



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Tesis:

Estudio de cortocircuito en la Central Hidroeléctrica Callahuanca,
empleando ETAP

Que para obtener el grado de:

Ingeniera Electricista

Presenta:

Daniela Ramirez Luz

Asesor de Tesis

M.M.E. María Alejandra Martínez Gutiérrez

Morelia, Michoacán, julio de 2018



I. Dedicatoria

A mi madre, quien me dio la vida y la oportunidad de formarme profesionalmente y para quien es todo el mérito de este logro.

A mis hermanos, quienes me brindaron su apoyo incondicional durante toda mi formación profesional y que han sido pieza fundamental a lo largo de toda mi vida.

A dios, por las oportunidades, las adversidades y las ganas de ser una mejor persona.

II. Agradecimientos

A las personas que han sido apoyo en todo momento, maestros, compañeros y amigos más cercanos, y a quienes me han brindado la oportunidad de seguir aprendiendo dentro de lo laboral.

III. Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el análisis de cortocircuito de una central hidroeléctrica de media tensión, haciendo uso de la herramienta de software ETAP (Electrical Transient and Analysis Program).

Siendo una central hidroeléctrica un sistema eléctrico con múltiples subsistemas, algunos de ellos derivados y/o conjuntos de uno mismo. Este trabajo de investigación se enfoca en el estudio de cortocircuito con ETAP, el cual nos permite realizar estudios a sistemas de mayor tamaño, observar fallas en todos los puntos que se deseen, y rediseñar el sistema si así se requiriere.

Se realiza el estudio utilizando la norma ANSI, se redacta la interpretación de los resultados obtenidos y enseguida se toma un punto de falla en específico y se realiza manualmente, para hacer sustento de los valores que esta herramienta computacional ofrece.

Se presenta información que sirva de apoyo en el uso de dicho software, mostrando algunas de sus herramientas de prioridad dentro del diseño de un análisis de cortocircuito, así como las ventajas y desventajas del mismo.

Se hace énfasis en que a medida que la industria se moderniza y nuevas tecnologías surgen, se convierte en una necesidad emprender nuevos retos, específicamente en los sistemas eléctricos. Actualmente con la introducción de sistemas electrónicos modernos y las energías alternas, el tamaño de las redes que está aumentando continuamente, etcétera. Todo esto se vuelven en conjunto con los factores que ya se conocen, factores que propician fallos en la red y los sistemas de potencia, por esto se recomienda que el estudio de cortocircuito se haga con más frecuencia, con la mayor precisión y confiabilidad posible, cabe mencionar que si bien lo anterior son características de suma importancia en cualquier estudio, también lo son para cualquier software que se implemente.

Tomando en cuenta que es necesario que el ingeniero electricista de diseño tenga la correcta interpretación de los resultados obtenidos ya que éstos finalmente nos llevarán a la implementación adecuada de protecciones, y en conjunto salvaguardar el sistema y principalmente vidas humanas.

Palabras clave:

- Energía
- Componentes simétricas
- Estado Subtransitorio
- Estado transitorio
- Estado síncrono

III. Abstract

In this thesis is presented the short circuit analysis of a medium voltage hydroelectric power station, using the ETAP (Electrical Transient and Analysis Program) software tool.

Being a hydroelectric power plant an electrical system with multiple subsystems, some of them derived and / or sets of itself. This research work focuses on the short circuit study with ETAP, which allows us to perform studies on larger systems, observe faults in all the points that are desired, and redesign the system if required.

The study is carried out using the ANSI standard, the interpretation of the obtained results is written and then a specific failure point is taken and the study is performed manually to validate the values that this computational tool offers.

Information is presented to support the use of said software, showing some of its priority tools in the design of a short circuit analysis, as well as its advantages and disadvantages.

It is emphasized that as the industry is modernized and new technologies emerge, it becomes a necessity to undertake new challenges, specifically in electrical systems. Currently with the introduction of modern electronic systems and alternate energies, the size of networks that is continuously increasing, and so on. All this becomes in conjunction with the factors that are already known, factors that cause failures in the network and power systems, so it is recommended that the short circuit study be done more frequently, with the highest precision and reliability, It is worth mentioning that although the above are very important features in any study, they are also important for any software that is implemented.

Taking into account that it is necessary for the design engineer to have the correct interpretation of the results obtained since these will eventually lead us to the adequate implementation of protections, and together to safeguard the system and mainly human lives.

IV. Tabla de Contenidos

I. Dedicatoria	1
II. Agradecimientos	1
III. Resumen	2
III. Abstract.....	3
IV. Tabla de Contenidos.....	4
V. Lista de Figuras	7
VI. Nomenclatura	9
Capítulo 1: Introducción.....	10
1.1 Planteamiento del Problema.....	10
1.2 Propuesta de Solución	10
1.3 Antecedentes	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivos Generales.....	11
1.2.2 Objetivos Particulares	11
1.3 Justificación.....	11
1.4 Descripción de Capítulos	12
1.4.1 Capítulo 2: Marco Teórico.....	12
1.4.2 Capítulo 3: Contraste de Herramientas Computacionales.	12
1.4.3 Capítulo 4: Herramientas de ETAP.	12
1.4.3 Capítulo 5: Pruebas y Resultados.	12
1.4.4 Capítulo 6: Estudio de Cortocircuito Mediante ETAP.	12
1.4.5 Capítulo 7: Conclusiones.	12
Capítulo 2: Marco Teórico	13
2.1 Cortocircuito.....	13
2.1.1 Consecuencias de los Cortocircuitos	14
2.1.2 Tipos/Estados de Cortocircuito.....	15
2.2 Fuentes de Cortocircuito	16
2.2.1 Generadores	16
2.2.2 Motores Síncronos	17
2.2.3 Motores de Inducción	17
2.2.4 Alimentación de la Fuente de Suministro de la Red (Compañía Suministradora).....	18

2.3 Central Hidroeléctrica	19
2.3.1 Represa Hidráulica.....	19
2.3.2 Embalse.....	19
2.3.3 Toma de Agua.....	19
2.3.4 Tubería Forzada o Tubería de Presión o Impulsión.....	20
2.3.5 Aliviaderos.....	20
2.3.6 Casa de Máquinas o Sala de Turbinas	20
2.3.6 Transformadores	20
2.3.7 Líneas de Transporte de Energía Eléctrica	20
2.4 Normas	21
2.4.1 La Norma ANSI	21
2.4.2 La Norma IEC.....	23
2.5 Descripción e Introducción a ETAP.....	25
Capítulo 3: Contraste de Herramientas Computacionales.....	27
3.1 PSAF de CYME Instruments (T&D).....	27
Capítulo 4: Herramientas del Software	31
4.1 Crear un Documento Nuevo en ETAP	31
4.2 Edición de Datos para Componentes	33
4.2.1 Generador.....	33
4.2.2 Transformador	35
4.2.3 Red Eléctrica.....	38
4.2.4 Cables.....	40
4.2.5 Generador de Reportes.....	44
Capítulo 5: Pruebas y Resultados	46
5.1 Determinación de la Corriente de Cortocircuito Trifásica	46
5.1.1 Desarrollo.....	47
5.1.2 Operaciones.....	49
5.2 Resultados en ETAP.....	51
Capítulo 6: Análisis de Cortocircuito Mediante ETAP	53
6.1 Datos e Información del Sistema	53
6.2 Diagrama Unifilar de la Planta.....	54
6.3 Consideraciones Generales para el Cálculo	56
6.3.1 Metodología Implementada por ANSI.....	56
6.4 Corriente de Primer Ciclo Momentánea.....	60
6.5 Corriente de 1,5-4 Ciclos (Transitoria)	61
6.6 Corriente en Estado Estacionario o de Tiempo Retardado	62
6.7 Diagrama Unifilar Completo del Sistema	63

Capítulo 7: Conclusiones.....	64
7.1 Retos considerables durante este trabajo de tesis.....	65
7.2 Recomendaciones generales:.....	66
Trabajos citados.....	67

V. Lista de Figuras

Figura 2.1. Imagen de la clasificación de las principales fallas de cortocircuito en corriente alterna.

Figura 2.2. Variación de la corriente de cortocircuito suministrada por las máquinas sincrónicas.

Figura 2.3. Corriente de corto circuito de una falla lejana de un generador, corriente alterna constante. (IEC 60909 - 1era Edición 2001)

Figura 2.4. Corriente de corto circuito de una falla cercana de un generador, corriente alterna decreciente. (IEC 60909 - 1era Edición 2001)

Figura 3.1. Muestra el interfaz gráfico, ventana de edición de análisis de cortocircuito en PSAF.

Figura 3.2. Muestra diagrama unifilar y análisis de cortocircuito con su respectivo reporte textual de fallas.

Figura 3.3. Muestra reporte textual de fallas por PSAF.

Figura 3.4. Imagen muestra reporte en formato Word para corrientes de falla trifásica, LG, LL y LLG. Estándar ANSI para ½ ciclo en ETAP.

Figura 4.1. Ventana para crear nuevo documento en ETAP

Figura 4.2. Muestra Interfaz gráfico de ETAP, área de edición, diseño y estudio.

Figura 4.3. Ventana de edición de datos de componente generador, dentro de ETAP.

Figura 4.4. La imagen muestra la ventana de edición de los datos más relevantes a introducir al transformador.

Figura 4.5. Devanados del transformador.

Figura 4.6. Imagen muestra ventana de edición de datos correspondientes a impedancias en transformador.

Figura 4.7. En la imagen se visualiza la ventana de edición de la acometida de red de energía externa.

Figura 4.8. Muestra la ventana de edición de los datos más relevantes de los Cables dentro del diseño en ETAP

Figura 4.9. Muestra librería de cables completa para sistema Ingles y métrico.

Figura 4.10 Imagen muestra pasos para indicar un bus en falla.

Figura 4.11. La barra mostrada de lado izquierdo contiene los botones disponibles para el uso de ETAP en modo de análisis en el estándar ANSI.

Figura 4.12. La ventana de opciones dependerá del estándar y el tipo de estudio que implementemos.

Figura 4.13. Imagen muestra Administrador de reportes

Figura 5.1. Muestra diagrama bajo estudio, y valores correspondientes a cada equipo.

Figura 5.2. Diagrama unifilar de sistema bajo estudio matemático, muestra flujo de corrientes adoptadas.

Figura 5.3. Flujo de corriente correspondiente a reducción para procedimiento matemático.

Figura 5.4. Corrida en ETAP de diagrama bajo estudio, mostrando dirección de contribuciones de corrientes de cortocircuito.

Figura 6.1 Primera parte de diagrama unifilar de central Callahuanca

Figura 6.2 Segunda parte de diagrama unifilar de central Callahuanca

Figura 6.3. Muestra descripción de diagrama unifilar del sistema.

Figura 6.4. Muestra datos de entradas relevantes de generadores y red de potencia externa.

Figura 6.5. Muestra resultados explícitos del estudio de cortocircuito.

Figura 6.6. Imagen de diagrama unifilar en estándar ANSI.

VI. Nomenclatura

ANSI	American National Standard Institute
IEC	International Electro technical Commission
A	Unidad de corriente eléctrica, amperios.
I_{cc}	Corriente de cortocircuito.
MVA	Unidad de potencia eléctrica aparente.
MVA_{cc}	Mega volts ampere de cortocircuito.
MVA_{eq}	Mega volts ampere equivalente.
km	Unidad de distancia, kilómetro.
kg	Unidad de masa, kilogramo.
kV	Unidad de tensión eléctrica, kilo volt.
s	Unidad de tiempo, segundo.
X''_d	Reactancia subtransitoria
X'_d	Reactancia transitoria
X_d	Reactancia síncrona
Z_{eq}	Impedancia equivalente.
FM	Factor de multiplicación.
ICs	Interruptores de circuito, entiéndase por interruptor o disyuntor.
I_k	Corriente de cortocircuito estacionaria
I_k''	Corriente de cortocircuito Inicial simétrica
I_b	Corriente de interrupción de cortocircuito simétrica
I_{d.c}	Componente de CD de la corriente de cortocircuito
I_p	Peak short-circuit current
S_k, S_k''	Potencia de cortocircuito
X_{di}	Corriente nominal insaturada
X_{dv}	Corriente nominal saturada

Capítulo 1: Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

En todo sistema eléctrico en el que interactúan componentes activos existen riesgos de fallas de cortocircuito, aun con el sistema mejor diseñado estas fallas siempre se harán presentes, por lo que este tema no es nuevo. Se sabe que estas fallas producen flameos, arcos eléctricos y daños severos a equipos cercanos, produciendo pérdidas monetarias significativas, poniendo también en riesgo la seguridad del personal de mantenimiento y de operación, por lo tanto es de suma importancia hacer frente a dichas fallas.

Una de las maneras en que se han prevenido y atacado estos eventos, es haciendo el diseño, estudio y análisis de cortocircuito que proveerá el dimensionamiento adecuado de dispositivos de protección que salvaguardan al sistema y al personal. Este trabajo de investigación se enfoca únicamente en el estudio de cortocircuito, los temas subyacentes de los que se haga mención, son complementos, derivados y/o conjuntos del mismo.

Dicho estudio puede obtenerse mediante un proceso de cálculos matemáticos y/o mediante el uso de algún software especializado, lo que facilita el manejo de grandes cantidades de información.

1.2 Propuesta de Solución

El trabajo que se propone en esta tesis es el uso del software ETAP como herramienta para el Ingeniero de diseño en el estudio de cortocircuito, proporcionando ventajas tales como facilidad de manejo de datos a gran escala, análisis en el estado de falla deseado, visualización de resultados de forma gráfica que facilita la interpretación, que posteriormente sirva para el correcto dimensionamiento de protecciones, todo esto en el estándar que mejor convenga. Sabemos que el estudio de cortocircuito será el mismo en todo los sistemas, pero hay que hacer mención del sistema a usar (Inglés, Métrico, con 60 Hz o con 50 Hz), ya que son de los factores más serios que hay que considerar.

1.3 Antecedentes

El estudio de cortocircuito es un tema sumamente estudiado y analizado por su importancia dentro de los sistemas eléctricos de potencia, su objetivo es calcular el valor máximo de la corriente y su comportamiento durante el tiempo que permanece. Esto permite determinar el valor de la corriente que debe interrumpirse y conocer el esfuerzo al que son sometidos los equipos durante el tiempo transcurrido desde que se presenta la falla hasta que se interrumpe la circulación de la corriente. Es por ello que es un fenómeno que se ha estudiado ampliamente ya que existen numerosas investigaciones que van desde lo específico hasta lo más generalizado, hay libros que se enfocan en el estudio analítico en donde hacen énfasis en la metodología numérica implementada así como los diferentes modos de realizar este estudio, de la misma manera existen varias herramientas de software en los que la industria se apoya para realizar este estudio de maneras mucho más rápidas y detalladas, en la actualidad podemos servirnos de varios, hay que mencionar que los hay tanto con licencias comerciales o como de uso libre. Y generalmente la metodología de cada uno de ellos es similar, casi idéntica, por lo que el acercamiento a alguno, nos ayudará para el uso de cualquier otro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

- El principal objetivo de este trabajo es hacer énfasis en la importancia del uso de herramientas computacionales, para la estandarización y fácil estudio de cortocircuito en cualquier sistema eléctrico, volviéndonos más eficientes como ingenieros de diseño, reduciendo el tiempo de solución, interpretación y posteriormente de dimensionamiento adecuado de dispositivos de protecciones.
- Proveer información acerca del uso de algunas herramientas importantes y funciones de ETAP especializadas en el diseño y análisis de fallas de cortocircuito en un sistema eléctrico.

1.2.2 Objetivos Particulares

- Desarrollar un ejemplo de diseño y análisis de cortocircuito de una central hidroeléctrica en el cual se muestren todas las corrientes de falla en el estado subtransitorio, transitorio y permanente. Demostrándolo mediante el software ETAP. Haciendo uso de uno de los estándares más frecuentes en la industria, ANSI.
- Hacer un contraste entre herramientas computacionales antes usadas, en este caso PSAF de CYME International.
- Calcular mediante el método de componentes simétricas la corriente de cortocircuito trifásica de un punto de falla en específico, para hacer sustento de los resultados obtenidos mediante el software.

1.3 Justificación

En la industria como en la vida diaria el constante cambio es inevitable, es por ello que estamos sujetos a la globalización y estandarización de todos los nuevos sistemas que van surgiendo y que para conveniencia de implementación se requiere tener conocimiento de ellos, muchos de estos hacen que los proyectos a realizar resulten de algún modo más sencillos de estudiar, pero esto no significa que requieran menos trabajo, se trata más bien de volvernos más eficientes, ya que su uso adecuado potencializa nuestro trabajo, lo cual se refleja en mejores resultados.

En el área de ingeniería eléctrica, los sistemas estudiados requieren de la mayor confiabilidad y diseños que resulten fáciles de interpretar. Específicamente en el estudio de cortocircuito, reuniendo la mayor cantidad de información posible acerca de un software que nos permita introducirnos dentro de este sector industrial que constantemente avanza, conocer la correcta interpretación de los resultados que obtengamos mediante la teoría básica de cortocircuito.

1.4 Descripción de Capítulos

1.4.1 Capítulo 2: Marco Teórico.

Este capítulo describe el cortocircuito y los fenómenos que éste produce, sus principales causas y los factores que contribuyen en el momento en que sucede. Los principales componentes de una central hidroeléctrica que es el sistema a implementar en el estudio, las normas que pueden aplicarse y los métodos mediante los cuales se resuelve.

1.4.2 Capítulo 3: Contraste de Herramientas Computacionales.

En este capítulo se hace mención de una de las herramientas que fue usada dentro de la industria, se describe un poco de sus antecedentes, y se compara con el software ahora usado.

1.4.3 Capítulo 4: Herramientas de ETAP.

Este capítulo muestra algunas de las herramientas más comúnmente usadas dentro del software, sus funciones, algunas ventajas y desventajas.

1.4.3 Capítulo 5: Pruebas y Resultados.

En este capítulo se muestran las pruebas realizadas al software y los resultados obtenidos. Se hace un breve ejercicio matemático que sustente los resultados obtenidos mediante el software.

1.4.4 Capítulo 6: Estudio de Cortocircuito Mediante ETAP.

En este capítulo se detalla todo el proceso de desarrollo e implementación de la herramienta ETAP en el estudio de cortocircuito en una central hidroeléctrica.

1.4.5 Capítulo 7: Conclusiones.

Se presentan las conclusiones generales.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Cortocircuito

El cortocircuito se define como la conexión deliberada o accidental a través de una resistencia o impedancia relativamente baja entre dos o más puntos de un circuito los cuales usualmente tienen diferente voltaje. También se puede explicar el corto circuito como un alto flujo de corriente eléctrica debido a la conexión de un circuito de baja impedancia.

Aun los sistemas eléctricos mejor diseñados y con las protecciones más modernas ocasionalmente experimentan cortocircuitos que resultan en corrientes muy altas que cuando no se interrumpen oportunamente pueden causar fuertes daños y aun la destrucción total de los componentes de una instalación eléctrica.

Una de las características primordiales de los sistemas eléctricos es su dinamismo y vulnerabilidad en cuanto a su disponibilidad en el proceso de suministro de energía a los usuarios. Esta disponibilidad se ve afectada gravemente cuando en el sistema se presenta una de las características anormales más destructivas, denominada cortocircuito.

El cortocircuito es la eliminación de los obstáculos al paso de la corriente, es decir, la disminución repentina de la trayectoria normal que debe seguir dicha corriente, provocándose el flujo de una corriente de gran magnitud comparada con la corriente normal de carga. Las corrientes de cortocircuito dependen de los valores de las impedancias que representan cada uno de los elementos que componen el sistema, a menor impedancia mayor nivel de corriente y viceversa, esto está relacionado con la capacidad de las fuentes de corriente; un generador de gran capacidad aportará mayor corriente que un generador pequeño. Los sistemas eléctricos de potencia, se diseñan para estar tan libres de fallas como sea posible, mediante el uso de equipos especializados y diseños completos y cuidadosos, así como técnicas modernas de construcción y mantenimiento apropiado. Aún con todas las precauciones y medidas antes mencionadas, las fallas ocurren, algunas de las causas principales son las siguientes:

- Sobretensiones de origen atmosférico.
- Envejecimiento prematuro de los aislamientos.
- Falsos contactos y conexiones.
- Presencia de elementos corrosivos.
- Humedad.
- Presencia de roedores.
- Errores humanos.

Cuando ocurre un cortocircuito, se presentan situaciones inconvenientes que se manifiestan con distintos fenómenos, como son:

1. En el punto de la falla se puede presentar un fenómeno de arco eléctrico o fusión de los metales mismos.
2. Las corrientes de cortocircuito, circulan de las fuentes (alimentación de la red y máquinas rotatorias) hacia el punto de la falla.
3. Todas las componentes de la instalación por donde circulan las corrientes de cortocircuito, se ven sujetas a esfuerzos térmicos y dinámicos; éstos varían con el cuadrado de la corriente y la duración de ésta en segundos.
4. Las caídas de voltaje en el sistema están en proporción a la magnitud de las corrientes de cortocircuito. La caída de voltaje máxima se presenta en el punto de ocurrencia de la falla (es prácticamente cero para el valor máximo de falla).

