0.000	5.215	2.831	5.934	5.215	2.831	5.934
BusRP8E1	6.30	3.519	-2.431	4.278	0.000	0.000	0.000	2.106	3.048	3.704	2.106	3.048	3.704
BusRP11E1	6.30	2.894	-3.687	4.687	0.000	0.000	0.000	3.193	2.506	4.059	3.193	2.506	4.059
BusTP1-E1	0.48	5.658	-17.955	18.826	5.849	-19.065	19.962	15.550	4.900	16.304	12.529	15.082	19.607
BusTP2-E1	0.48	5.487	-18.310	19.115	5.718	-19.349	20.176	15.857	4.752	16.554	12.874	15.008	19.773
BusTP3-E1	0.48	5.774	-19.223	20.072	6.031	-20.371	21.245	16.648	5.001	17.382	13.493	15.832	20.802
BusTP4-E1	0.48	5.962	-18.832	19.753	6.175	-20.079	21.007	16.309	5.163	17.107	13.113	15.913	20.619
BusTP06-E1	0.48	5.825	-19.176	20.042	6.069	-20.336	21.223	16.607	5.045	17.356	13.442	15.867	20.795
BusTP07-E1	0.48	5.825	-19.176	20.042	6.069	-20.336	21.223	16.607	5.045	17.356	13.442	15.867	20.795
BusTP08-E1	0.48	7.081	-9.653	11.972	7.353	-10.307	12.661	8.360	6.133	10.368	4.542	11.657	12.511
BusTP9-E1	0.48	7.007	-10.348	12.497	7.290	-10.817	13.045	8.962	6.068	10.823	5.163	11.734	12.819
BusTP10-E1	0.48	5.755	-17.859	18.764	5.923	-19.015	19.916	15.466	4.984	16.250	12.424	15.147	19.590
BusTP11-E1	0.48	6.249	-17.648	18.722	6.298	-18.866	19.890	15.284	5.412	16.214	12.134	15.535	19.712
BusTP12-E1	0.48	6.161	-17.761	18.799	6.229	-18.949	19.947	15.382	5.336	16.281	12.252	15.482	19.743
BusTP13-E1	0.48	6.831	-16.814	18.149	6.771	-18.255	19.470	14.561	5.916	15.717	11.266	15.872	19.463
BusTP14-E1	0.48	7.240	-16.111	17.663	7.125	-17.735	19.113	13.953	6.270	15.297	10.541	16.083	19.229
BusTP15-E1	0.48	7.099	-9.319	11.715	7.374	-10.057	12.471	8.071	6.148	10.145	4.244	11.601	12.353
BusTP16-E1	0.48	7.096	-8.622	11.167	7.396	-9.523	12.058	7.467	6.145	9.671	3.625	11.445	12.005
BusTP17-E1	0.48	7.100	-8.750	11.268	7.394	-9.622	12.135	7.578	6.149	9.759	3.738	11.478	12.071
BusTP18E1	0.48	5.327	-18.332	19.090	5.599	-19.364	20.157	15.876	4.613	16.532	12.926	14.873	19.705
BusTP19E1	0.48	5.327	-18.332	19.090	5.599	-19.364	20.157	15.876	4.613	16.532	12.926	14.873	19.705
BusTP20-E1	0.48	9.892	-14.629	17.659	10.653	-15.817	19.070	12.669	8.567	15.293	6.899	17.174	18.508
BusTP21-E1	0.48	9.791	-15.220	18.097	10.576	-16.274	19.408	13.181	8.479	15.673	-18.929	0.262	18.931
BusTP22-E1	0.48	9.908	-14.520	17.578	10.665	-15.732	19.006	12.574	8.580	15.223	6.800	17.162	18.461
BusTP25-E1	0.48	8.475	-9.505	12.735	8.516	-9.488	12.749	8.231	7.340	11.029	-12.509	-2.604	12.778

Figura 3.7 Resultados de la simulación para la corriente de interrupción.