2.1.1 Consecuencias de los Cortocircuitos

Depende de la naturaleza y duración de los defectos, del punto de la instalación afectado y de la magnitud de la intensidad: según el lugar del defecto, la presencia de un arco puede: degradar los aislantes, fundir los conductores, provocar un incendio o representar un peligro para las personas.

según el circuito afectado, pueden presentarse: sobre esfuerzos electrodinámicos, con: deformación de juegos de barras, arrancado o desprendimiento de los cables; sobrecalentamiento debido al aumento de pérdidas por efecto Joule, con riesgo de deterioro de los aislantes; para los otros circuitos eléctricos de la red afectada o de redes próximas: bajadas de tensión durante el tiempo de la eliminación del defecto, de algunos milisegundos a varias centenas de milisegundos; desconexión de una parte más o menos importante de la instalación, según el esquema y la selectividad de sus protecciones; o inestabilidad dinámica y/o pérdida según el sincronismo de las máquinas; o perturbaciones en los circuitos de mando y control; etc.

Dados los disturbios que produce la ocurrencia de un cortocircuito, las fallas se deben remover tan rápido como sea posible y ésta es justamente la función de los dispositivos de protección (interruptores, fusibles, etcétera). De hecho, para cumplir con esta función, los dispositivos de protección deben tener la capacidad de interrumpir la máxima corriente de cortocircuito que pueda circular para una falla en el punto de localización del dispositivo de interrupción.

Como mencionamos en líneas anteriores, el cortocircuito puede llegar a ser sumamente destructivo, una energía incontrolada provoca severo estrés tanto mecánico como térmico en el sistema, también se emiten pulsos electromagnéticos, radiación no ionizante, ruido, en fin... una transformación tras otra de energía.

Dependiendo de la localización y severidad del corto, éste pudiera ocasionar:

- Baja tensión
- Sobre tensión (sobre todo en fallas asimétricas, LT,LL,LLT)
- Inversiones del flujo de potencia (los motores aportan corriente en lugar de consumirla)
- Inestabilidad en generadores

En el sitio donde se produce el corto usualmente se concentra la mayor cantidad de daño, pero también pudiera afectar a los demás elementos de sistema eléctrico, estamos hablando entonces de una falla “pasante” pues no se ha producido en el equipo pero su magnitud si pasa a través de éste.

2.1.2 Tipos/Estados de Cortocircuito

Los cortocircuitos en corriente alterna se clasifican en:

- Trifásicos:** 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, tanto si el cortocircuito se cierra a través de tierra como si estuviera aislado de ella, son nulas, presentando las intensidades igual pero con argumentos desfasados 120° . Es uno de los cortocircuitos más violentos y de obligado cálculo.
- Línea a Línea:** O bifásico, generalmente las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito son menores que las de la falla trifásica, aunque si el cortocircuito se produce en las inmediaciones de máquinas síncronas o asíncronas de cierta potencia, las corrientes de esta falla pueden llegar a presentar valores incluso mayores que las del cortocircuito trifásico.
- Línea-Línea a Tierra:** Dispone de las mismas características que el cortocircuito bifásico sin contacto a tierra, pero en este caso, con pérdida de energía hacia tierra.
- Línea a Tierra:** Este es el cortocircuito más frecuente y violento, produciéndose con mayor frecuencia en redes rígidamente puestas a tierra, o mediante impedancias de bajo valor. Su cálculo es importante, tanto por lo elevado de sus corrientes como por su conexión a tierra, lo que permite calcular las fugas a tierra, las tensiones de contacto o de paso.

Como se muestra en seguida en la figura 2.1.

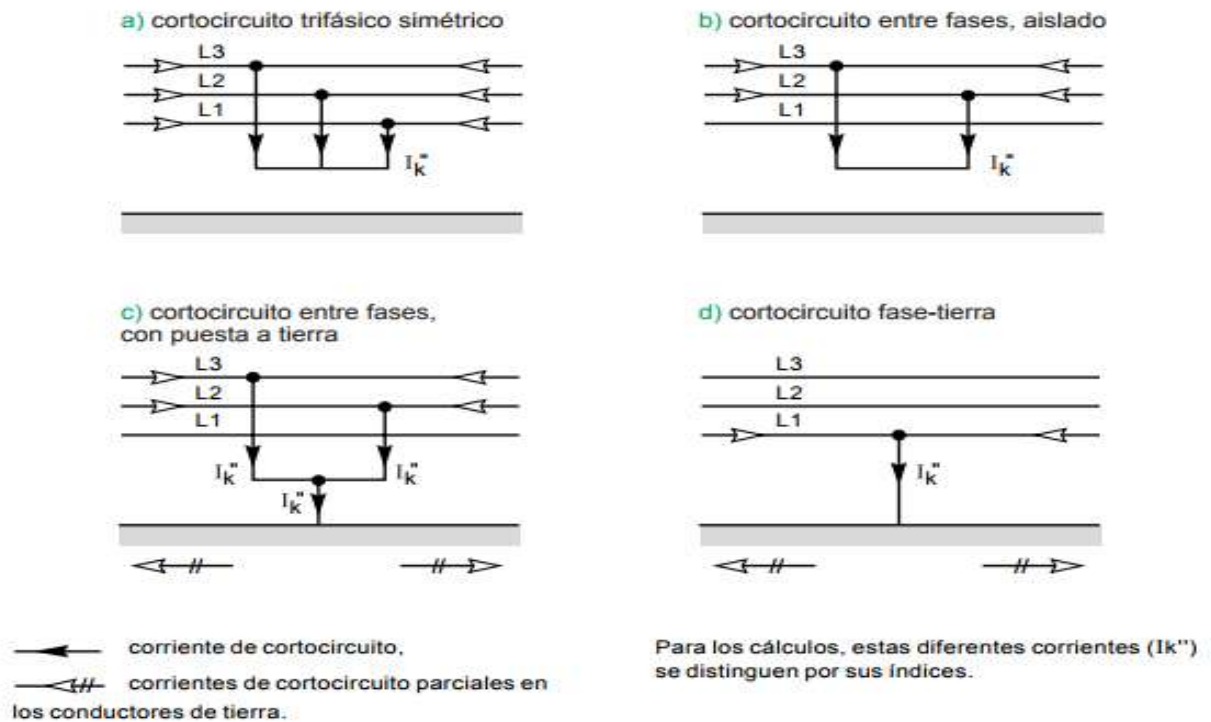


Figura 2.1. Imagen de la clasificación de las principales fallas de cortocircuito en corriente alterna.

2.2 Fuentes de Cortocircuito

Cuando se hace un estudio para determinar la magnitud de las corrientes de cortocircuito, es muy importante que se consideren todas las fuentes de cortocircuito y que las características de las impedancias de estas fuentes sean conocidas. Las principales fuentes de cortocircuito se describen a continuación.

No está de más aclarar que los transformadores, no son fuentes de corrientes de cortocircuito, simplemente se limitan a cambiar la tensión y la corriente de los sistemas, pero no los generan. El transformador más bien limita la corriente de cortocircuito, deja pasar solo una parte de ella, debido a la impedancia presente en sus devanados, y es por ello que se consideran dentro del estudio.

2.2.1 Generadores

Como se sabe, los generadores eléctricos son accionados por turbinas o primo-motores, de modo que cuando ocurre un cortocircuito en el circuito alimentado por el generador, éste tiende a seguir produciendo voltaje, debido a que la excitación del campo se mantiene y el primo motor continúa accionando al generador a la velocidad normal.

El voltaje generado produce una corriente de cortocircuito de gran magnitud que circula del generador al punto de falla. El valor de esta corriente, se encuentra limitada sólo por la impedancia del generador y la del circuito entre el generador y el punto de la falla. Si

se trata de un cortocircuito en las terminales del generador, la corriente sólo está limitada por la propia impedancia de éste.

La impedancia variable consiste principalmente en reactancia.

Para fines de cálculos de corriente de cortocircuito, los estándares de la industria han establecido tres nombres específicos para los valores de esta reactancia variable, llamados reactancia subtransitoria, reactancia transitoria y reactancia síncrona.

X''_d = Reactancia subtransitoria. Determina la corriente durante el primer ciclo después de que ocurre la falla. En aproximadamente 0,1 s la reactancia cambia a:

X'_d = Reactancia transitoria. Se supone que determina la corriente después de varios ciclos a 60 Hz. En aproximadamente 0,5 a 2 s la reactancia cambia a:

X_d = Reactancia síncrona. Este es el valor que determina el flujo de corriente después de que se alcanza una condición de estado estable.

Debido a que la mayoría de los dispositivos de interrupción de cortocircuitos, tales como interruptores y fusibles de circuitos, funcionan mucho antes de que se alcancen las condiciones de estado estacionario, la reactancia síncrona del generador rara vez se utiliza para calcular las corrientes de falla para la aplicación de estos dispositivos.

Los datos del generador síncrono disponibles de algunos fabricantes incluyen dos valores para reactancia subtransitoria de eje directo por ejemplo. Reactancias subtransitorias X_{dv}'' (A voltaje nominal, saturado, más pequeño) y X_{di}'' (a corriente nominal insaturada, más grande). Porque un generador de cortocircuito puede estar saturado, y por razones de conservadurismo, el valor de X_{dv}'' es usado para los cálculos de corrientes cortocircuito.

2.2.2 Motores Síncronos

Los motores síncronos se construyen en forma muy parecida a los generadores es decir, tienen un devanado de campo excitado por corriente directa y un devanado del estator por el cual circula la corriente alterna. El motor síncrono demanda corriente alterna del sistema y la transforma en energía mecánica. Cuando se presenta el cortocircuito en el sistema, el voltaje en éste se reduce a un valor muy bajo. En consecuencia, el motor suspende la entrega de energía a la carga mecánica e inicia su frenado lentamente. Sin embargo, justo como el primo motor acciona al generador, la inercia de carga y el rotor del motor acciona al motor síncrono, entonces, el motor síncrono se convierte en generador y entrega la corriente de cortocircuito por varios ciclos después de que el cortocircuito ha ocurrido. El valor de corriente de cortocircuito producida por el motor depende de la impedancia del mismo y de la del sistema al punto del cortocircuito.

2.2.3 Motores de Inducción

La inercia de la carga y el rotor de un motor de inducción, tienen el mismo efecto sobre un motor síncrono que sobre un motor de inducción, es decir acciona el motor después de que ocurre el cortocircuito en el sistema. Sin embargo, existe una diferencia importante: el motor de inducción no tiene devanado de excitación en corriente continua, pero existe un flujo en el motor de inducción durante la operación normal, que actúa como el producido por el devanado de campo en corriente continua en el motor.

El campo del motor de inducción, es producido por la inducción del estator en forma análoga se proviene del devanado de corriente continua. El flujo del rotor permanece normal en la medida que el voltaje es aplicado al estator por la fuente externa. Sin embargo, si la fuente externa de voltaje fuera súbitamente removida, como ocurre cuando se presenta un cortocircuito en el sistema, el flujo en el rotor no puede decaer instantáneamente.

Debido a que el flujo en el rotor no puede decaer en forma instantánea y porque la inercia de las partes rotatorias acciona al motor de inducción, se genera un voltaje en el devanado del estator, esto produce que una corriente de cortocircuito circule hacia la falla, hasta que el flujo del rotor decae a cero. La corriente de cortocircuito desaparece casi por completo en alrededor de cuatro ciclos, debido a que no hay una corriente de campo sostenida en el rotor para proporcionar un flujo, como en el caso de la máquina síncrona. El flujo no es suficiente como para mantener la corriente de cortocircuito por mucho tiempo, de modo que afecta sólo momentáneamente el comportamiento del interruptor y la capacidad de interrupción en dispositivos que interrumpen en alrededor de dos ciclos, de aquí que la inclusión de los motores de inducción en estudios de cortocircuito se debe hacer en ciertos casos. La magnitud de la corriente de cortocircuito producida por un motor de inducción, depende de la impedancia del propio motor y de la impedancia del sistema en el punto de ocurrencia de la falla. La impedancia de la máquina efectiva en el momento del cortocircuito, corresponde muy aproximadamente a la impedancia de rotor bloqueado. Consecuentemente, el valor inicial de la corriente de cortocircuito, es aproximadamente igual al valor de la corriente de arranque a rotor bloqueado del motor.

2.2.4 Alimentación de la Fuente de Suministro de la Red (Compañía Suministradora)

La alimentación a las industrias o comercios, se hace por lo general de una fuente externa que proporciona la compañía suministradora de energía, esto se hace en alta tensión y pasa a través del transformador de la subestación. La compañía suministradora en el punto de conexión a la industria, representa un equivalente de Thevenin de toda la red que se encuentra detrás, por lo que es en realidad una fuente importante de contribución de la corriente de cortocircuito. La compañía suministradora es la encargada de proporcionar en el punto de conexión el valor de la potencia a la corriente de cortocircuito, como un valor equivalente de la red o sistema detrás de ese punto. El valor total de la corriente de cortocircuito en un punto de la red, es la suma de las contribuciones de cada uno de los elementos con la intensidad y duración de cada caso.

2.3 Central Hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es aquella en la que la energía potencial del agua almacenada en un embalse se transforma en la energía cinética necesaria para mover el rotor de un generador, y posteriormente transformarse en energía eléctrica.

Las centrales hidroeléctricas se construyen en los cauces de los ríos, creando un embalse para retener el agua. Para ello se construye un muro grueso de piedra, hormigón u otros materiales, apoyado generalmente en alguna montaña. La masa de agua embalsada se conduce a través de una tubería hacia los álabes de una turbina que suele estar a pie de presa, la cual está conectada al generador. Así, el agua transforma su energía potencial en energía cinética, que hace mover los álabes de la turbina.

Sobresaltando que el tema principal de este trabajo de investigación no es sobre la generación hidroeléctrica, únicamente se hace mención y se da una breve introducción a la misma y a sus principales componentes debido a que es el sistema en el que enfocaremos el estudio de cortocircuito.

2.3.1 Represa Hidráulica

Se denomina Presa o Represa a una barrera fabricada con piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construye habitualmente apoyado en una montaña o desfiladero, sobre un río o arroyo.

Se encarga de retener el agua en el cauce fluvial con diferentes finalidades: para su posterior aprovechamiento en abastecimiento o regadío; para elevar su nivel con el objetivo de derivarla a canalizaciones de riego; para proteger una zona de sus efectos dañinos; o para la producción de energía eléctrica.

Una presa sólo puede retener a un cauce natural, si retuviera un canal sería considerada una balsa. Las presas de hormigón son las más comunes y según su diseño hay 4 tipos diferentes: Presas de Gravedad, Presas de Contrafuertes, Presas de Arco-Bóveda y Presas de Tierra o Escollera.

2.3.2 Embalse

Es el volumen de agua que queda retenido, de forma artificial, por la presa. Se suele colocar en un lugar adecuado geológica y topográficamente. Se puede emplear para generar electricidad, abastecer de agua las poblaciones, regadío, etc...

2.3.3 Toma de Agua

Las Tomas de Agua son construcciones que permiten recoger el agua para llevarla hasta las turbinas por medios de canales o tuberías. Se sitúan en la pared anterior de la presa, la que da al embalse. En el interior de la tubería, el agua transforma la energía potencial en cinética, es decir, adquiere velocidad.

Además de unas compuertas para regular la cantidad de agua que llega a las turbinas, poseen unas rejillas metálicas que impiden que elementos extraños como troncos, ramas, etc. puedan llegar a los álabes y producir desperfectos. Desde aquí, el agua pasa a la tubería forzada que atraviesa a presión el cuerpo de la presa.

2.3.4 Tubería Forzada o Tubería de Presión o Impulsión

Con el fin de impulsar al fluido y mejorar la capacidad de generación de la presa, el agua se hace correr a través de una gran tubería llamada Tubería Forzada o de Presión, especialmente diseñada para reducir las pérdidas de energía que se pudieran producir, llevando el agua hasta la turbina en la casa de máquinas. Esta tubería tiene que soportar la presión que produce la columna de agua, además de la sobre-presión que provoca el golpe de ariete.

2.3.5 Aliviaderos

Aliviaderos, compuertas y válvulas de control. Todas las centrales hidroeléctricas disponen de dispositivos que permiten el paso del agua desde el embalse hasta el cauce del río, aguas abajo, para evitar el peligro por desbordamiento que podrían ocasionar las crecidas. En esos casos es necesario poder evacuar el agua sobrante sin necesidad de que pase por la central.

Las compuertas y válvulas son los elementos que permiten regular y controlar los niveles del embalse. Existen distintos tipos de desagüe: los aliviaderos de superficie y los desagües de fondo o medio fondo.

2.3.6 Casa de Máquinas o Sala de Turbinas

En la Casa de Máquinas, denominada también Sala de Turbinas o Central, se encuentran los grupos eléctricos para la producción de la energía eléctrica -Conjunto turbina-alternador, turbina y generador, así como los elementos de regulación y funcionamiento. El agua que cae de la presa hace girar las turbinas que impulsan los generadores eléctricos.

Las compuertas de entrada y salida se emplean para poder dejar sin agua la zona de las máquinas en caso de reparación o desmontaje. Según la disposición general de la casa de máquinas, las centrales se pueden clasificar en: Centrales al Exterior y Centrales Subterráneas.

2.3.6 Transformadores

Son el equipo que se encarga de convertir la corriente de baja tensión en una corriente de alta tensión y disminuir la intensidad de la corriente eléctrica. De este modo, se pierde menos energía en su transporte.

2.3.7 Líneas de Transporte de Energía Eléctrica

La electricidad producida se transporta por cables de alta tensión a las estaciones de distribución, donde se reduce la tensión mediante transformadores hasta niveles adecuados para los usuarios.

Las líneas primarias pueden transmitir electricidad con tensiones de hasta 500.000 volts o más. Las líneas secundarias que van a las viviendas tienen tensiones de 220 y 110 volts.

2.4 Normas

Existen aplicaciones de estos estudios, como la coordinación de protecciones y la selección de interruptores, que dependen de la determinación precisa de corrientes de cortocircuito y cuya operación correcta resguarda a los sistemas de los daños mencionados. Esto obliga a usar procedimientos de cálculos de fallas precisos y confiables. En la actualidad dos son las normas aplicadas que tienen procedimientos para el cálculo de cortocircuito: la IEC y la ANSI/IEEE. Existen diferencias entre ellas que ocasionan, al aplicarlas a un estudio de fallas sobre el mismo sistema eléctrico, que los resultados obtenidos sean diferentes.

Con el proceso de globalización y estandarización actual, el ingeniero electricista deberá estar familiarizado con las normas mencionadas, y particularmente con sus diferencias, para escoger la más apropiada para la aplicación específica.

Más comúnmente en la industria, se inclinan hacia las normas especificadas en los equipos primarios ya instalados o a instalar, para que un estudio de cortocircuito sea lo más aproximado posible.

El ANSI/IEEE 141 es la norma de origen americano, que determina el procedimiento en los cálculos de corrientes de corto circuito en Estado Unidos y en los países, que por influencia tecnológica, han adoptado esta norma. En varios países de Europa la norma que reglamenta los procedimientos de cálculo es la guía IEC 909, esta guía está dirigida a sistemas con tensión nominal de hasta 230 kV, el IEC tiene su origen en la norma Alemana VDE0102.

Algunos conceptos aplican a las normas IEC y ANSI, sin embargo existen diferencias fundamentales entre ellas (modelo matemático, esfuerzos de cortocircuito, procedimiento de cálculo, etc) que originan resultados de cálculo distintos, estas diferencias deberán de entenderse cabalmente para evaluar el impacto técnico - económico en sus aplicaciones. En estos tiempos de intercambio de mercancías y servicios, se hace conveniente y necesario un análisis comparativo de ambas normas, con el afán de conocer sus diferencias y similitudes más relevantes para de este modo usar más adecuadamente esta información en la aplicación tan variada e importante de los estudios de corto circuito.

2.4.1 La Norma ANSI

Para facilitar el análisis de corto circuito la ANSI/IEEE separa y trabaja la corriente total de cortocircuito en sus componentes de AC y DC, y después integra sus efectos como se muestra en la figura 2.2. El cálculo de la corriente de falla en los diferentes periodos de la onda, conduce a definir tres intervalos de tiempo, que demoran tres redes, según las normas ANSI/IEEE las tres redes señaladas son: la red de primer ciclo, la red de interrupción y la red de 30 ciclos, cabe mencionar que la única diferencia entre una red y otra es el valor que se asigna a las reactancias de cada máquina rotatoria, las reactancias de los elementos pasivos son las mismas en las tres redes (Bojórquez, 2007)

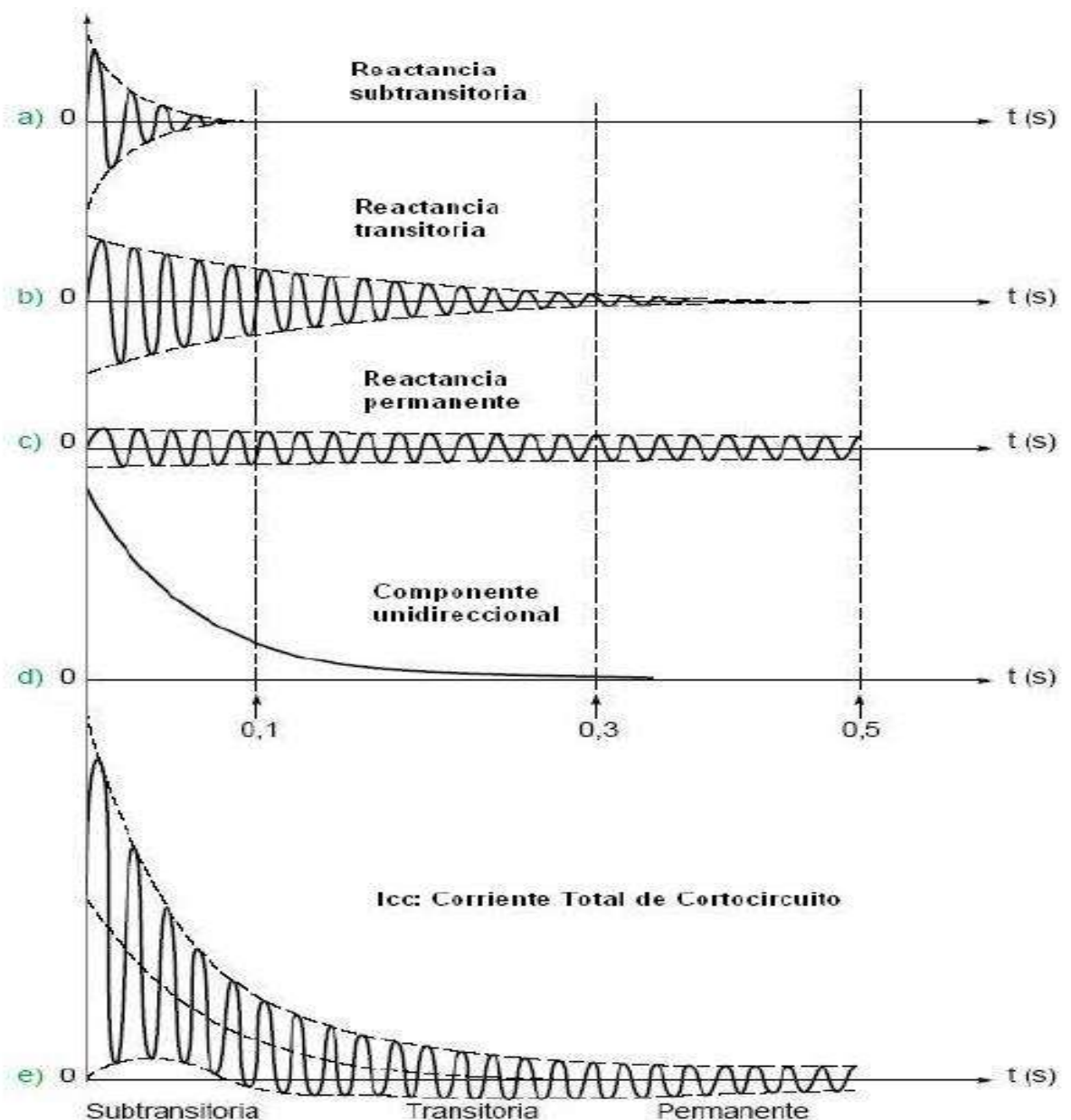


Figura 2.2. Variación de la corriente de cortocircuito suministrada por las máquinas sincrónicas.

Periodo subtransitorio: La corriente de cortocircuito de primer ciclo o momentánea, representa el valor más alto antes de que sucedan los decaimientos de los componentes de CA Y CD, asociado con la reactancia subtransitoria, con duración de únicamente los primeros ciclos durante el cual el decaimiento de la corriente es muy rápido.

Periodo transitorio: Es la corriente después de algunos ciclos, Asociado con la reactancia transitoria. Abarca un tiempo relativamente largo; esto es más allá de cinco ciclos durante el cual el decaimiento de la corriente es más moderado.

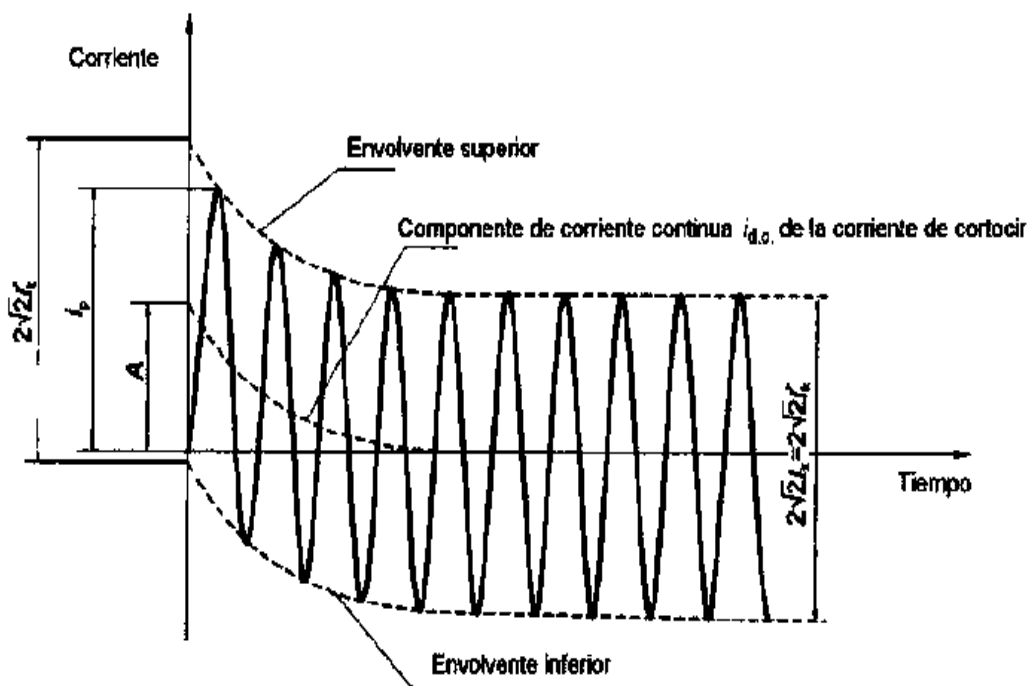
Periodo estacionario: Periodo de estado permanente o síncrono. Asociado con la reactancia síncrona, con una duración más allá de treinta ciclos y durante el cual la corriente de corto circuito permanece constante. Esto es, no existe decaimiento de la componente CA.

2.4.2 La Norma IEC

Como se mencionó anteriormente las normas IEC han sido desarrolladas en Europa y abarcan todos los temas de la Electrotecnia, la norma que rige el cálculo de las corrientes de corto circuito es la IEC 60909, en esta norma se abarcan sistemas de baja y alta tensión, hasta 230 kV, con frecuencias de 50 o 60 Hz.

En los cálculos usando la norma IEC se considera la distancia desde la localización de la falla hasta los generadores síncronos. Así se hace la distinción:

Falla lejana al generador: La corriente de corto circuito no posee decaimiento en la componente AC, figura 2.3, la componente de AC permanece esencialmente constante.



I_k = Corriente simétrica inicial de corto circuito.

I_p = corriente pico de corto circuito.

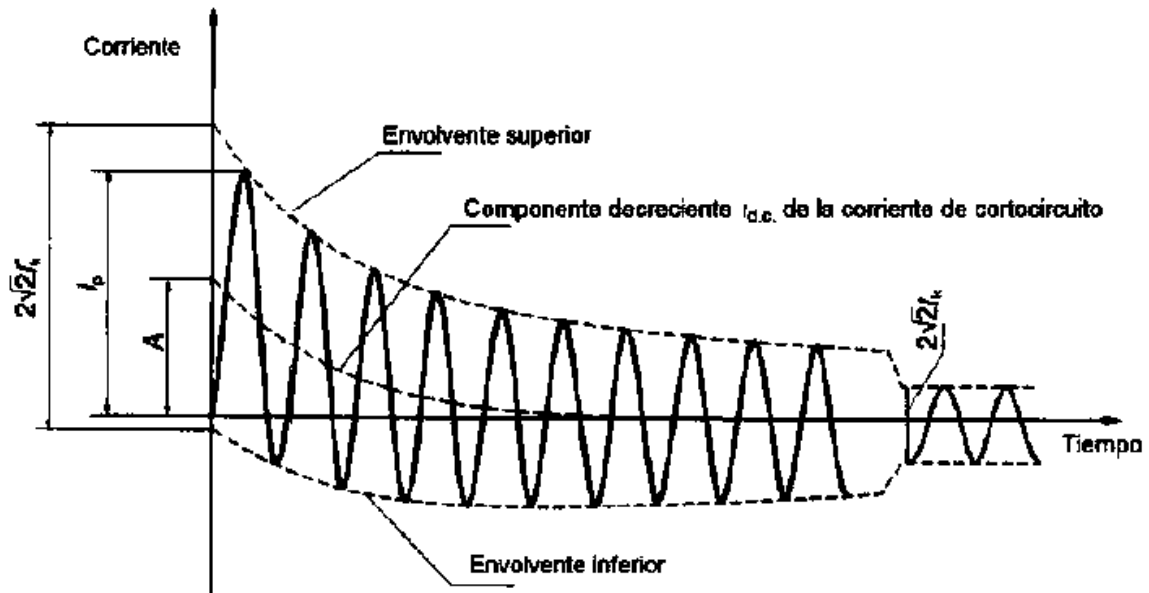
I_k = Corriente en estado permanente de corto circuito.

i_{CD} = Componente de CD con decaimiento.

A = Valor inicial de la componente de CD I_{CD}

Figura 2.3. Corriente de corto circuito de una falla lejana de un generador, corriente alterna constante. (IEC 60909 - 1era Edición 2001)

Falla cercana al generador: En estos sistemas la componente de AC cuenta con decaimiento, figura 2.4, es una condición en que por lo menos una máquina síncrona contribuye a la corriente inicial de cortocircuito esperada, los motores contribuyen con más del 5% de la corriente simétrica inicial calculada sin motores.



I''_k = Corriente simétrica inicial de corto circuito.

I_p = corriente pico de corto circuito.

I_k = Corriente en estado permanente de corto circuito.

i_{CD} = Componente de CD con decaimiento.

A = Valor inicial de la componente de CD I_{CD}

Figura 2.4. Corriente de corto circuito de una falla cercana de un generador, corriente alterna decreciente. (IEC 60909 - 1era Edición 2001)

Los estándares IEC usan las siguientes definiciones:

Corriente de cortocircuito simétrica: Es el valor de la componente de AC de la corriente de corto circuito en el punto de falla, despreciando la componente de DC.

Corriente de cortocircuito simétrica inicial I''_k : Es el valor de la componente de AC de la corriente de cortocircuito simétrica aplicable en el instante de corto circuito, en el tiempo cero.

Componente de DC (Aperiódica) de la corriente de corto circuito I_{CD} : El valor medio entre la envolvente superior y la envolvente inferior del oscilograma de cortocircuito que decae desde un valor inicial A (en el tiempo cero) hasta un valor cero.

Corriente de cortocircuito pico I_p : Es el valor instantáneo máximo posible de la corriente de corto circuito en el punto de falla, esta corriente varía dependiendo en el instante en que ocurre la falla, esta corriente incluye la componente de DC.

Corriente de cortocircuito simétrica de interrupción I_b : Es el valor de un ciclo completo de la componente AC disponible en el instante de la separación de contactos del primer polo de un interruptor.

Corriente de corto circuito en estado permanente I_k : Es el valor de la corriente de cortocircuito que permanece después del decaimiento del fenómeno transitorio.

Tiempo mínimo de retardo (t_{min}) de un interruptor de circuito (IC): Es el tiempo más corto entre el inicio de la corriente de cortocircuito y la primera separación de contactos de un polo del dispositivo de interrupción.

2.5 Descripción e Introducción a ETAP

Como parte de la estandarización y globalización de la industria en el mercado actualmente se requiere trabajar con software que esté a la vanguardia de las necesidades y los requerimientos que se exigen por motivos de competitividad al ofrecer servicios de alta calidad. Es por ello que se adquieren paquetes que ofrezcan estas características.

Inicialmente se adquiere el software y con ello un curso que si bien es explícito en la ideología de que una herramienta computacional es funcional en tanto el ingeniero tenga la teoría básica para interpretar correctamente los resultados. Y es verdad, ningún software nos garantiza resultados 100% confiables hasta que son corroborados como correctos.

ETAP es desarrollado por “Operation Technology Inc – OTI” en Irvine, California. La versión usada actualmente es 16.1.0 destacando que se trabaja bajo licencias Premium que actualizan automáticamente a la versión más actual en cuanto estas están disponibles, también ofrece licencias académicas a universidades afiliadas.

Además de su interfaz gráfico que visualmente resulta atractivo, cuenta con una librería de amplia información de conductores, protecciones (relés, interruptores, fusibles, reconectadores) y paneles solares, los cuales son validados directamente con los fabricantes, proporcionando de esta manera una representación más real del sistema eléctrico bajo estudio.

Accesibilidad: Como casi todos los programas de diseño, los existen libres, de acceso desde la red de internet, públicos, con licencias institucionales, con licencias comerciales y privadas.

Bajo la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo, ETAP es un software profesional y de alta calidad, por lo que es de alto costo también. Cuenta con membresías para universidades, por lo que su uso no está del todo restringido.

Algunas de las características relevantes de este software se mencionan y describen a continuación:

1. Normas aplicables, (ANSI, IEC, GHOST) ya que con ello se puede ofrecer la que mejor convenga para el servicio a prestar.
2. Adaptabilidad del diseño del diagrama unifilar, mostrando las herramientas de componentes en DC y AC por separado, evitando confusiones al momento del dibujo.
3. Editor de reportes, mostrando las diferentes opciones de imprimir un reporte de resultados, eligiendo entre el tipo de documento de preferencia (Word, PDF, Excel, únicamente vista), completo (detallando características de cada componente del sistema bajo estudio más resultados en donde se detalla cada aportación de cada componente, y hacia donde es aportada), solo resultados detallados, un resumen de corrientes en los diferentes tipos (trifásica, línea a línea, línea a tierra y bifásica a tierra).

Generalmente hablando, ETAP es un software que ofrece tanta información como así se desee, está compuesto por una gran cantidad de herramientas que bien implementadas nos vuelven más eficientes dentro de las labores requeridas, haciendo diseños más completos en los cuales podamos visualizar en cualquier punto del sistema, las aportaciones y sus respectivas direcciones de corrientes de cortocircuito.

Considerando que en desventaja nuestra, algunas de estas herramientas computacionales son de uso privado y no podemos servirnos de ellas sin una licencia incluso sin una computadora, por lo que siempre será conveniente tener presentes los métodos “a mano” que incluso estos nos ayudan a corroborar resultados.

Capítulo 3: Contraste de Herramientas Computacionales.

Este capítulo abarca una breve comparación entre dos softwares de diseño y estudio de cortocircuito que personalmente tuve la oportunidad de implementar para llevar a cabo este mismo trabajo. Ciertamente estos dos no son los únicos en la industria, pero hay que resaltar que el trabajo de investigación se enfocó en los conocidos y que como mencionamos líneas arriba, fueron probados particularmente.

3.1 PSAF de CYME Instruments (T&D)

El programa de análisis de redes eléctricas CYME es una serie de aplicaciones que constan de un editor de módulos de análisis y de bibliotecas de modelos personalizables desde los cuales el usuario puede diseñar diagramas unifilares, y obtener resultados Figura 3.1.

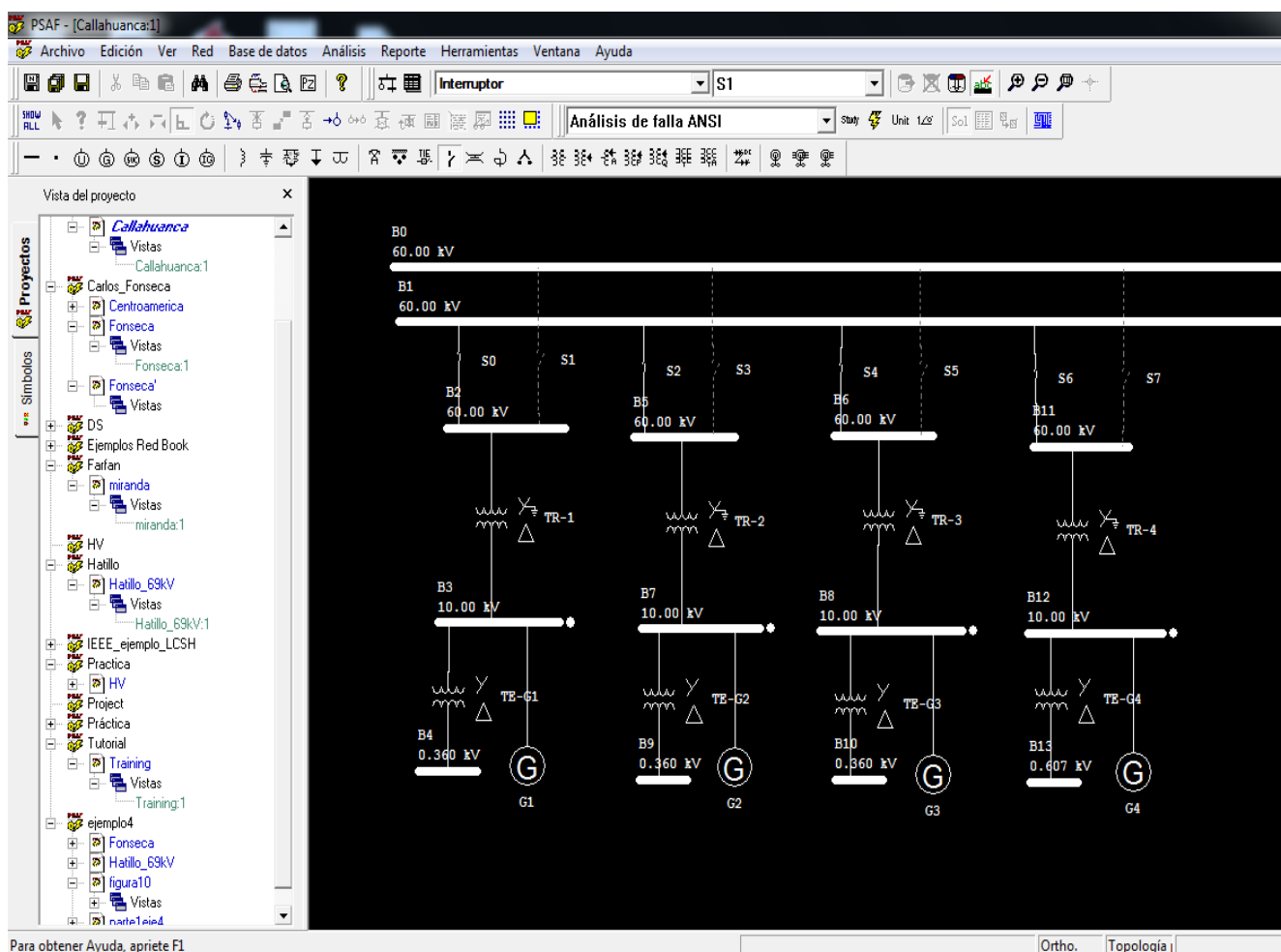


Figura 3.1. Muestra el interfaz gráfico, ventana de edición de análisis de cortocircuito en PSAF.

Uno de los softwares implementados anteriormente fue PSAF de CYME Instruments, el cual fue una herramienta muy útil, proporcionando ventajas para el ingeniero de diseño,

que en su momentos se tuvo que acoplar a las herramientas que este software ofrece, también se tuvo que trabajar un poco más en la estética de los resultados obtenidos para darle un enfoque claro y preciso.

Al usar este software inmediatamente podemos notar la dificultad o peculiaridad de trabajar con su interfaz, sus herramientas o al obtener el resultado que deseamos.

Como lo hemos mencionado anteriormente se debe considerar que además de la confiabilidad que un software ofrezca es más importante aún conocer la teoría del estudio, para de este modo hacer una correcta interpretación.

Por lo que la importancia de que un software ofrezca una interfaz fácil de usar y resultados más estéticos, ayuda bastante en todo estudio a realizar e interpretar.