3.3.3 Resultado de los cálculos por la norma ANSI para la red de estado estable (30 ciclos).

Short-Circuit Summary Report

30 Cycle - 3-Phase, LG, LL, & LLG Fault Currents

Prefault Voltage = 100 % of the Bus Nominal Voltage

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground		
ID	kV	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.	Real	Imag.	Mag.
Bus II	6.30	0.902	-11.233	11.269	0.000	0.000	0.000	9.728	0.781	9.759	9.728	0.781	9.759
Bus IV	6.30	0.902	-11.233	11.269	0.000	0.000	0.000	9.728	0.781	9.759	9.728	0.781	9.759
BusRP1E1	6.30	3.065	-8.895	9.408	0.000	0.000	0.000	7.703	2.655	8.148	7.703	2.655	8.148
BusRP2E1	6.30	3.095	-8.840	9.366	0.000	0.000	0.000	7.656	2.680	8.111	7.656	2.680	8.111
BusRP5E1	6.30	2.041	-9.653	9.866	0.000	0.000	0.000	8.360	1.768	8.544	8.360	1.768	8.544
BusRP6E1	6.30	2.648	-8.852	9.240	0.000	0.000	0.000	7.666	2.293	8.002	7.666	2.293	8.002
BusRP7E1	6.30	3.268	-6.022	6.852	0.000	0.000	0.000	5.215	2.831	5.934	5.215	2.831	5.934
BusRP8E1	6.30	3.519	-2.431	4.278	0.000	0.000	0.000	2.106	3.048	3.704	2.106	3.048	3.704
BusRP11E1	6.30	2.894	-3.687	4.687	0.000	0.000	0.000	3.193	2.506	4.059	3.193	2.506	4.059
BusTP1-E1	0.48	5.658	-17.955	18.826	5.849	-19.085	19.962	15.550	4.900	16.304	12.529	15.082	19.607
BusTP2-E1	0.48	5.487	-18.310	19.115	5.718	-19.349	20.176	15.857	4.752	16.554	12.874	15.008	19.773
BusTP3-E1	0.48	5.774	-19.223	20.072	6.031	-20.371	21.245	16.648	5.001	17.382	13.493	15.832	20.802
BusTP4-E1	0.48	5.962	-18.832	19.753	6.175	-20.079	21.007	16.309	5.163	17.107	13.113	15.913	20.619
BusTP6-E1	0.48	5.825	-19.176	20.042	6.069	-20.336	21.223	16.607	5.045	17.356	13.442	15.867	20.795
BusTP7-E1	0.48	5.825	-19.176	20.042	6.069	-20.336	21.223	16.607	5.045	17.356	13.442	15.867	20.795
BusTP8-E1	0.48	7.081	-9.653	11.972	7.353	-10.307	12.661	8.360	6.133	10.368	4.542	11.657	12.511
BusTP9-E1	0.48	7.007	-10.348	12.497	7.290	-10.817	13.045	8.962	6.068	10.823	5.163	11.734	12.819
BusTP10-E1	0.48	5.755	-17.859	18.764	5.923	-19.015	19.916	15.466	4.984	16.250	12.424	15.147	19.590
BusTP11-E1	0.48	6.249	-17.648	18.722	6.298	-18.866	19.890	15.284	5.412	16.214	12.134	15.535	19.712
BusTP12-E1	0.48	6.161	-17.761	18.799	6.229	-18.949	19.947	15.382	5.336	16.281	12.252	15.482	19.743
BusTP13-E1	0.48	6.831	-16.814	18.149	6.771	-18.255	19.470	14.561	5.916	15.717	11.266	15.872	19.463
BusTP14-E1	0.48	7.240	-16.111	17.663	7.125	-17.735	19.113	13.953	6.270	15.297	10.541	16.083	19.229
BusTP15-E1	0.48	7.099	-9.319	11.715	7.374	-10.057	12.471	8.071	6.148	10.145	4.244	11.601	12.353
BusTP16-E1	0.48	7.096	-8.622	11.167	7.396	-9.523	12.058	7.467	6.145	9.671	3.625	11.445	12.005
BusTP17-E1	0.48	7.100	-8.750	11.268	7.394	-9.622	12.135	7.578	6.149	9.759	3.738	11.478	12.071
BusTP18E1	0.48	5.327	-18.332	19.090	5.599	-19.364	20.157	15.876	4.613	16.532	12.926	14.873	19.705
BusTP19E1	0.48	5.327	-18.332	19.090	5.599	-19.364	20.157	15.876	4.613	16.532	12.926	14.873	19.705
BusTP20-E1	0.48	9.892	-14.629	17.659	10.653	-15.817	19.070	12.669	8.567	15.293	6.899	17.174	18.508
BusTP21-E1	0.48	9.791	-15.220	18.097	10.576	-16.274	19.408	13.181	8.479	15.673	-18.929	0.262	18.931
BusTP22-E1	0.48	9.908	-14.520	17.578	10.665	-15.732	19.006	12.574	8.580	15.223	6.800	17.162	18.461
BusTP25-E1	0.48	8.475	-9.505	12.735	8.516	-9.488	12.749	8.231	7.340	11.029	-12.509	-2.604	12.778

Figura 3.8 Resultados de la simulación para la corriente de cortocircuito de estado estable.