En la figura 3.2, se muestra el reporte textual, dentro del cual debemos seleccionar los resultados que vamos a usar, por ejemplo, elegir el punto de falla, y los diferentes estados de esta.

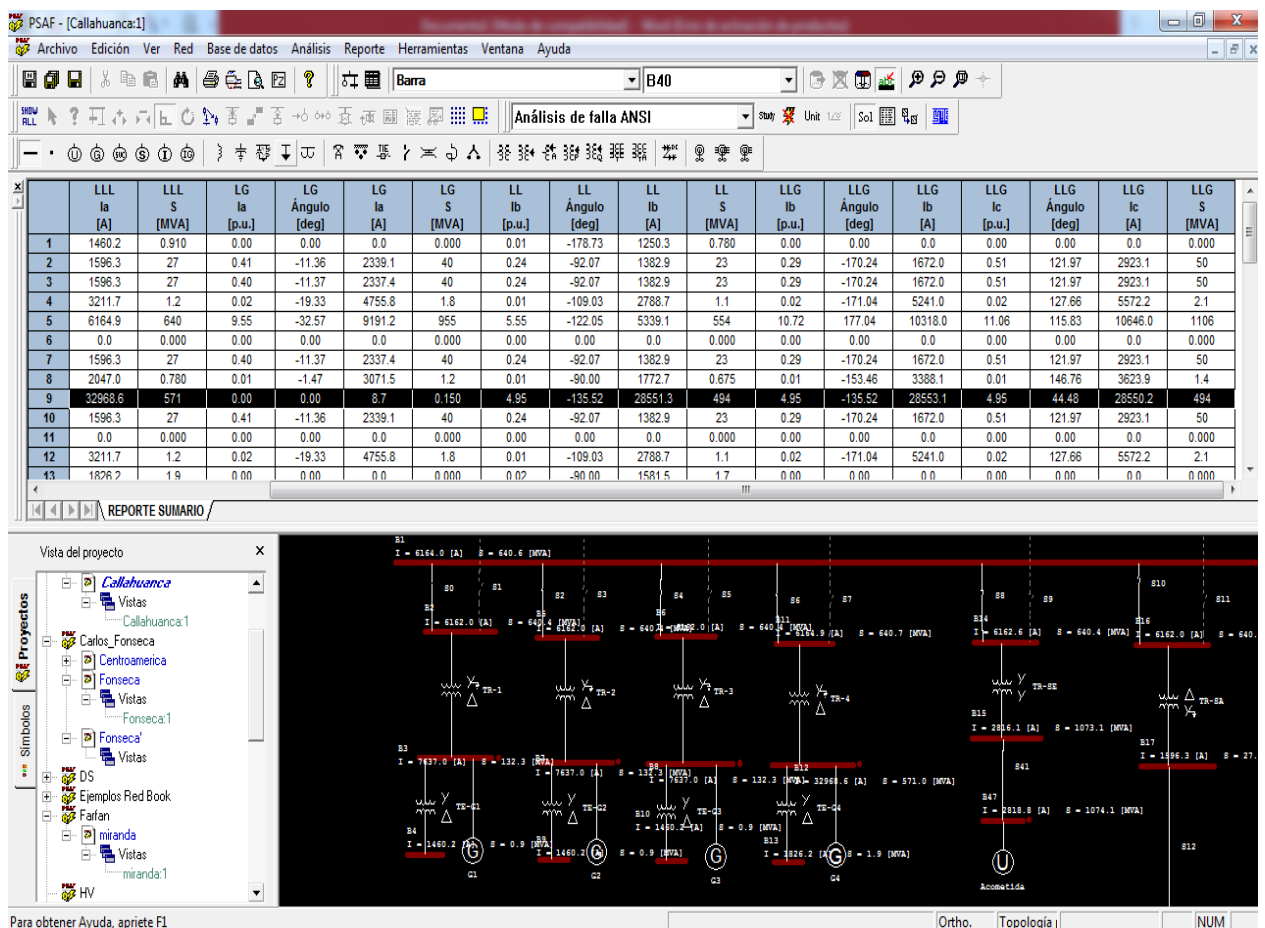


Figura 3.2. Muestra diagrama unifilar y análisis de cortocircuito con su respectivo reporte textual de fallas.

Cuando se realiza un estudio de cortocircuito en este software, nos encontraremos con algunas cuestiones de diseño, principalmente las opciones reducidas en cuanto a generar un reporte de resultados de fallas, figura 3.3. Ya que este nos arroja una gran cantidad de información que si bien es bastante bueno, puede ser que nos perdamos en cuanto a la interpretación de la misma, sobresaltado que, habrá que saber a ciencia cierta qué tipo de resultados deseamos observar, tomarlos y ordenarlos en algún otro archivo de texto editable.



	LLL Ia [A]	LLL S [MVA]	LG Ia [p.u.]	LG Ángulo [deg]	LG Ia [A]	LG S [MVA]	LL Ib [p.u.]	LL Ángulo [deg]	LL Ib [A]	LL S [MVA]	LLG Ib [p.u.]	LLG Ángulo [deg]	LLG Ib [A]	LLG Ie [p.u.]	LLG Ángulo [deg]	LLG Ie [A]	LLG S [MVA]
1	1460.2	0.910	0.00	0.00	0.00	0.000	0.01	-178.73	1250.3	0.780	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
2	1596.3	27	0.41	-11.36	2339.1	40	0.24	-92.07	1382.9	23	0.29	-170.24	1672.0	0.51	121.97	2923.1	50
3	1596.3	27	0.40	-11.37	2337.4	40	0.24	-92.07	1382.9	23	0.29	-170.24	1672.0	0.51	121.97	2923.1	50
4	3211.7	1.2	0.02	-19.33	4755.8	1.8	0.01	-109.03	2786.7	1.1	0.02	-171.04	5241.0	0.02	127.86	5572.2	2.1
5	6184.9	640	9.55	-32.57	9191.2	955	5.55	-122.05	5339.1	554	10.72	177.04	10016.0	11.06	115.83	10646.0	1106
6	0.0	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
7	1596.3	27	0.40	-11.37	2337.4	40	0.24	-92.07	1382.9	23	0.29	-170.24	1672.0	0.51	121.97	2923.1	50
8	2647.9	0.780	0.01	-1.47	3071.5	1.2	0.01	-90.00	1772.7	0.675	0.01	-153.48	3308.1	0.01	148.76	3623.9	1.4
9	32983.6	571	0.00	0.00	0.7	0.150	4.95	-135.52	28551.3	494	4.95	-135.52	28553.1	4.95	44.48	28550.2	494
10	1596.3	27	0.41	-11.36	2339.1	40	0.24	-92.07	1382.9	23	0.29	-170.24	1672.0	0.51	121.97	2923.1	50
11	0.0	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
12	3211.7	1.2	0.02	-19.33	4755.8	1.8	0.01	-109.03	2786.7	1.1	0.02	-171.04	5241.0	0.02	127.86	5572.2	2.1
13	1826.7	1.9	0.00	0.00	0.00	0.000	0.02	-80.00	1581.5	1.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

Figura 3.3. Muestra reporte textual de fallas por PSAT.

Ahora podemos hacer mención de las nuevas herramientas con las que cuentan los softwares más recientes, tales como las facilidades de edición de reportes en las que podemos imprimir en cualquiera de los formatos más comúnmente usados, por ejemplo las siguientes en ETAP específicamente.

- ☒ Viewer
- ☐ PDF
- ☐ MS Word
- ☐ Rich Text Format
- ☐ MS Excel
- ☐ Set As Default

Una breve comparación de reportes, a manera de comentario descriptivo. El hecho de obtener y disponer de los resultados de maneras más estéticas, entendibles y editables. Nos vuelve más eficientes dentro de nuestro trabajo, ofreciendo resultados a las mismas tareas de maneras más rápidas y claras.

Untitled. - Summary_ES-ES.doc [Compatibility Mode] - Microsoft Word

Page Layout References Mailings Review View

Font Paragraph Styles

Proyecto: Callahuanca ETAP
 Ubicación: Morelia, Mich 16.1.0C
 Contrato: PER000766508
 Ingeniero: Daniela Ramirez
 Nombre de Archivo: ch.ca

Página: 1
 Fecha: 04-13-2018
 SN: ANDRITZHDR
 Revisión: Base
 Config: Normal

Caso de Estudio: SC

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL y LLG

Tensión pre-falta = 100 % de la Tensión nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bus01 Principal		60.000	0.374	-4.998	5.012	0.426	-5.807	5.823	4.035	0.314	4.047	3.936	4.440	5.934
Bus09		60.000	0.374	-4.998	5.012	0.426	-5.807	5.823	4.035	0.314	4.047	3.936	4.440	5.934
Bus010		10.000	0.855	-14.862	14.886	1.351	-15.625	15.683	11.703	0.818	11.732	-13.231	9.329	16.189
Bus011		0.360	2.558	-13.362	13.605	2.600	-13.476	13.724	11.534	2.208	11.744	-12.878	4.630	13.685
Bus013		60.000	0.374	-4.998	5.012	0.426	-5.807	5.823	4.035	0.314	4.047	3.936	4.440	5.934
Bus014		8.000	4.920	-22.461	22.994	3.035	-20.940	21.158	17.284	2.520	17.467	-20.632	9.182	22.583
Bus015		0.607	2.609	-14.908	15.135	2.592	-15.097	15.318	12.829	2.196	13.016	-14.220	5.526	15.257
Bus016		60.000	0.374	-4.998	5.012	0.426	-5.807	5.823	4.035	0.314	4.047	3.936	4.440	5.934
Bus017		220.000	0.681	-3.752	3.814	0.706	-4.512	4.567	3.233	0.590	3.286	2.908	3.448	4.510
Bus018		60.000	0.374	-4.998	5.012	0.426	-5.807	5.823	4.035	0.314	4.047	3.936	4.440	5.934
Bus019		10.000	0.251	-1.666	1.685	0.210	-1.442	1.457	1.436	0.214	1.452	1.345	0.856	1.594
Bus020		10.000	0.251	-1.666	1.685	0.210	-1.442	1.457	1.436	0.214	1.452	1.345	0.856	1.594
Bus021		10.000	0.251	-1.666	1.685	0.210	-1.442	1.457	1.436	0.214	1.452	1.345	0.856	1.594
Bus022		0.220	4.217	-17.925	18.414	3.822	-17.648	18.057	15.419	3.504	15.812	13.569	12.358	18.353
Bus023		10.000	0.251	-1.666	1.685	0.210	-1.442	1.457	1.436	0.214	1.452	1.345	0.856	1.594

Figura 3.4. Imagen muestra reporte en formato Word para corrientes de falla trifásica, LG, LL y LLG. Estándar ANSI para 1/2 ciclo en ETAP.

En la figura 3.4. Podemos observar el orden con el que ETAP arroja resultados.

- El estado de falla a estudiar (Subtransitorio, transitorio y permanente).
- Los buses que hemos pre establecidos como puntos de falla.
- Falla en sus diferentes conexiones (Trifásica, LG, LL, LLG).
- Tipo de archivo de preferencia (Excel, PDF, Word)

Capítulo 4: Herramientas del Software

En la actualidad el manejo de software para realizar cualquier tipo de cálculos matemáticos es indispensable, la globalización de la industria nos empuja a hacer uso de las distintas herramientas que nos ofrece la tecnología en general.

ETAP ofrece además del estudio de cortocircuito, diseño de mallas de tierras y flujos de potencia. Su entorno e interfaz es amigable al usuario, tiene suficiente información detallada de ayuda, por lo que hacer uso de éste, resulta fácil a medida que se hace uso de sus herramientas, dentro de las cuales y específicamente en el análisis de cortocircuito, podemos elegir entre las normas que este ofrece, tanto para la selección de componentes como para el cálculo en general.

4.1 Crear un Documento Nuevo en ETAP

Como en cualquier otro software, desde un pequeño botón con el símbolo más, podemos acceder al creador de documentos, dentro del cual podemos seleccionar el sistema en el cual queremos desarrollar el proyecto nuevo (English o Metric), daremos un nombre, enseguida ok, figura 4.1. (El programa identificará el usuario registrado en la computadora y enseguida únicamente aceptaremos el nombre de administrador que estemos usando).

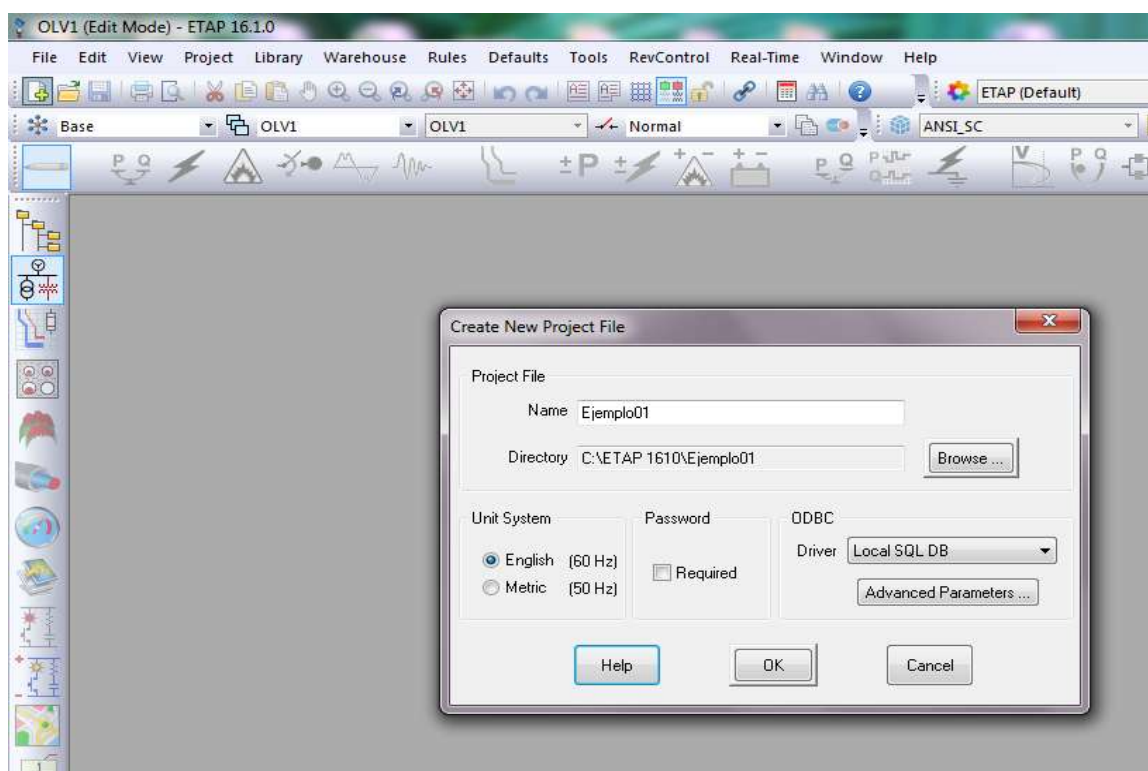


Figura 4.1. Ventana para crear nuevo documento en ETAP

La Figura 4.2, nos muestra el área de trabajo, las diferentes barras de herramientas, y ya que el software fue diseñado para una enorme cantidad de diferentes aplicaciones, nos enfocaremos en el uso de herramientas implementadas para cortocircuito.

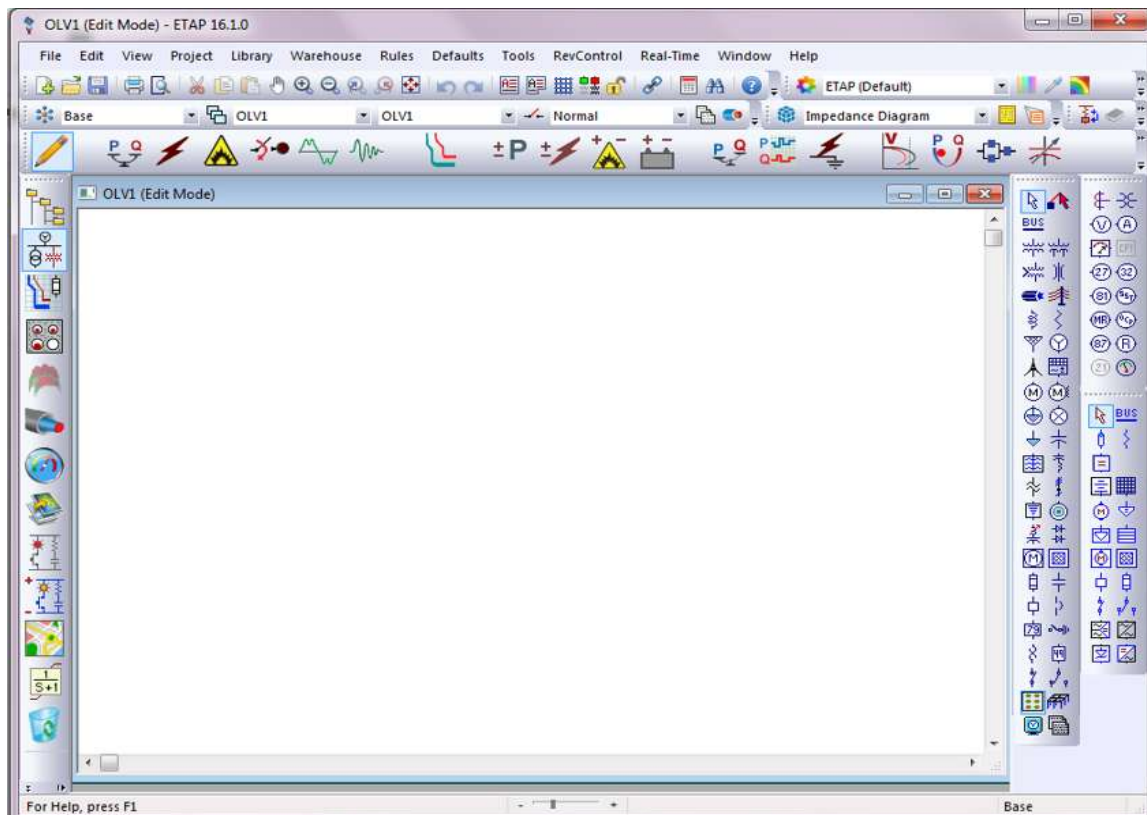


Figura 4.2. Muestra Interfaz gráfico de ETAP, área de edición, diseño y estudio.

Podemos observar de lado derecho dos barras verticales, la primera contiene todos los componentes en AC, la segunda barra los componentes en DC.

Lo cual nos facilita la identificación clara para tipo del diseño y análisis a realizar.

4.2 Edición de Datos para Componentes

Comenzaremos describiendo las ventanas más relevantes dentro del editor de componentes a fin de mostrar los datos requeridos por cada uno. Recalcando que cualquier sistema y/o componente es siempre peculiarmente especial, cuenta con valores de fabricación específicos que deben tenerse presentes a la hora del diseño.

El estudio de cortocircuito es de suma importancia y debe hacerse cuidadosamente para evitar errores.

4.2.1 Generador

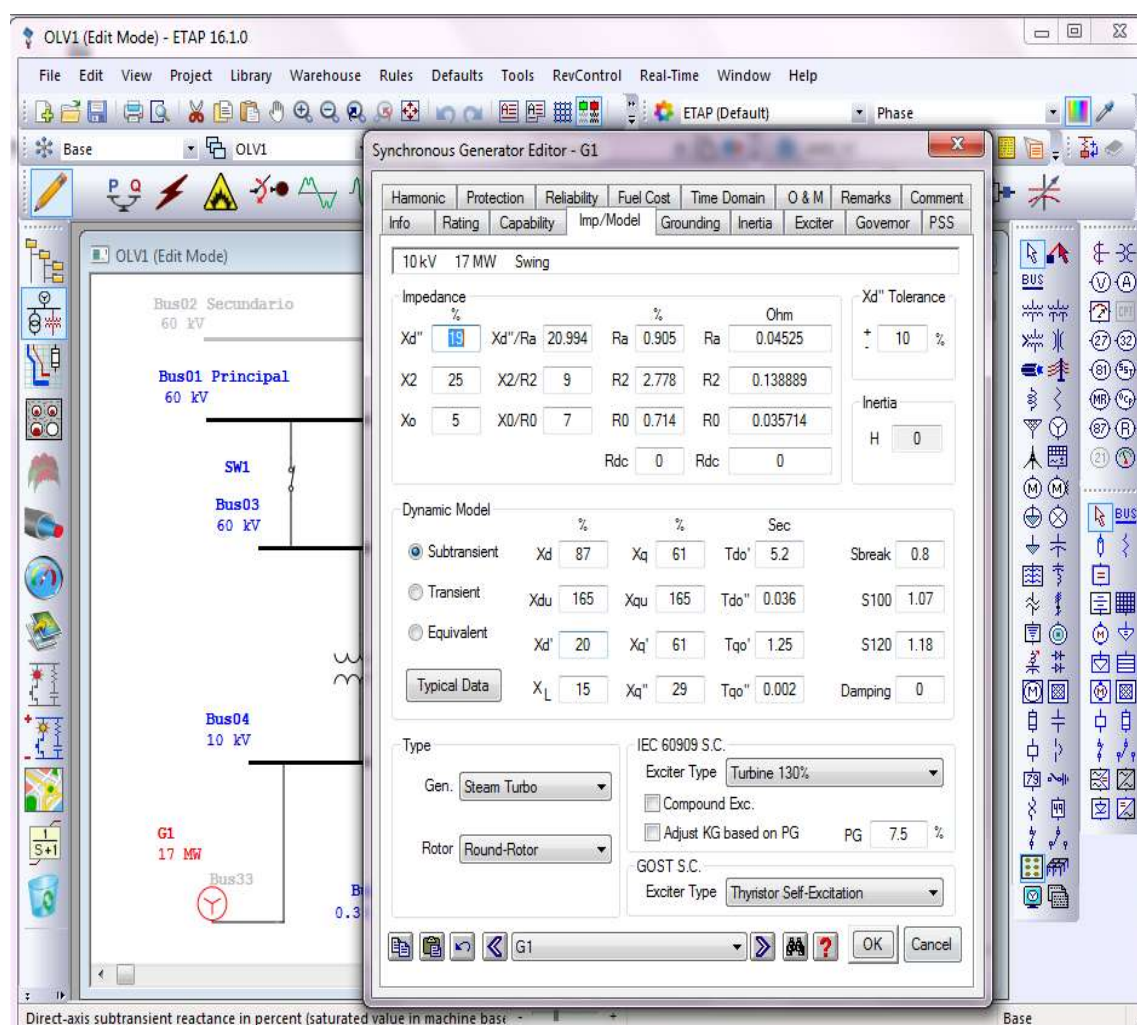


Figura 4.3. Ventana de edición de datos de componente generador, dentro de ETAP.

En la figura 4.3 se muestra la ventana más relevante de información del generador que debe ser agregada al programa, en la cual podemos observar un botón bastante peculiar, -Typical Data-, dentro de este botón ETAP provee datos que pueden servir de apoyo dentro del estudio. Aunque debemos tomar en cuenta que los generadores cuentan con propiedades particulares que no se pueden tomar a la ligera, pero en cambio hay algunos otros datos que pudieran incluso omitirse. Y es por ello que datos típicos puede usarse de manera intermitente.

Debemos considerar que entre más precisos sean los datos de nuestros componentes, el estudio que generemos será el más aproximado a los resultados reales.

Modo de Operación del Generador en ETAP:

Oscilación (SWING): Para los estudios de flujo de carga, un generador de giro absorberá la holgura de los flujos de potencia en el sistema, es decir, la magnitud y el ángulo de voltaje de las terminales del generador permanecerán en los valores operativos especificados.

Para los estudios de aceleración del motor, se realiza un estudio de flujo de carga inicial para determinar las condiciones iniciales. Para el flujo de carga inicial, un generador de oscilación se representa como una fuente infinita. En el tiempo 0+, el generador se modela como una fuente de voltaje detrás de su impedancia transitoria de eje directo.

Todos los generadores se modelan dinámicamente a partir del tiempo 0+ en estudios de estabilidad transitoria. Una de las máquinas oscilantes (redes eléctricas o generadores) se selecciona como la máquina de referencia para todo el sistema.

Debe haber al menos una máquina oscilante (red eléctrica o generador síncrono) conectada a cualquier subsistema aislado en el diagrama de una línea. Puede tener varias máquinas oscilantes conectadas a cualquier bus del sistema.

Cualquier elemento que esté conectado a una máquina oscilante se muestra como un elemento energizado en el diagrama de una línea y se incluirá en los estudios. Además, la tensión nominal (kV) de un generador de oscilación se utiliza como la base kV del bus al que está conectado el generador. Los kV base del resto del sistema se calculan utilizando relaciones de giro del transformador. Para estudios de estabilidad transitoria, un generador oscilante se convierte en la máquina de referencia para el sistema, es decir, el ángulo de la fuente de tensión interna del generador se pone a cero y el ángulo de voltaje de todas las máquinas síncronas del sistema será relativo a esta máquina de referencia

Control de voltaje: Un generador se puede seleccionar como un sistema de control de voltaje (regulado), lo que significa que el generador ajustará su salida de VAR para controlar el voltaje. Por lo tanto, la magnitud del voltaje de la terminal del generador, la potencia real de operación (MW) y el suministro de potencia reactiva mínimo y máximo permitido (Q máx. Y Q mín.), deben ingresarse para los generadores de control de tensión. Un generador de control de voltaje significa que el generador tiene carga base (modo de caída con MW fijo) con un regulador de voltaje automático (AVR) que controla la excitación de campo para una operación de voltaje constante. Durante los estudios de flujo de carga, si el generador calculado Mvar cae fuera de los límites de capacidad del Mvar del generador (límite máximo Q o Min Q), el valor del Mvar se establecerá igual al límite y el modo generador cambiará al control Mvar.

Control (Mvar): Al usar esta opción, puede especificar la cantidad de generación de MW y Mvar fija en la página Clasificación del Editor de generador síncrono. Un generador de control Mvar significa que el generador está cargado en la base (modo de caída con MW fijo) con una excitación de campo fijo (sin acción de AVR).

Control de FP: En este modo, el generador está funcionando en modo Droop, con carga base; por lo tanto, la salida MW se fija a la configuración MW. Por otro lado, el AVR del excitador se ajusta al ajuste del factor de potencia. Los ajustes de MW y % PF del generador deben ingresarse en la página de Calificación para la categoría de generación seleccionada cuando se modela en este modo.

3.2.2 Transformador

Durante el diseño, el transformador puede conectarse a dos buses, este tomará los valores correspondientes a los buses a los que hemos conectado sus devanados, sin embargo estos valores deben ser corroborados como datos reales tanto en el devanado primario como en el devanado secundario, figura 4.4.

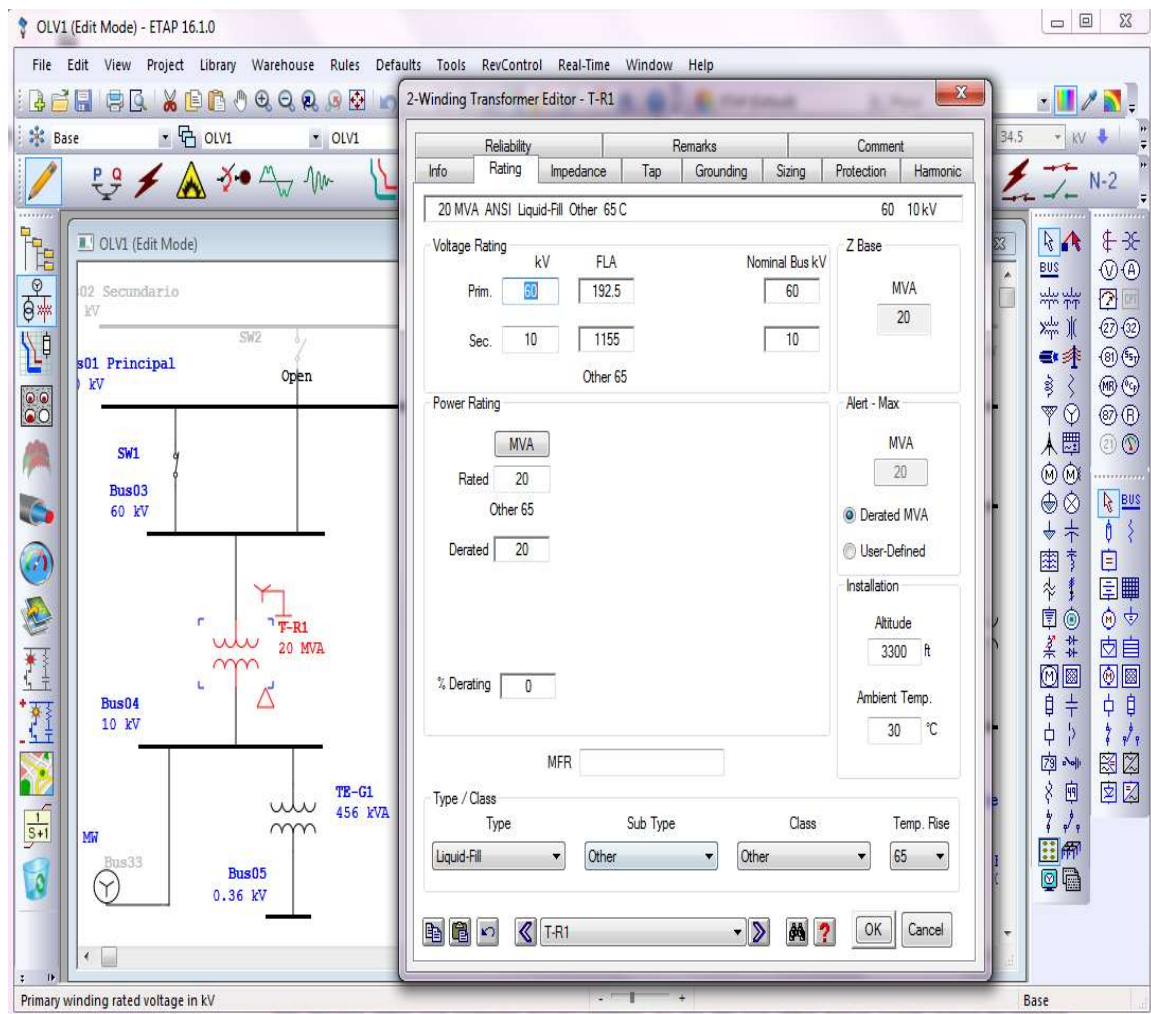


Figura 4.4. La imagen muestra la ventana de edición de los datos más relevantes a introducir al transformador.

Descripción de la Ventana de Edición:

Su conexión:

- Las conexiones de fase para un transformador de 2 devanados se definen seleccionando 3-Phase o 1-Phase, con o sin Tap Central Secundario.
- La conexión predeterminada es trifásica y se puede cambiar desde el menú Predeterminado o desde el Administrador del sistema.
- La conexión de fase debe especificarse antes de conectar el transformador de 2 devanados a cualquier bus o adaptador de fase. Una vez que el transformador está conectado, las selecciones de conexión de fase dejarán de estar disponibles. Necesita desconectar el transformador para cambiar el tipo de conector.

(3 fases).- Seleccione esto para definir el transformador como trifásico. Este transformador solo se puede conectar a buses trifásicos.

(1 fase).- Seleccione esto para definir el transformador como monofásico. Este transformador solo se puede conectar a buses monofásicos y a un adaptador de fase. En el campo adyacente, mostrará el tipo de conexión de entrada. El lado primario del Transformador es siempre 1 Fase 2 de Alambre.

(Tap Central Secundario).- Seleccione para definir el lado Secundario del transformador como 3 hilos monofásicos. Al verificar este campo, el devanado secundario del transformador se pondrá a tierra en el centro. Solo se puede conectar 1 línea de 3 buses de fase al devanado secundario.

Seleccione el tipo de construcción para que sea la carcasa o el núcleo del transformador de toma central secundario en la lista desplegable, figura 4.5.

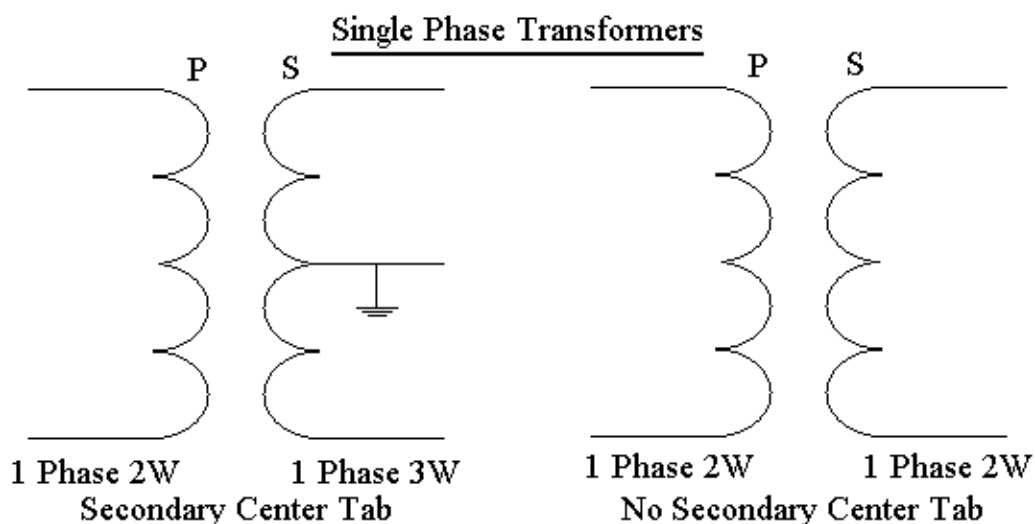


Figura 4.5. Devanados del transformador

Estándar.- Puede seleccionar ANSI o IEC. Las selecciones de clase cambiarán en función del estándar seleccionado.

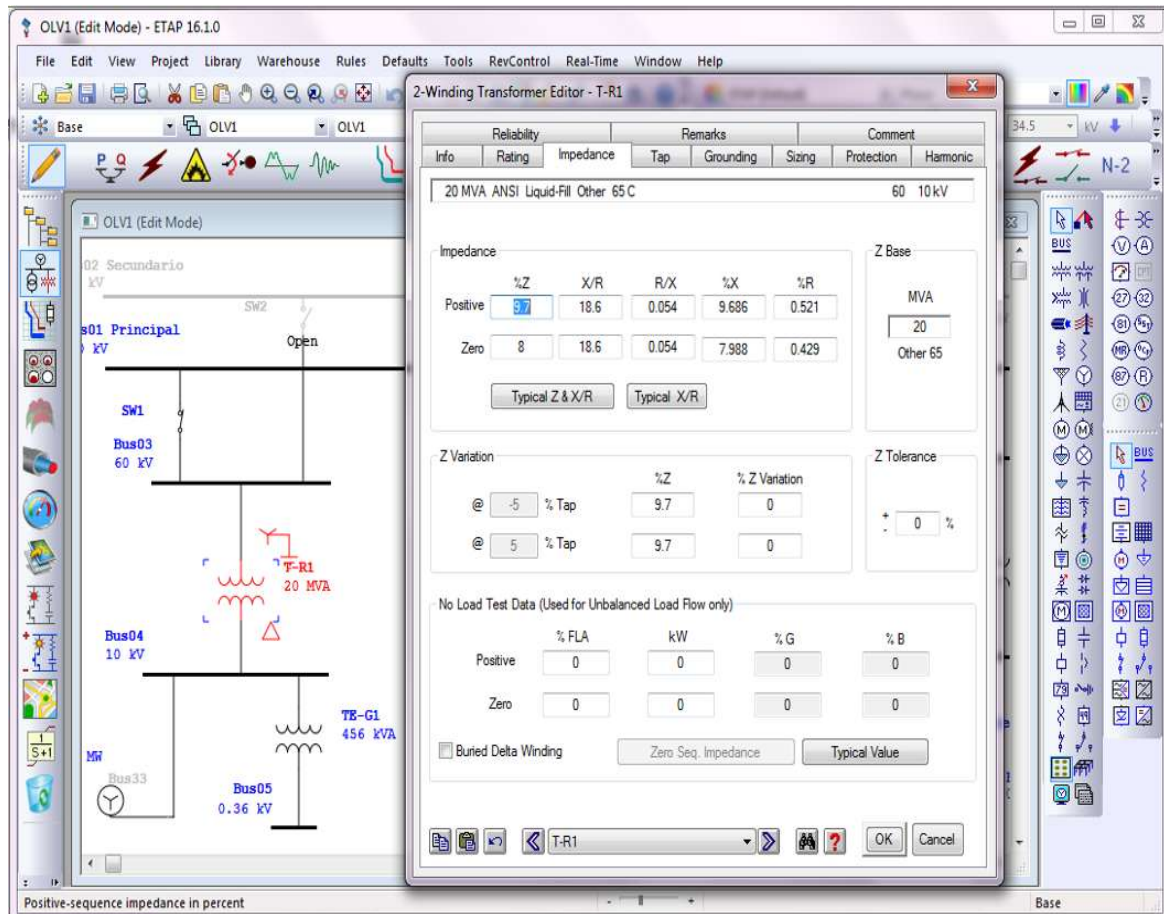


Figura 4.6. Imagen muestra ventana de edición de datos correspondientes a impedancias en transformador.

De los datos a insertar dentro de la ventana de edición del transformador, figura 4.6, hay que destacar que aunque los transformadores como tal no son una fuente de contribución a la corriente de falla de cortocircuito, éstos son más bien contribuyentes a la oposición de la misma. Cabe mencionar que si bien dentro del software podemos hacer uso de -Typical Data- únicamente como herramienta de apoyo para no tener inconvenientes en la ejecución. Al ser el transformador una oposición a la corriente de falla, lo más conveniente es usar los datos reales para un estudio y resultados más próximos a lo real.

4.2.3 Red Eléctrica

Figura 4.7, ventana de edición de datos principales de la red eléctrica o acometida exterior, fuente potencial contribuyente a la falla de cortocircuito.

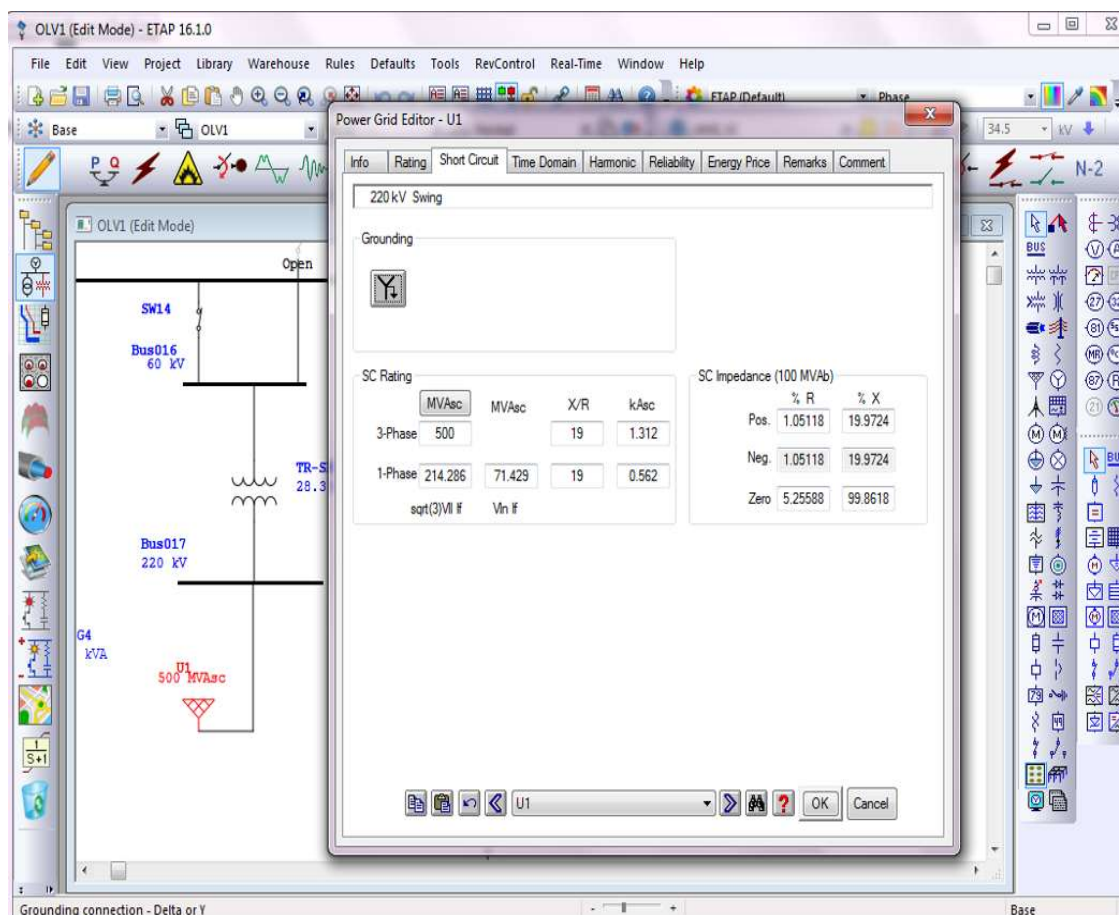


Figura 4.7. En la imagen se visualiza la ventana de edición de la acometida de red de energía externa.

Descripción de la Ventana de Edición:

Conexión: La conexión de la red eléctrica se puede seleccionar haciendo clic en los botones de conexión hasta que se muestre la conexión deseada. Las conexiones disponibles son Estrella y Delta. Como consideración, esta opción solo está disponible para redes eléctricas trifásicas.