3.3.4 Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito máximo.

Short-Circuit Summary Report

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	ID	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault				*Line-to-Line-to-Ground			
			I _k	i _p	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k	I _k	i _p	I _b	I _k
Bus II		6.300	11.849	29.971	11.849	0.000	0.000	0.000	0.000	10.262	25.956	10.262	10.262	10.262	25.956	10.262	10.262
Bus IV		6.300	11.849	29.971	11.849	0.000	0.000	0.000	0.000	10.262	25.956	10.262	10.262	10.262	25.956	10.262	10.262
BusRP1E1		6.300	10.108	20.483	10.108	0.000	0.000	0.000	0.000	8.754	17.739	8.754	8.754	8.754	17.739	8.754	8.754
BusRP2E1		6.300	10.069	20.329	10.069	0.000	0.000	0.000	0.000	8.720	17.605	8.720	8.720	8.720	17.605	8.720	8.720
BusRP3E1		6.300	10.481	23.505	10.481	0.000	0.000	0.000	0.000	9.077	20.356	9.077	9.077	9.077	20.356	9.077	9.077
BusRP6E1		6.300	9.898	20.718	9.898	0.000	0.000	0.000	0.000	8.572	17.943	8.572	8.572	8.572	17.943	8.572	8.572
BusRP7E1		6.300	7.593	13.723	7.593	0.000	0.000	0.000	0.000	6.576	11.884	6.576	6.576	6.576	11.884	6.576	6.576
BusRP8E1		6.300	5.226	7.758	5.226	0.000	0.000	0.000	0.000	4.526	6.718	4.526	4.526	4.526	6.718	4.526	4.526
BusRP11E1		6.300	5.391	8.872	5.391	0.000	0.000	0.000	0.000	4.668	7.684	4.668	4.668	4.668	7.684	4.668	4.668
BusTP1-E1		0.480	21.221	42.473	21.221	22.554	45.141	22.554	22.554	18.378	36.783	18.378	18.378	22.064	44.160	22.064	22.064
BusTP2-E1		0.480	21.531	43.554	21.531	22.786	46.092	22.786	22.786	18.647	37.719	18.647	18.647	22.253	45.015	22.253	22.253
BusTP3-E1		0.480	22.568	45.642	22.568	23.950	48.437	23.950	23.950	19.544	39.527	19.544	19.544	23.368	47.259	23.368	23.368
BusTP4-E1		0.480	22.227	44.456	22.227	23.693	47.390	23.693	23.693	19.249	38.500	19.249	19.249	23.159	46.321	23.159	23.159
BusTP6-E1		0.480	22.538	45.471	22.538	23.928	48.275	23.928	23.928	19.518	39.379	19.518	19.518	23.360	47.129	23.360	23.360
BusTP7-E1		0.480	22.538	45.471	22.538	23.928	48.275	23.928	23.928	19.518	39.379	19.518	19.518	23.360	47.129	23.360	23.360
BusTP8-E1		0.480	13.617	21.919	13.617	14.378	23.144	14.378	14.378	11.793	18.982	11.793	11.793	14.142	22.763	14.142	14.142
BusTP9-E1		0.480	14.143	23.112	14.143	14.764	24.126	14.764	14.764	12.248	20.016	12.248	12.248	14.499	23.694	14.499	14.499
BusTP10-E1		0.480	21.159	42.139	21.159	22.507	44.825	22.507	22.507	18.324	36.494	18.324	18.324	22.045	43.905	22.045	22.045
BusTP11-E1		0.480	21.152	41.221	21.152	22.506	43.860	22.506	22.506	18.318	35.699	18.318	18.318	22.192	43.249	22.192	22.192
BusTP12-E1		0.480	21.231	41.568	21.231	22.564	44.179	22.564	22.564	18.386	35.999	18.386	18.386	22.226	43.517	22.226	22.226
BusTP13-E1		0.480	20.573	38.828	20.573	22.077	41.665	22.077	22.077	17.817	33.626	17.817	17.817	21.930	41.388	21.930	21.930
BusTP14-E1		0.480	20.086	37.000	20.086	21.714	39.999	21.714	21.714	17.395	32.043	17.395	17.395	21.690	39.955	21.690	21.690
BusTP15-E1		0.480	13.359	21.355	13.359	14.187	22.679	14.187	14.187	11.569	18.494	11.569	11.569	13.982	22.351	13.982	13.982
BusTP16-E1		0.480	12.806	20.196	12.806	13.771	21.718	13.771	13.771	11.090	17.490	11.090	11.090	13.629	21.494	13.629	13.629
BusTP17-E1		0.480	12.909	20.407	12.909	13.849	21.893	13.849	13.849	11.179	17.673	11.179	11.179	13.696	21.651	13.696	13.696
BusTP18E1		0.480	21.493	43.772	21.493	22.757	46.347	22.757	22.757	18.613	37.907	18.613	18.613	22.215	45.242	22.215	22.215
BusTP19E1		0.480	21.493	43.772	21.493	22.757	46.347	22.757	22.757	18.613	37.907	18.613	18.613	22.215	45.242	22.215	22.215
BusTP20-E1		0.480	20.000	32.835	20.000	21.595	35.452	21.595	21.595	17.321	28.436	17.321	17.321	21.003	34.481	21.003	21.003
BusTP21-E1		0.480	20.456	33.889	20.456	21.933	36.372	21.933	21.933	17.698	29.349	17.698	17.698	21.488	35.633	21.488	21.488
BusTP22-E1		0.480	19.919	32.642	19.919	21.531	35.284	21.531	21.531	17.250	28.269	17.250	17.250	20.913	34.272	20.913	20.913
BusTP25-E1		0.480	15.073	23.758	15.073	15.120	23.833	15.120	15.120	13.054	20.575	13.054	13.054	15.143	23.869	15.143	15.143