Tipo de puesta a tierra: El menú del tipo de puesta a tierra está disponible cuando el voltaje de la red eléctrica es de 1 kV o menos. Los tipos de puesta a tierra disponibles dependen de la selección de conexión a tierra y reflejan el método.

Clasificación SC: La sección está habilitada solo para redes eléctricas trifásicas.

MVAsc: Especifique el MVA de cortocircuito para fallas trifásicas y monofásicas (línea a tierra). Al ingresar o modificar MVAsc o X/R, ETAP vuelve a calcular los valores de impedancia de cortocircuito correspondientes.

El MVA de cortocircuito para corrientes de falla trifásicas y monofásicas (línea a tierra) se calcula:

$$MVA_{3P} = 1.732 * kV * I_{3P}$$

$$\sqrt{3} V_{ll} \text{ If } MVA_{1P} = 1.732 * kV * I_{1P}$$

$$V_{ln} \text{ If } MVA_{1P} = (kV / 1.732) * I_{1P}$$

SC Rating				
	MVAsc	MVAsc	X/R	kAsc
3-Phase	0.833		10	0.481
1-Phase	0.833	0.278	10	0.481
	$\sqrt{3} V_{ll} \text{ If}$	$V_{ln} \text{ If}$		

Donde I_{3P} e I_{1P} son corrientes de cortocircuito trifásicas y monofásicas (kAsc). Estos valores se calculan y se muestran. Además, los MVAsc para cálculos en una fase basados en V_{ln} también se muestran.

kasc: Contribución de cortocircuito de la red eléctrica. Este valor se actualiza si se especifican MVAsc y X/R.

X/R: Se ingresan las siguientes relaciones X/R para las impedancias de secuencia positiva y cero:

*Relación trifásica X/R = X/R para la impedancia de secuencia positiva de la red eléctrica.

*Relación 1-Fase X/R = X/R para la impedancia de secuencia cero de la red eléctrica.

SC Imp (base de 100 MVA): Si se especifica la impedancia de cortocircuito (resistencia y reactancia) en porcentaje en una base de 100 MVA. Los valores de impedancia de cortocircuito incluyen secuencias positivas, negativas y cero. A medida que ingresa o modifica los valores de impedancia de cortocircuito, ETAP vuelve a calcular los MVAsc y X / R correspondientes para fallas trifásicas y monofásicas.

Impedancia del circuito de falla de tierra/tierra: Si se especifica la impedancia de bucle de falla de tierra/tierra equivalente (Z_e) en ohmios y X/R de la red de potencia. Esta sección solo es visible cuando una red eléctrica de 3 fases es de 1 kV o menos y el Tipo de puesta a tierra es cualquier tipo de puesta a tierra, excepto NEC. Estos campos solo se usan en el cálculo de descarga.

4.2.4 Cables

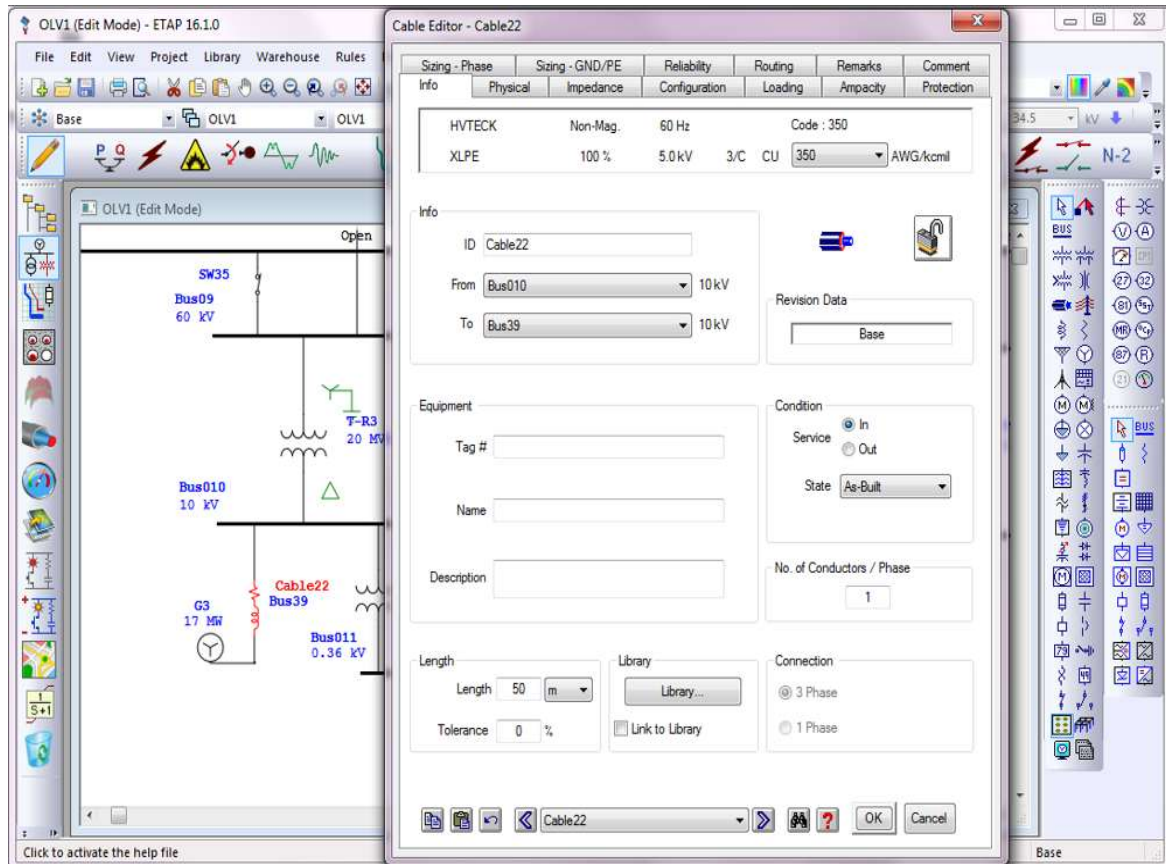


Figura 4.8. Muestra la ventana de edición de los datos más relevantes de los Cables dentro del diseño en ETAP

Descripción de la Ventana de Edición, figura 4.8:

Tipo de cable: Esta información se muestra en la parte superior de cada página del Editor de cable para reflejar el tipo de cable y el tamaño seleccionado de la Biblioteca de cable. Esta es una lista parcial del encabezado de la biblioteca que incluye:

- El nombre de fuente de la biblioteca (ICEA, NEC)
- Voltaje nominal (0.6, 5, 15 kV)
- Clase de voltaje (100%, 133%)
- Número de conductores por cable (1 / C, 3 / C)
- Tipo de conductor (CU, AL)
- Tipo de aislamiento (goma, XLPE)
- Tipo de instalación (magnético / no magnético)
- Tamaño del cable (350 kcmil, 180 mm2)

La unidad para tamaños de cable estará en AWG / kcmil para los cables de la unidad en inglés y en mm2 para los cables de la unidad métrica.

Nota: ETAP proporciona una lista de todos los tamaños de cable disponibles de la biblioteca seleccionada para una selección rápida, figura 4.9.

Si cambia el tamaño del cable, todos los datos de la biblioteca se sustituirán de la biblioteca de cables en el Editor de cable. Si modifica los datos que se extrajeron de la biblioteca, el color del Tipo de cable cambiará a un color azul oscuro para indicar que hay un conflicto entre el editor y los datos de la biblioteca.

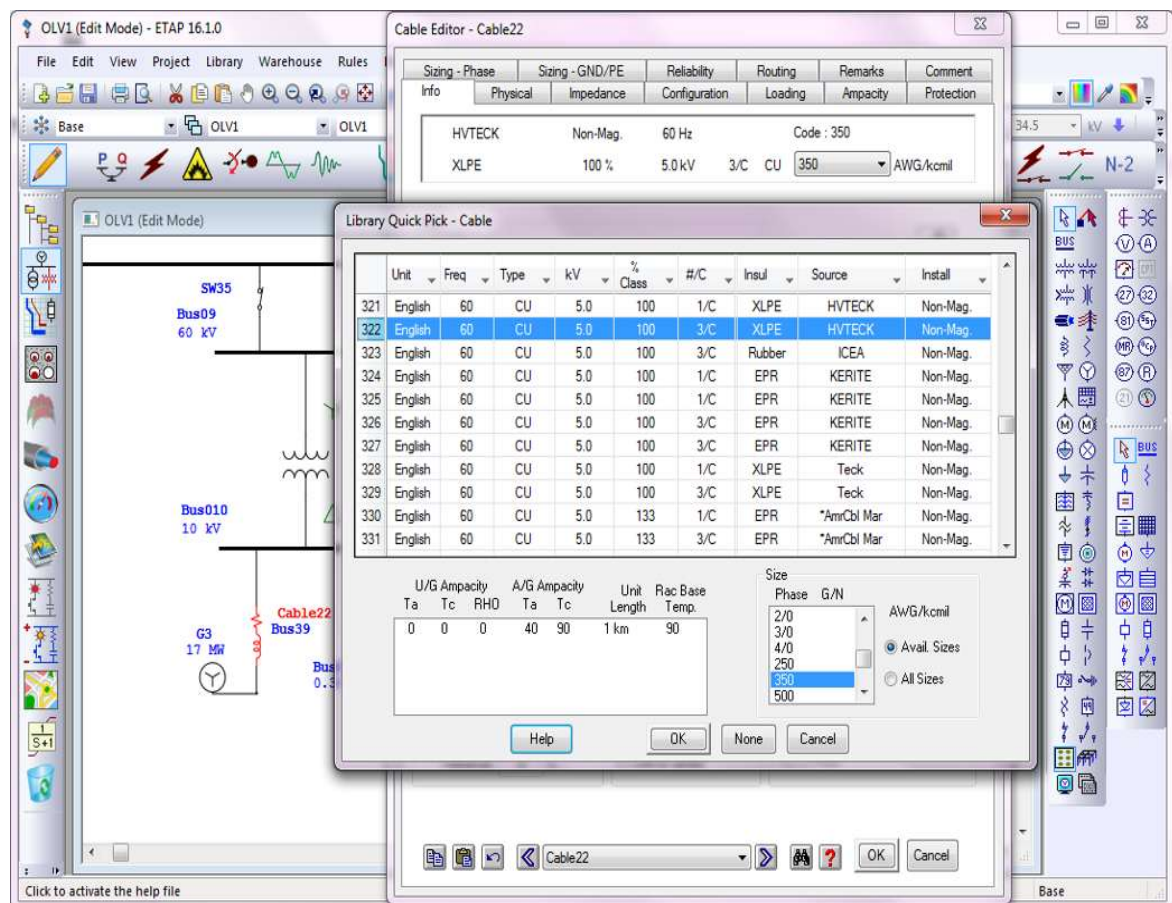


Figura 4.9. Muestra librería de cables completa para sistema Inglés y métrico.

Una vez que se han introducido correctamente los datos, se prosigue identificando los puntos en donde queremos observar la falla. Para ello comenzaremos el programa en modo de análisis de cortocircuito, enseguida clic derecho sobre el bus a analizar y seleccionar “Fault”, la barra seleccionada tomará un color rojo, que nos indicara que es un bus “fallado”, específicamente que será donde observaremos la suma de las corrientes de falla en ese punto, figura 4.10.

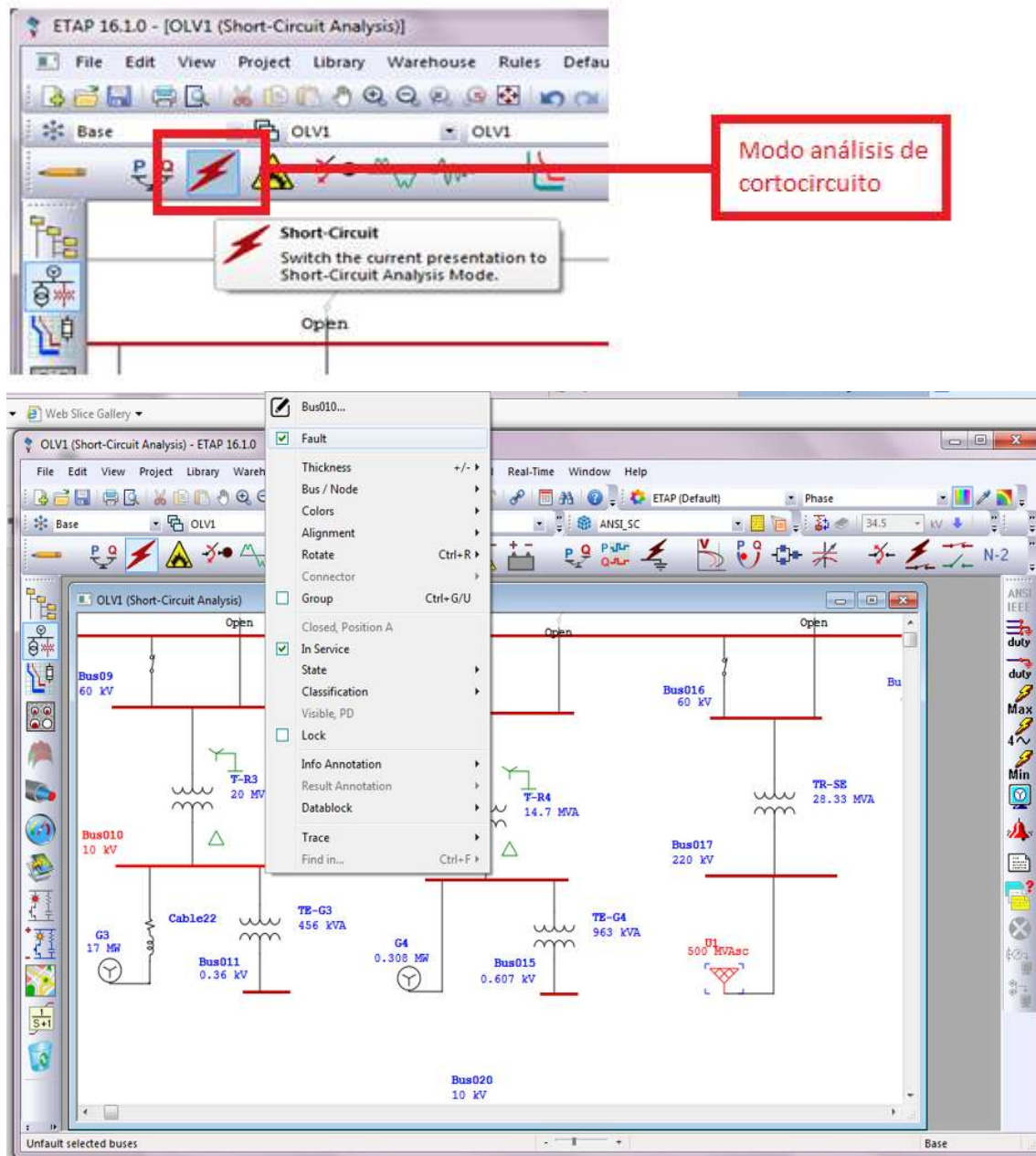


Figura 4.10 Imagen muestra pasos para indicar un bus en falla.

Enseguida se describe la barra de análisis de cortocircuito en estándar ANSI, cabe mencionar que dicha barra de herramientas cambia conforme al estándar previamente seleccionado. Figura 4.11



*De la barra de la izquierda podemos observar que los botones serán dados por el estándar que seleccionamos, en este caso ANSI

*Max.- Este nos dará los valores de corriente de cortocircuito picos o máximos, de 1-2 ciclos.

*4.- Para valores de corriente de cortocircuito en estado transitorio, de 1.5-4 ciclos

*Min.- Para los valores de corriente de cortocircuito mínimos, a 30 ciclos, o estado permanente.

*Botón para desplegar opciones para el estudio de cortocircuito

*Alertas

*Generador de reportes, únicamente hacer clic sobre él y muestra las diferentes opciones

Figura 4.11. La barra mostrada de lado izquierdo contiene los botones disponibles para el uso de ETAP en modo de análisis en el estándar ANSI.

El botón mencionado en la barra de herramientas anterior, despliega una ventana de opciones que podremos utilizar para los resultados que deseemos visualizar en el reporte a generar. Figura 4.12

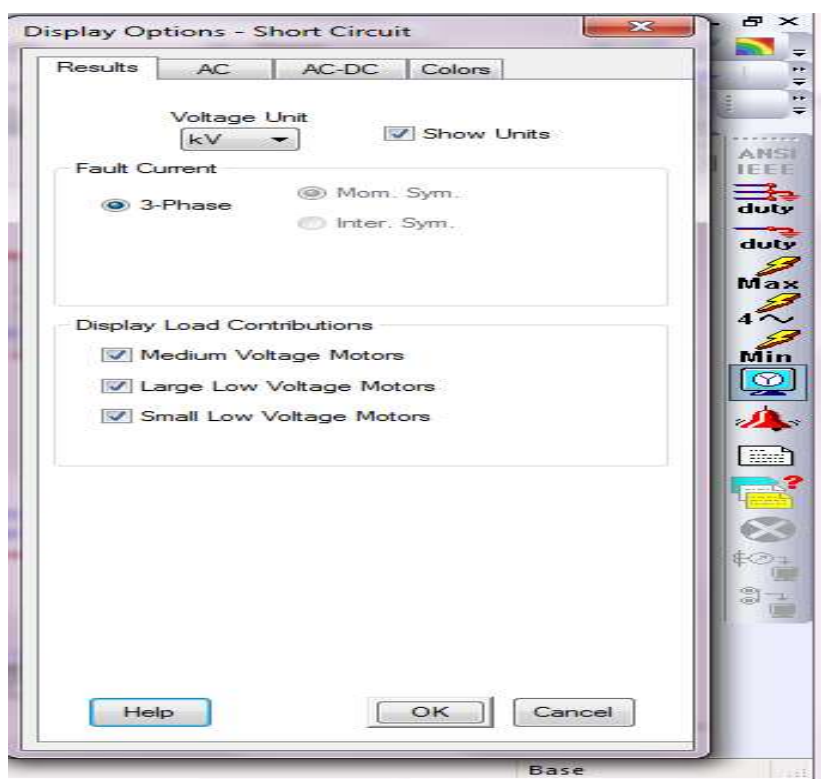


Figura 4.12. La ventana de opciones dependerá del estándar y el tipo de estudio que implementemos.

3.2.5 Generador de Reportes

El software dispone de específicos tipos de reporte, en donde podemos visualizar de una manera más clara los resultados del estudio de cortocircuito, con valores de corrientes aportadas en cada componente detallados, hasta un resumen con corrientes de falla en cada bus que se haya especificado como punto de falla, para cada uso que se requiera dar a cada estudio en particular es conveniente tener en cuenta las especificaciones.

El Editor “Report Manager” para los informes de salida consta de cuatro pestañas: Reporte completo, Datos de entrada, Resultados completos y Resumen de resultados. Los formatos de informe de salida se ordenan en estas categorías. Para ver un reporte de salida, seleccione una plantilla y formato de informe y luego haga clic en Aceptar. El informe de salida completo es la compilación de entradas, resultados e informes resumidos.

Con el Administrador de informes, figura 4.13, puede ver los informes de salida en solo vista (Crystal Reports Viewer), PDF, MS Word, formato de texto Rich y MS Excel. El formato predeterminado está establecido en solo vista. Sin embargo, puede establecer el valor predeterminado en otros formatos seleccionando un formato y marcando la opción Establecer como predeterminado.

Se debe tomar en cuenta que los formatos PDF, MS Word, Rich Text Format y MS Excel se exportan desde las plantillas de informes creadas con Crystal Reports*.