Figura 3.9 Resultados de la simulación para la corriente de cortocircuito máxima.

3.3.5 Resultados de los cálculos por la norma IEC 60909 para el cortocircuito mínimo.

Short-Circuit Summary Report

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault				*Line-to-Line-to-Ground			
		Ik	ip	I _g	Ik	ip	I _b	I _k	Ik	ip	I _b	I _k	Ik	ip	I _b	I _k
Bus II	6.300	11.211	28.386	11.211	0.000	0.000	0.000	0.000	9.709	24.583	9.709	9.709	9.709	24.583	9.709	9.709
Bus IV	6.300	11.211	28.386	11.211	0.000	0.000	0.000	0.000	9.709	24.583	9.709	9.709	9.709	24.583	9.709	9.709
BusRP1E1	6.300	9.546	19.529	9.546	0.000	0.000	0.000	0.000	8.267	16.912	8.267	8.267	8.267	16.912	8.267	8.267
BusRP2E1	6.300	9.509	19.384	9.509	0.000	0.000	0.000	0.000	8.235	16.787	8.235	8.235	8.235	16.787	8.235	8.235
BusRP3E1	6.300	9.884	22.311	9.884	0.000	0.000	0.000	0.000	8.560	19.322	8.560	8.560	8.560	19.322	8.560	8.560
BusRP6E1	6.300	9.332	19.709	9.332	0.000	0.000	0.000	0.000	8.081	17.069	8.081	8.081	8.081	17.069	8.081	8.081
BusRP7E1	6.300	7.154	13.103	7.154	0.000	0.000	0.000	0.000	6.195	11.348	6.195	6.195	6.195	11.348	6.195	6.195
BusRP8E1	6.300	5.030	7.508	5.030	0.000	0.000	0.000	0.000	4.356	6.502	4.356	4.356	4.356	6.502	4.356	4.356
BusRP11E1	6.300	5.088	8.493	5.088	0.000	0.000	0.000	0.000	4.406	7.355	4.406	4.406	4.406	7.355	4.406	4.406
BusTP1-E1	0.480	18.446	37.019	18.446	19.567	39.270	19.567	19.567	15.974	32.059	15.974	15.974	19.139	38.411	19.139	19.139
BusTP2-E1	0.480	18.710	37.915	18.710	19.765	40.052	19.765	19.765	16.204	32.836	16.204	16.204	19.306	39.121	19.306	19.306
BusTP3-E1	0.480	19.617	39.749	19.617	20.779	42.103	20.779	20.779	16.989	34.423	16.989	16.989	20.276	41.084	20.276	20.276
BusTP4-E1	0.480	19.326	38.764	19.326	20.561	41.241	20.561	20.561	16.737	33.571	16.737	16.737	20.094	40.304	20.094	20.094
BusTP6-E1	0.480	19.592	39.609	19.592	20.761	41.971	20.761	20.761	16.967	34.303	16.967	16.967	20.269	40.978	20.269	20.269
BusTP7-E1	0.480	19.592	39.609	19.592	20.761	41.971	20.761	20.761	16.967	34.303	16.967	16.967	20.269	40.978	20.269	20.269
BusTP8-E1	0.480	11.851	19.119	11.851	12.484	20.142	12.484	12.484	10.263	16.558	10.263	10.263	12.273	19.800	12.273	12.273
BusTP9-E1	0.480	12.284	20.097	12.284	12.801	20.942	12.801	12.801	10.639	17.404	10.639	10.639	12.589	20.595	12.589	12.589
BusTP10-E1	0.480	18.394	36.746	18.394	19.529	39.013	19.529	19.529	15.930	31.823	15.930	15.930	19.123	38.202	19.123	19.123
BusTP11-E1	0.480	18.401	36.015	18.401	19.537	38.238	19.537	19.537	15.936	31.190	15.936	15.936	19.253	37.683	19.253	19.253
BusTP12-E1	0.480	18.466	36.300	18.466	19.585	38.499	19.585	19.585	15.992	31.437	15.992	15.992	19.282	37.904	19.282	19.282
BusTP13-E1	0.480	17.919	34.036	17.919	19.180	36.430	19.180	19.180	15.518	29.476	15.518	15.518	19.029	36.144	19.029	19.029
BusTP14-E1	0.480	17.514	32.517	17.514	18.879	35.049	18.879	18.879	15.168	28.160	15.168	15.168	18.826	34.953	18.826	18.826
BusTP15-E1	0.480	11.637	18.656	11.637	12.327	19.761	12.327	12.327	10.078	16.156	10.078	10.078	12.139	19.461	12.139	12.139
BusTP16-E1	0.480	11.180	17.697	11.180	11.984	18.970	11.984	11.984	9.683	15.326	9.683	9.683	11.846	18.750	11.846	11.846
BusTP17-E1	0.480	11.265	17.872	11.265	12.049	19.114	12.049	12.049	9.756	15.478	9.756	9.756	11.901	18.881	11.901	11.901
BusTP18E1	0.480	18.674	38.084	18.674	19.738	40.253	19.738	19.738	16.172	32.982	16.172	16.172	19.288	39.335	19.288	19.288
BusTP19E1	0.480	18.674	38.084	18.674	19.738	40.253	19.738	19.738	16.172	32.982	16.172	16.172	19.288	39.335	19.288	19.288
BusTP20-E1	0.480	17.426	28.673	17.426	18.769	30.883	18.769	18.769	15.091	24.832	15.091	15.091	18.291	30.098	18.291	18.291
BusTP21-E1	0.480	17.787	29.540	17.787	19.048	31.634	19.048	19.048	15.404	25.582	15.404	15.404	18.690	31.039	18.690	18.690
BusTP22-E1	0.480	17.359	28.515	17.359	18.716	30.746	18.716	18.716	15.033	24.695	15.033	15.033	18.218	29.926	18.218	18.218
BusTP25-E1	0.480	13.344	21.269	13.344	13.375	21.319	13.375	13.375	11.556	18.419	11.556	11.556	13.390	21.343	13.390	13.390

Figura 3.10 Resultados de la simulación para la corriente de cortocircuito mínimo.

3.4 Análisis de los resultados obtenidos.

Por la norma ANSI se corrieron en total seis simulaciones, dos simulaciones para la corriente de primer ciclo, dos para la corriente de interrupción y dos para la corriente de cortocircuito de estado estable.