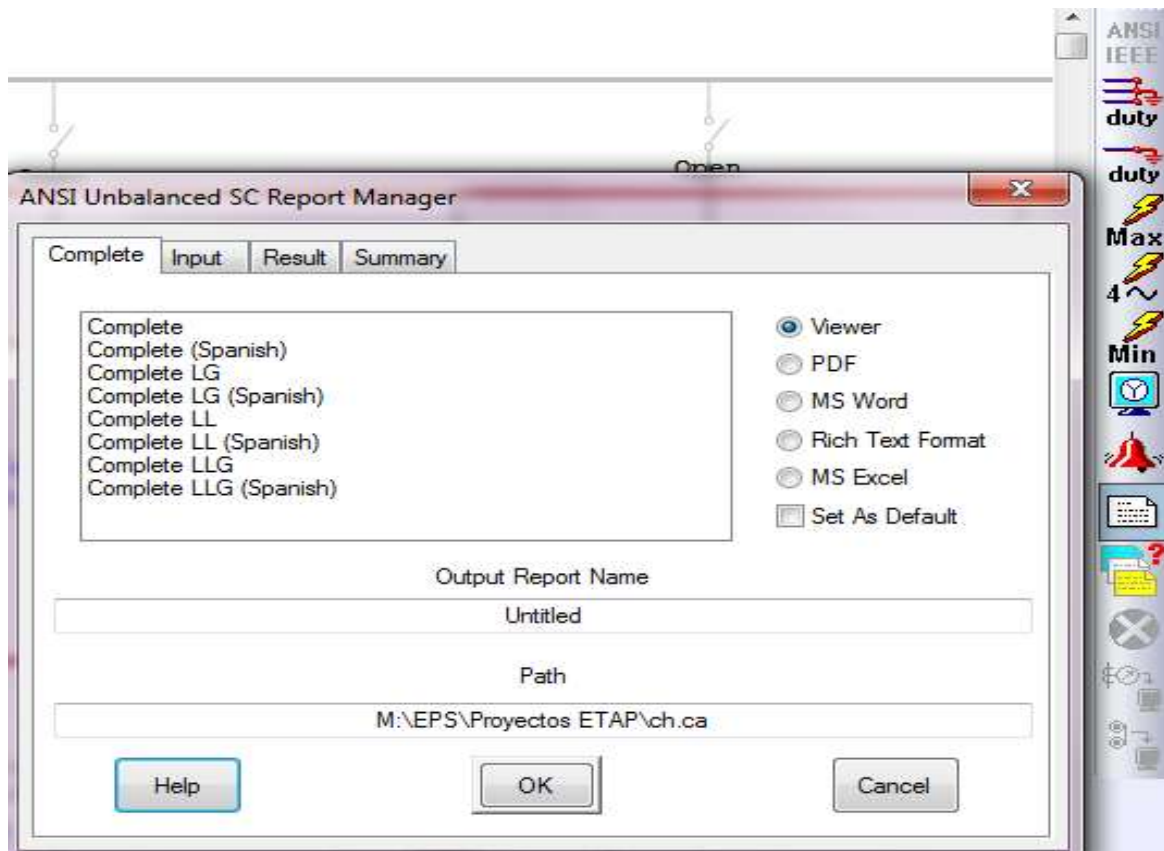


Figura 4.13. Imagen muestra Administrador de reportes

* **Crystal Reports** es una aplicación de inteligencia empresarial utilizada para diseñar y generar informes desde una amplia gama de fuentes de datos, algunas compañías incluyen una versión de este, como una herramienta de propósito general para informes/reportes.

Capítulo 5: Pruebas y Resultados

Para este capítulo tomamos una parte del sistema para determinar su corriente de cortocircuito trifásica, haciendo uso de la metodología existente y basándonos específicamente en (Martinez, 1998). Obteniendo resultados que posteriormente se comparan con los de esa misma fracción del sistema pero obtenidos mediante ETAP

5.1 Determinación de la Corriente de Cortocircuito Trifásica

El método implementado únicamente se considera por las facilidades que éste aporte, dependiendo de los datos de componentes con los que se cuenten, etc. considerando que el estudio de cortocircuito es un conjunto de cálculos matemáticos exactos que si bien, por norma y/o método solo varían por factores que impliquen mayor proximidad, aun así este siempre resultara igual.

En este caso implementaremos manualmente el cálculo de corrientes de cortocircuito mediante el método de componentes simétricas.

El método de las componentes simétricas basa su procedimiento en encontrar valores en por unidad (PU) de las Impedancias de los elementos que conforman y que tiene aportación de corrientes de corto circuito al sistema, para finalmente obtener la impedancia equivalente de Thevenin y posteriormente evaluar con la ecuación correspondiente a la corriente de secuencia positiva, que en realidad es la corriente de falla. Una vez encontrada, se realiza el producto de la corriente base con la corriente de secuencia, para así obtener la corriente trifásica en el punto de análisis.

5.1.1 Desarrollo

Para la parte de los cálculos a mano, y a manera de que éste sea un ejemplo representativo únicamente, se opta por esta fracción del sistema total a desarrollar como ejercicio base, para observar al menos uno de los principales componentes dentro del estudio de cortocircuito. El resto del sistema no se incluye ya que cada contribución podría afectar el resultado final obtenido y por lo tanto no concordaría con los calculados en este ejemplo. Figura 5.1.

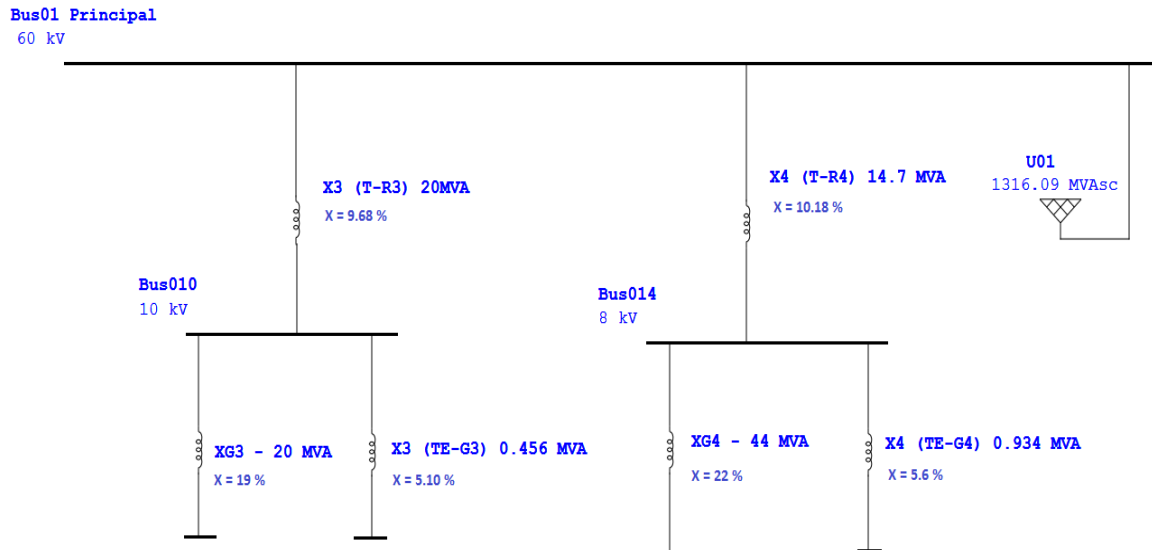


Figura 5.1. Muestra diagrama bajo estudio, y valores correspondientes a cada equipo.

Una vez identificado el sistema procedemos con el método. Como algunas veces en los sistemas de potencia los datos de impedancias de los distintos elementos que están expresados en %, están referidos a los valores base de sus propios valores nominales de tensión y potencia, y como estos valores pueden ser distintos para cada uno de los elementos, es necesario que se dé una impedancia base.

En el primer paso en la solución es obtener un diagrama de reactancias donde se representa cada elemento por su reactancia referida a una base común en MVA para el sistema, en este caso 100MVA.

Para realizar la reducción del sistema bajo estudio, mediante el método de componentes simétricas, cada componente debe ser unificado en su reactancia en por unidad, bajo la siguiente formula:

$$X_{base2} = X_{base1} \left(\frac{MVAbase2}{MVbase1} \right) \quad (1.1)$$

Se obtiene el valor de reactancia de cada componente, asignando un valor de potencia base para unificar el valor de potencia de todo el sistema. Debido a la magnitud del sistema se tomarán 100MVA como BASE2.

Enseguida para un manejo eficiente de números, se puede hacer uso de una hoja de cálculo de Excel, en donde se introducen los valores de cada componente (MVA y X(PU)), de igual manera se da la formulación adecuada para de este modo obtener los resultados.

D2 fx =(F2/B2)*C2					
	A	B	C	D	F
1	Componentes	MVAbase1	Xbase1 (PU)	Resultados (Xbase2)	MVAbase2
2	T-R3	20	0.0968	0.484	100
3	T-R4	14.7	0.1018	0.692517007	
4	TE-G3	0.456	0.051	11.18421053	
5	TE-G4	0.963	0.056	5.815160955	KvaBase (MVA)
6	G3	20	0.19	0.95	0.06
7	G4	44	0.22	0.5	

De entre los varios métodos conocidos para dicho estudio, el método de componentes simétricas especifica que cada componente dentro del sistema a estudiar se reduce en su equivalente de impedancia en por unidad, para finalmente sumarse en serie o paralelo según sea la dirección previamente establecida, Figura 5.2.

Bus01 Principal
60 kV

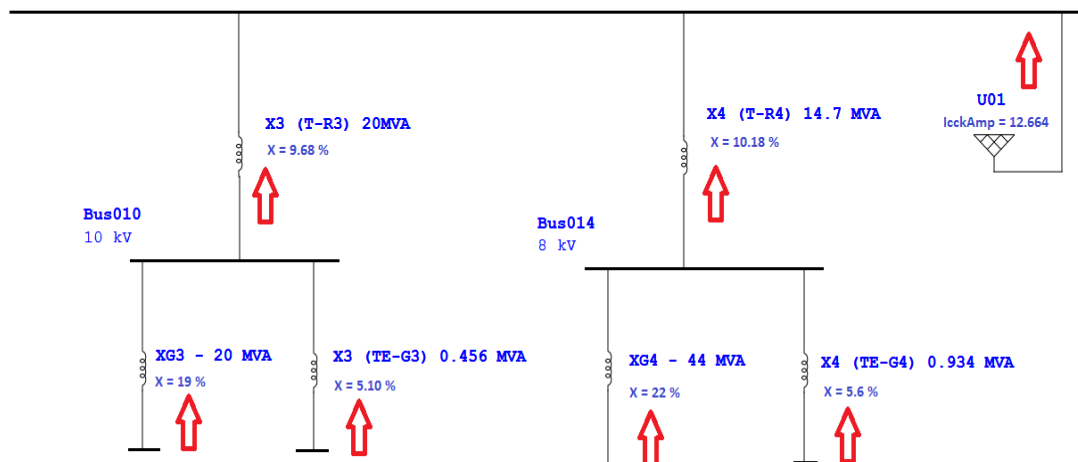


Figura 5.2. Diagrama unifilar de sistema bajo estudio matemático, muestra flujo de corrientes adoptadas.

5.1.2 Operaciones

De acuerdo al flujo señalado en la imagen anterior y una vez obtenidas las reactancias en por unidad, se procede.

Comenzando con la Unidad 3

El procedimiento se adoptaría de la siguiente manera, considerando que el Generador 3 se encuentra en paralelo con el transformador de excitación TE-G3.

$$X_{Eq31} = (X_{G3}) // X_3(TE-G3) = \mathbf{0.8756}$$

Enseguida se suma el equivalente y resultaría en serie con el transformador T-R3

$$X_{Eq32} = (X_{Eq31}) + X_3(T-R3) = \mathbf{1.3596}$$

Después con la Unidad 4

El procedimiento se adoptaría de la siguiente manera, considerando que el Generador 4 se encuentra en paralelo con el transformador de excitación T-G4.

$$X_{Eq41} = (X_{G4}) // X_3(TE-G4) = \mathbf{1.1529}$$

Enseguida se suma el equivalente y resultaría en serie con el transformador T-R4

$$X_{Eq42} = (X_{Eq41}) // X_4(T-R4) = \mathbf{0.6238}$$

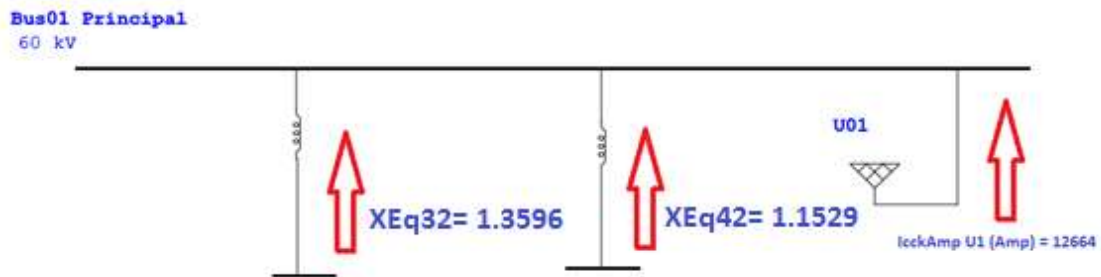


Figura 5.3. Flujo de corriente correspondiente a reducción para procedimiento matemático.

Finalmente se realiza una suma en paralelo,

$$X_{Eqtotal} = (X_{Eq32}) // (X_{Eq42}) = \mathbf{0.6238}$$

Considerando el bus principal como el punto de falla en donde se desea observar el valor de corriente de cortocircuito, como se observa en la figura 5.2, Se aplica la formula $I_{cc3\phi}$ (1.2) en este punto.

Empleamos la formulación siguiente:

Valor en p.u que corresponde a corriente.

$$I_{cc3\phi} \text{ (PU)} = \left(\frac{E_a}{X_{eq(+)}} \right) \quad (1.2)$$

Corriente base:

$$I_{base} = \left(\frac{MVA}{MV} \right) \quad (1.3)$$

Corriente de cortocircuito en Amperes

$$I_{cc} \text{ Amp} = I_{base} * I_{cc3\phi} \text{ (PU)} \quad (1.4)$$

23	Icc(BASE)	1666.666667	Ibase= $\frac{MVA}{MV}$
24			
25	IccAmp (PU*BASE)	2671.422123	Icc Amp = Ibase * Icc3φ (PU)
26			
27	Icc total	15335.42212	
28			

*Corriente en color verde sin contribución de acometida externa

*Corriente en color amarillo, sumando corriente de cortocircuito de acometida externa en Amperes.

Comparación:

Valor de cortocircuito en bus principal por software = 14.207 kA

Valor de cortocircuito en bus principal por Corrientes Simétricas = 15.335 kA

Considerando que el estudio de cortocircuito es un conjunto de cálculos matemáticos exactos, los resultados de corrientes de corto circuito trifásicas en este pequeño ejemplo, deberían ser las mismas, independientemente de si fueron obtenidas por medio de software o “a mano” por cualquier método.

Algunas de las consideraciones por las que los resultados pueden variar hasta en un 10% de margen de error tiene que ver con los esfuerzos matemáticos que cada método implemente, factores de multiplicación que algunos componentes poseen, incluso la norma misma implementa la separación de corrientes en sus componentes AC y CD para finalmente hacer una suma de todas, cada una de estas cuestiones resultaría en pequeñas discrepancias.

5.2 Resultados en ETAP

En cada barra que seleccionamos como punto “fallado”, podemos observar el valor de la corriente de cortocircuito, ETAP muestra simultáneamente todas las posibles fallas. Figura 5.4.

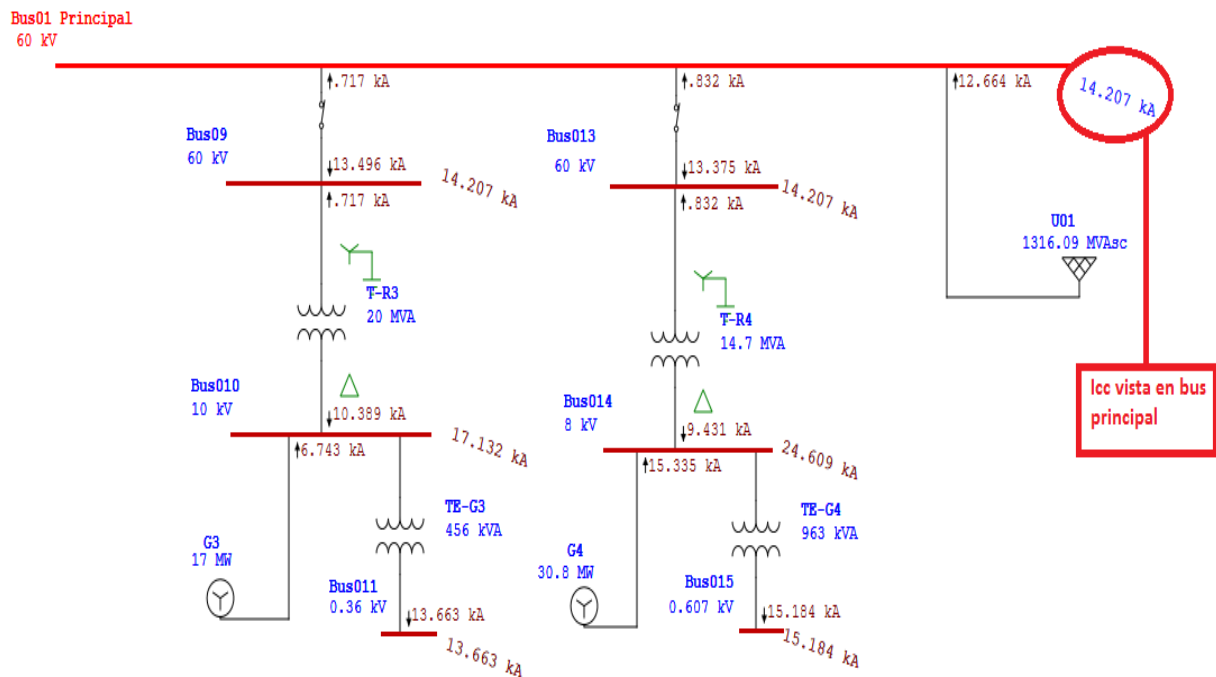


Figura 5.4. Corrida en ETAP de diagrama bajo estudio, mostrando dirección de contribuciones de corrientes de cortocircuito.

ETAP muestra valores de corrientes de cortocircuito en cada punto que deseemos observar dichas fallas, volviendo en estado “fallado” cada bus. Así también, podemos generar un reporte en donde se visualicen tabularmente estos resultados.

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL y LLG

Tensión pre-falta = 100 % de la Tensión nominal de Barra

Barra		Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
ID	kV	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus01 Principal	60.000	2.582	-13.970	14.207	1.178	-10.110	10.178	11.967	2.212	12.170	11.678	6.227	13.235
Bus09	60.000	2.582	-13.970	14.207	1.178	-10.110	10.178	11.967	2.212	12.170	11.678	6.227	13.235
Bus010	10.000	1.092	-17.097	17.132	1.626	-17.691	17.766	13.796	1.024	13.834	-15.330	9.630	18.104
Bus011	0.360	2.579	-13.418	13.663	2.617	-13.524	13.775	11.595	2.230	11.808	-12.937	4.614	13.735
Bus013	60.000	2.582	-13.970	14.207	1.178	-10.110	10.178	11.967	2.212	12.170	11.678	6.227	13.235
Bus014	8.000	5.112	-24.072	24.609	3.188	-22.210	22.438	18.824	2.708	19.018	-22.070	9.230	23.923
Bus015	0.607	2.611	-14.958	15.185	2.600	-15.145	15.366	12.889	2.207	13.076	-14.271	5.522	15.302

All fault currents are symmetrical (Red Equivalente del 1/2 ciclo) values in rms kA.

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.

Una vez que los resultados son comparados y analizados podemos notar que el margen de error resulta menor, casi despreciable, y esto nos ayuda a verificar la confiabilidad del software, así como a reforzar la teoría básica del estudio de cortocircuito, las características de los componentes bajo estudio además de los diferentes factores que influyen dentro de este muy interesante y relevante tema.

Capítulo 6: Análisis de Cortocircuito Mediante ETAP

6.1 Datos e Información del Sistema

Para el estudio de cortocircuito aquí presentado se considera la central hidroeléctrica Callahuanca ubicada en Lima, Perú. La cual cuenta con los siguientes datos técnicos:

- Capacidad instalada: 80 MW,
- Potencia efectiva: 84.2 MW
- Generación anual media: 600 GWh
- Caudal de la central: 23 m³/seg.
- Altura bruta de caída: 435 m.
- Turbina tipo: Pelton Eje Horiz.
- Número de unidades: 4

Para los valores de la red de energía pública y en este caso únicamente se usaron los datos del sistema tomando en cuenta el escenario de estiaje y demanda máxima.

Este análisis consta de tres casos, de acuerdo a ANSI/IEEE C37.010-1999:

1. Corriente de primer ciclo (momentánea).

Las corrientes momentáneas se usan para determinar las corrientes máximas a las que los dispositivos de disparo instantáneo y directo responden, esta corriente corresponde a la capacidad de interrupción de los dispositivos.

2. Corriente de 1,5-4 ciclos (transitoria).

La corriente de interrupción máxima es el valor al cual el intervalo del tiempo de coordinación (ITC) es frecuentemente establecido.

3. Corriente de tiempo retardado (30 ciclos).

La mínima corriente de interrupción es necesaria para determinar si la sensibilidad de la protección del circuito es la adecuada. La corriente de falla de la red de 30 ciclos (no hay contribución de motores) se usa para establecer el intervalo del tiempo de coordinación para las protecciones de sobre corrientes del sistema. En el momento en que estos dispositivos de protección funcionan, la contribución de la corriente aportada por los motores decae a cero o es mínima.

A continuación se muestra el diagrama unifilar con los elementos proyectados y existentes, figura 6.1.