La selección de equipamiento toma los valores máximos de la red de medio ciclo y de la red de interrupción, estos valores son máximos en las simulaciones del escenario Máximo, este corresponde a la figura 3.1 y figura 3.2.

Los ajustes de sobrecorriente de los relés toman los valores mínimos de la red de estado estable, estos valores son mínimos para en las simulaciones del escenario Mínimo, este corresponde a la figura 3.8.

Por la norma IEC 60909 se corrieron en total cuatro simulaciones, dos simulaciones para la corriente máxima y dos para la corriente mínima.

La selección de equipamiento toma los valores máximos, estos valores son máximos en las simulaciones del escenario Máximo, para el caso de obtención de las corrientes máximas, este corresponde a la figura 3.4.

Los ajustes de sobrecorriente de los relés toman los valores mínimos, estos valores son mínimos en las simulaciones del escenario Mínimo, para el caso de obtención de las corrientes mínimas, este corresponde a la figura 3.10.

Como se explicó en el capítulo dos la metodología que siguen estas dos normas es diferente por lo que no existe una correspondencia entre los valores obtenidos, en la Tabla 3.2 se muestran los resultados de las corrientes de cortocircuito trifásico para seis subestaciones. La utilización de una u otra norma está en correspondencia de la adopción de estas por cada país, pero el equipamiento que se fabrica y se vende internacionalmente, está certificado por una sola norma, la norma ANSI o la norma IEC60909.

Tabla 3.2 Valores de las corrientes para el cortocircuito trifásico por las normas ANSI e IEC 60909.

CC 3Ø	ANSI			IEC		
	1/2	1 1/2	30	I''k	Ip	I''k
Bus II	22.01 6	19.3 45	11.2 69	24.47 2	59.98 6	11.2 11
Bus IV	20.81 3	18.5 2	11.2 69	23.20 8	56.99 3	11.2 11
RP5	17.95 7	15.9 52	9.86 6	20.13 7	42.28 3	9.88 4
RP11	5.821	5.46 8	4.68 7	7.103	11.54 3	5.08 8
TP1	16.75 4	16.2 36	18.8 26	19.79 7	33.45 7	18.4 46
TP17	12.64 7	7.72 7	11.2 68	15.31 1	24.62 1	11.2 65

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

Después de realizar los análisis de los resultados de este trabajo podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- Los estudios de cortocircuito serán realizados en correspondencia con la norma de fabricación del equipamiento, en caso de querer validar el equipamiento para nuevas condiciones.
- Realizar en el programa por el que se simularán los escenarios una plantilla lo más completa de la instalación en estudio nos permitió realizar las simulaciones con todos los cambios requeridos.
- Siempre que existan dos escenarios para las simulaciones, bajo la norma ANSI solo se realizarán las simulaciones para calcular las corrientes de medio ciclo y de interrupción para el escenario de máximo valor de cortocircuito en la fuente, para el escenario de mínimo valor de cortocircuito en la fuente solo se calculara la corriente de estado estable. Bajo la norma IEC 60909 la simulación para obtener los valores máximos de cortocircuito solo se utilizara en el escenario de máximo valor de cortocircuito en la fuente, en el escenario de mínimo valor de cortocircuito en la fuente solo se realizará la simulación para obtener los valores mínimos.

Recomendaciones

Después de realizado el estudio de cortocircuito por ambas normas y teniendo en consideración que no existe un estudio de cortocircuito previo y que las instalaciones eléctricas de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” se encuentran en fase de expansión y modernización con la incorporación de un SCADA eléctrico, se recomienda lo siguiente:

- Realizar una validación de los interruptores actuales por este estudio de cortocircuito.
- Validar los ajustes para cortocircuito de las protecciones existentes.
- Señalar los cambios en la filosofía de las protecciones por la incorporación del SCADA.
- Recomendar las características de los interruptores en cada subestación según este estudio de cortocircuito para las modernizaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Calculating Short- Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems," in *IEEE Std 551*, ed. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006.
- [2] API, *API RP 4th, Electrical Installation in Petroleum Processing Plants*. Washington, D.C. USA.: API Publishing Services, 1999.
- [3] A. G. D. Donald Beeman, R. H. Kaufmann, Ed., *Industrial Power Systems Handbook*. Schenectady, New York, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1995, p. App. Pages.
- [4] T. J. D. J. Lewis Blackburn. (2006). *Protective Relaying Principles and Applications Third Edition*. Available: <http://www.crcpress.com>
- [5] IEEE, "IEEE Std 141-1993, Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants," in *IEEE Std 141*, ed. Piscataway, NJ, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1993.
- [6] IEEE, "Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis," in *IEEE Std 399*, ed. Schenectady, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1998, p. 495.
- [7] C. P. A. J. Arrillaga, B. J. Harker, . (1991). *Computer Modelling of Electrical Power Systems*.
- [8] PEMEX, *Diseño de Instalaciones Eléctricas* vol. NRF-048-PEMEX-2007. D.F., México: PEMEX, 2007.
- [9] National Fire Protection Association, "NFPA 70," in *National Electrical Code*, ed. Quincy, MA, USA: NFPA, 2011, p. 879.
- [10] S. Khan. (2008). *Industrial Power Systems*.
- [11] ABB, "Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión," ed. Barcelona ,España: ABB Automation Products, S.A., 2002, p. 716.
- [12] IEEE, "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems," in *IEEE Std 242*, ed. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001, p. 750.
- [13] Christophe Prévé. (2006). *Protection of Electrical Networks*.
- [14] ABB, "Manual técnico de instalaciones eléctricas, Aparatos de protección y maniobra," vol. Tomo 1, ed. Bergamo ,Italia: ABB SACE, 2007.
- [15] ABB, "Technical guide - Electrical installation handbook Protection, control and electrical devices Six Edition," ed. Bergamo, Italy: ABB SACE, 2010.
- [16] S. Electric, "Protecciones eléctricas en Media Tensión " in *PT-071*, ed. Barcelona, España: Schneider Electric, 2015.

- [17] Luiz Felipe O. Costa; et. al., "Differences and similarities between ANSI and IEC cultures for MV assemblies— the Brazilian experience," *IEEE*, p. 12, 2013.
- [18] ABB, "Protection Application Handbook: BA THS / BU Transmission Systems and Substations," ed. Zürich, Switzerland: Lec Support Programme, 2006, p. 356.
- [19] F. D. B. de Metz-Noblat, G. Thomasset, "Cuaderno Técnico nº 158, Cálculo de corrientes de cortocircuito," ed. Barcelona, Spain: Schneider Electric España S.A., 2000.
- [20] Z. L. Ipiates Angamarca and F. V. Morales Pastrano, "Diseño para la Implementación de un Shelter Modular de Potencia para Monitoreo, Operación Y Control en una Isla de Producción de Crudo del Sector Amazónico," Título de Ingeniero Eléctrico, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador., 2013.
- [21] M. V. Deshpande. (2001). *Electrical Power System Design*.
- [22] Syed A. Nasar. (1990). *Sistemas Eléctricos de Potencia*.
- [23] H. A. Ferrer, *Protección de Redes Eléctricas*. Santa Clara, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, 1990.
- [24] Robert Capella, "Conceptos generales de instalaciones trifásicas de MT," ed. Barcelona, España: Schneider Electric España S.A., 2001, p. 64.
- [25] S. Electric, *Manual teórico-práctico Instalaciones en Baja Tensión* vol. 5.2. Tecfoto, S.L. Ciutat de Granada, 55. 08005 Barcelona, España: Schneider Electric España, S.A., 2008.
- [26] W. D. S. J. John J. Grainger. (2002). *Análisis de Sistemas de Potencia*.
- [27] V. J. Vázquez Bojórquez, "Estudio Comparativo de las Normas IEC y ANSI para Cálculo de Corto Circuito," Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, D.F., México, 2007.
- [28] Ismail Kasikci. (2002). *Short Circuits in Power Systems: A Practical Guide to IEC 60909*.
- [29] Emilio Andrés Francesena Bacallao, "Aplicación de Interruptores Automáticos de Caja Moldeada en la Industria Cubana," Master en Ingeniería Eléctrica, Electroenergética, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara , Cuba, 2001.
- [30] E. 12.6, "ETAP HELP," 12.6 ed: Opration Technology, 2014.
- [31] ETAP Powering Success, "Cortocircuitos ANSI & IEC, Flujo de carga, Arranque de motores ", ed: Genin & Garcés, S.L, 2015, p. 14.