5.2 Diagrama Unifilar de la Planta

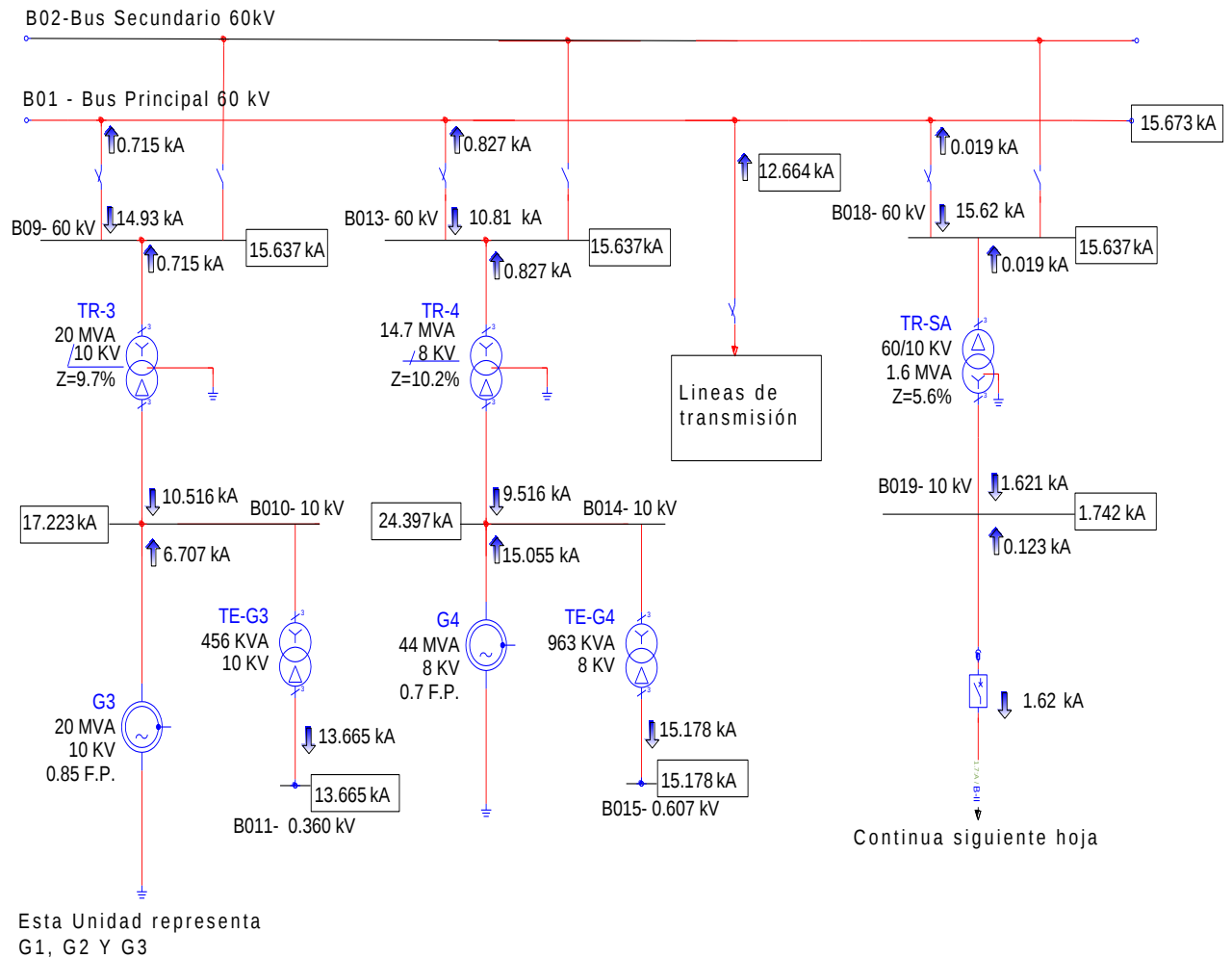


Figura 6.1 Primera parte de diagrama unifilar de central Callahuanca

Nota: Texto en recuadro “Líneas de transmisión “Representa a todas las líneas conectadas a la barra principal de 60 kV. Para observar el valor de corriente de cortocircuito en ella, con los generadores (G1, G2, G3 Y G4) sin generación.

Continuación

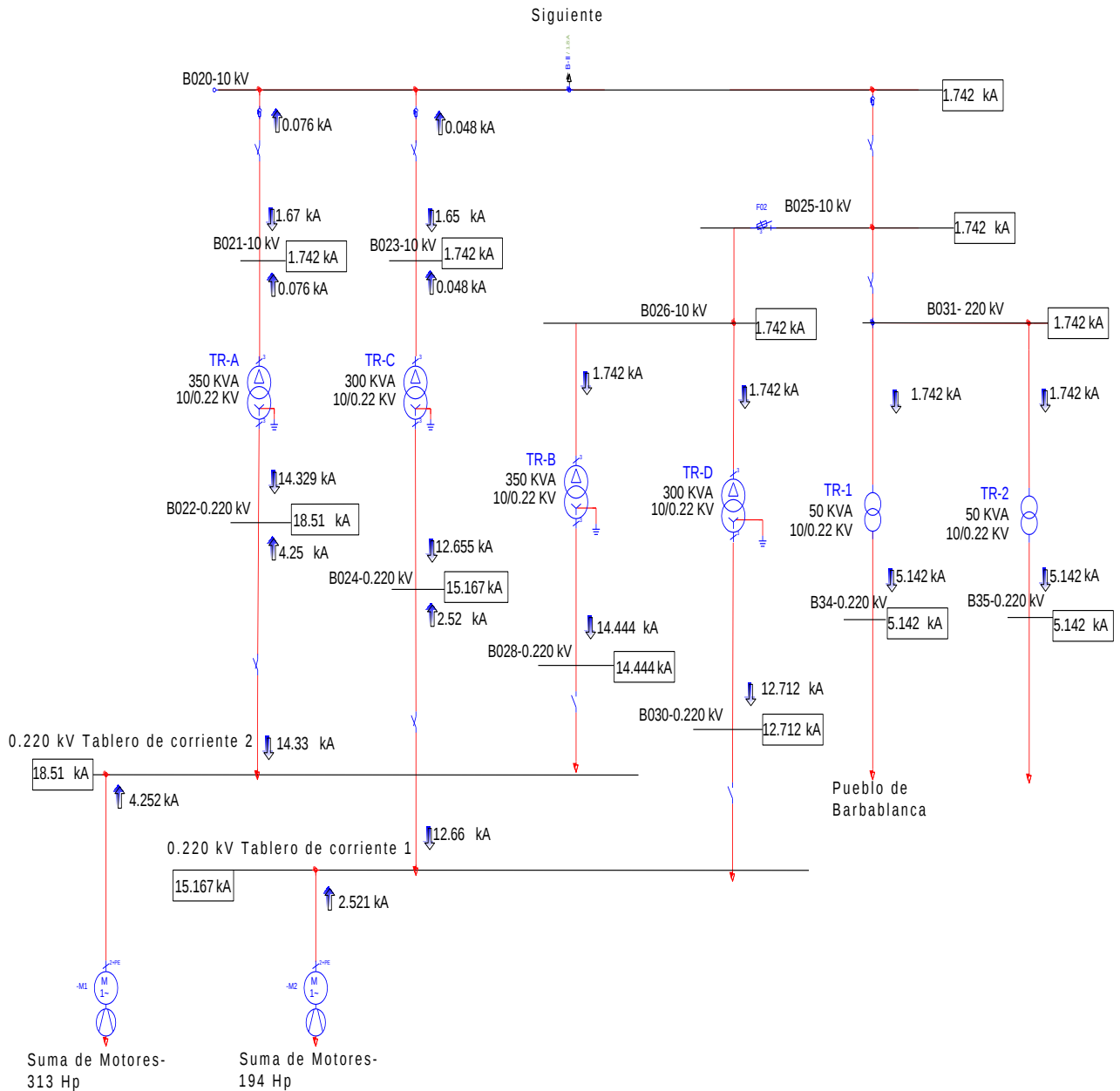


Figura 6.2 Segunda parte de diagrama unifilar de central Callahuanca

Las figuras 6.1 y 6.2 anteriores representan el diagrama unifilar completo de la planta, por estética fue diseñado en Autocad, mostrando únicamente los componentes contribuyentes más importantes de este sistema. Las corrientes que en la figura se aprecian son las corrientes de primer ciclo o momentáneas implementando el estándar ANSI, se observa la dirección de las contribuciones de corriente en cada bus fallado, el cual sería nuestro punto de falla a analizar.

6.3 Consideraciones Generales para el Cálculo

El estudio de la falla momentánea asimétrica se determina tomando en cuenta los factores de asimetría y el factor X/R del sistema (ANSI-C37. 13).

El factor de asimetría está en función del factor X/R, el cual proporciona el valor de asimetría en cada bus.

En el cálculo de cortocircuito trifásico y monofásico simétrico, se consideran los diagramas de secuencias positiva, negativa, cero.

Todos los cálculos de las fallas, se realizan tomando en cuenta los valores de impedancia o reactancia de los equipos, referidos a su potencia nominal de diseño (transformadores, conductores, motores, etc.)

Los valores obtenidos en el caso de la falla momentánea corresponden a los cálculos realizados con los valores de las reactancias subtransitorias de los componentes de la red.

Con los valores transitorios, se obtienen los resultados mostrados en el caso cuando han transcurrido varios ciclos después de presentada la falla.

Los tipos de fallas presentadas en los resultados son las siguientes:

- LLL. Corresponde a la corriente de cortocircuito trifásica.
- LG. Corresponde a la corriente de cortocircuito monofásica.
- LL. Corresponde a la corriente de cortocircuito entre dos fases.
- LLG. Corresponde a la corriente de cortocircuito entre dos fases y tierra.

6.3.1 Metodología Implementada por ANSI

En los cálculos de cortocircuito ANSI / IEEE, una fuente de tensión equivalente en la ubicación de la falla, que es igual a la tensión de pre-falla, reemplaza todas las fuentes de tensión externas y las fuentes internas de tensión de la máquina.

Todas las máquinas están representadas por sus impedancias internas. Las capacitancias de línea y las cargas estáticas no se consideran. Las tomas de transformador pueden configurarse en la posición nominal o en la posición de derivación, y existen diferentes esquemas disponibles para corregir la impedancia del transformador y los voltajes del sistema si existe un ajuste de derivación nominal. Se supone que para la falla trifásica, la falla está atornillada. Por lo tanto, las resistencias al arco no son consideradas. Puede especificar la impedancia de falla en el Caso de estudio de cortocircuito para falla

monofásica a tierra. Se supone que las impedancias del sistema son equilibradas en 3 fases, y el método de componentes simétricas se usa para cálculos de fallas no balanceadas.

Se forman tres redes de impedancia diferentes para calcular las corrientes de cortocircuito momentáneas, de interrupción y de estado estacionario, y las correspondientes funciones para varios dispositivos de protección. Estas redes son: red de ½ ciclo (red subtransitoria), red de ciclo 1.5-4 (red transitoria) y red de 30 ciclos (red de estado estable).

Las normas ANSI/IEEE recomiendan el uso de redes R y X separadas para calcular los valores X/R. Se obtiene una relación X/R para cada bus con falla individual y corriente de cortocircuito. Esta relación X/R se usa para determinar el factor multiplicador para tener en cuenta el desplazamiento de CC del sistema.

Usando las redes de ½ ciclo y 1.5-4, el valor rms simétrico de las corrientes de cortocircuito momentáneas y de interrupción se resuelve primero. Estos valores se multiplican por factores multiplicadores apropiados para obtener finalmente el valor asimétrico de las corrientes de cortocircuito momentáneas e interruptoras.

Una vez que hemos diseñado el diagrama unifilar a estudiar, podemos hacer uso de este para obtener los resultados que deseemos observar. En seguida algunos ejemplos.

Este editor de reportes ofrece diferentes opciones, dentro de las cuales podemos encontrar el resumen de los datos más relevantes del sistema en cuestión.

Análisis del Cortocircuito

Estándar ANSI

Corriente de Falta Trifásica, LG, LL y LLG

Red Equivalente del 1/2 ciclo

	Barra Infinita	V-Control	Carga	Total			
Número de Barras:	5	0	30	35			
	XFMR2	XFMR3	Reactor	Línea/Cable	Impedancia	DP-Enlace	Total
Número de Ramales:	16	0	0	0	0	18	34
	Synchronous Generator	Power Grid	Synchronous Motor	Induction Machines	Lumped Load	Total	
Número de Máquinas:	4	1	2	0	0	7	

Figura 6.3. Muestra descripción de diagrama unifilar del sistema.

Cuando optamos por un reporte explícito, podemos encontrar toda la información de nuestro sistema, tales como todos los datos de transformadores, generadores, máquinas síncronas, redes de energía externas, etc.

Datos de Entrada de Red de Potencia Externo

Red de Pot.	Barra Conectada	Clase		% Impedancia Sec. Positiva 100 MVA base			Puesta a Ti	% Impedancia Sec. Cero 100 MVA base		
		MVASC	kV	X/R	R	X		X/R	R0	X0
U01	Bus017	1316.090	220.000	5.14	1.45096	7.45844	Estrella-Sólid	18.50	0.200000	3.70000

Número Redes (= 1) 1316.090 MVA

Datos de Entrada del Generador Síncrono

Generador Síncrono		Clase			Impedancia Sec. Positiva					Puesta a Tierra			Impedancia Sec. Cero		
		MVA	kV	RPM	X''/R	% R	Adj.	Tol.	%Xd'	Con.	Tipo	Amp	X/R	% R0	% X0
G1	Hidráulico	20.000	10.000	514	20.99	0.815	17.10	-10.0	20.00	Estrella	Sólido		7.00	0.714	5.00
G2	Hidráulico	20.000	10.000	514	21.00	0.814	17.10	-10.0	20.00	Estrella	Sólido		7.00	0.714	5.00
G3	Hidráulico	20.000	10.000	514	19.00	0.900	17.10	-10.0	20.00	Estrella	Sólido		7.00	0.714	5.00
G4	Hidráulico	44.000	8.000	450	3.27	6.064	19.80	-10.0	28.00	Estrella	Sólido		7.00	1.914	13.40

Total de Generadores Síncronos Conectados (=4): 104.000 MVA

Figura 6.4. Muestra datos de entradas relevantes de generadores y red de potencia externa.

En este mismo podemos obtener el resultado, por cada barra fallada, las aportaciones, su dirección (de qué punto a qué punto se dirigen). Figura 6.5.

Project:	Callahuanca	ETAP	Page:	10
Location:	Morelia, Mich	16.1.0C	Date:	05-08-2018
Contract:	PER000766508		SN:	ANDRITZHDR
Engineer:	Daniela Ramirez	Study Case: SC	Revision:	Base
Filename:	ch.ca		Config.:	Normal

SHORT-CIRCUIT REPORT

Fault at bus: **Bus01 Principal**

Prefault voltage = 60.000 kV
 = 100.00 % of nominal bus kV (60.000 kV)
 = 100.00 % of base kV (60.000 kV)

Contribution									Positive & Zero Sequence Impedances			
Contribution		3-Phase Fault		Line-To-Ground Fault					Looking into "From Bus"			
From Bus ID	To Bus ID	% V From Bus	kA Symm. rms	% Voltage at From Bus			kA Symm. rms		% Impedance on 100 MVA base			
				Va	Vb	Vc	Ia	3I0	R1	X1	R0	X0
Bus01 Principal	Total	0.00	15.646	0.00	94.67	89.46	18.876	18.876	1.05E+000	6.06E+000	1.48E-001	2.75E+000
U01	Bus01 Principal	100.00	12.664	100.00	100.00	100.00	15.072	14.024	1.45E+000	7.46E+000	2.00E-001	3.70E+000
Bus010	Bus09	36.13	0.717	63.33	66.15	104.55	0.951	1.299 *	7.23E+000	1.34E+002	2.15E+000	3.99E+001
Bus07	Bus06	36.14	0.717	63.35	66.13	104.55	0.951	1.299 *	6.80E+000	1.34E+002	2.15E+000	3.99E+001
Bus019	Bus018	6.95	0.019	52.72	56.76	101.64	0.015	0.000	1.52E+003	4.80E+003		
Bus014	Bus013	59.91	0.831	73.85	77.32	104.83	0.941	0.955 *	1.77E+001	1.14E+002	2.92E+000	5.43E+001
Bus04	Bus03	36.14	0.717	63.35	66.13	104.55	0.951	1.299 *	6.80E+000	1.34E+002	2.15E+000	3.99E+001

Figura 6.5. Muestra resultados explícitos del estudio de cortocircuito.

Los resultados obtenidos gráficamente dentro del diagrama pueden ser fácilmente identificados, con incluso flechas que nos indican la dirección de cada corriente, etc. Resultados que se pueden observar mediante tablas, dentro de los reportes generados, con ello accediendo más fácilmente a toda esta información para el uso que convenga.

En seguida se muestran los reportes resumidos de resultados.

6.4 Corriente de Primer Ciclo Momentánea

Las corrientes momentáneas se usan para determinar las corrientes máximas a las que los dispositivos de disparo instantáneo y directo responden, esta corriente corresponde a la capacidad de interrupción de los dispositivos.

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL y LLG

Tensión pre-falta = 100 % de la Tensión nominal de Barra

Barra		Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
ID	kV	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus01 Principal	60.000	2.670	-15.408	15.637	2.871	-18.649	18.869	13.066	2.302	13.267	11.773	14.736	18.861
Bus09	60.000	2.670	-15.408	15.637	2.871	-18.649	18.869	13.066	2.302	13.267	11.773	14.736	18.861
Bus010	10.000	1.105	-17.187	17.223	1.734	-17.540	17.626	13.872	1.029	13.910	-15.523	9.336	18.114
Bus011	0.360	2.580	-13.419	13.665	2.618	-13.525	13.776	11.597	2.230	11.810	-12.939	4.614	13.737
Bus013	60.000	2.670	-15.408	15.637	2.871	-18.649	18.869	13.066	2.302	13.267	11.773	14.736	18.861
Bus014	8.000	5.175	-23.842	24.397	3.391	-21.670	21.934	18.716	2.778	18.921	-22.040	8.580	23.651
Bus015	0.607	2.613	-14.952	15.178	2.602	-15.141	15.363	12.885	2.209	13.073	-14.267	5.518	15.297
Bus018	60.000	2.670	-15.408	15.637	2.871	-18.649	18.869	13.066	2.302	13.267	11.773	14.736	18.861
Bus019	10.000	0.266	-1.722	1.742	0.217	-1.473	1.488	1.490	0.227	1.507	1.396	0.873	1.646
Bus020	10.000	0.266	-1.722	1.742	0.217	-1.473	1.488	1.490	0.227	1.507	1.396	0.873	1.646
Bus021	10.000	0.266	-1.722	1.742	0.217	-1.473	1.488	1.490	0.227	1.507	1.396	0.873	1.646
Bus022	0.220	4.249	-18.016	18.510	3.843	-17.714	18.126	15.505	3.533	15.903	13.649	12.398	18.440
Bus023	10.000	0.266	-1.722	1.742	0.217	-1.473	1.488	1.490	0.227	1.507	1.396	0.873	1.646
Bus024	0.220	3.039	-14.860	15.167	2.964	-14.875	15.167	12.890	2.589	13.147	11.389	10.025	15.172
Bus025	10.000	0.266	-1.722	1.742	0.217	-1.473	1.488	1.490	0.227	1.507	1.396	0.873	1.646
Bus026	10.000	0.266	-1.722	1.742	0.217	-1.473	1.488	1.490	0.227	1.507	1.396	0.873	1.646
Bus028	0.220	2.674	-14.194	14.444	2.876	-15.105	15.376	12.290	2.312	12.506	-13.852	5.759	15.002
Bus030	0.220	2.365	-12.490	12.712	2.521	-13.189	13.428	10.815	2.045	11.006	-12.169	4.942	13.134
Bus031	10.000	0.266	-1.722	1.742	0.217	-1.473	1.488	1.490	0.227	1.507	1.396	0.873	1.646
Bus034	0.220	2.684	-4.385	5.142	2.776	-4.451	5.246	3.798	2.324	4.453	-5.235	-0.065	5.236
Bus035	0.220	2.684	-4.385	5.142	2.776	-4.451	5.246	3.798	2.324	4.453	-5.235	-0.065	5.236
Tablero de Corriente 1	0.220	3.039	-14.860	15.167	2.964	-14.875	15.167	12.890	2.589	13.147	11.389	10.025	15.172
Tablero de Corriente 2	0.220	4.249	-18.016	18.510	3.843	-17.714	18.126	15.505	3.533	15.903	13.649	12.398	18.440

All fault currents are symmetrical (Red Equivalente del 1/2 ciclo) values in rms kA.

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.

6.5 Corriente de 1,5-4 Ciclos (Transitoria)

Es la corriente después de algunos ciclos, Asociado con la reactancia transitoria. Esto es más allá de cinco ciclos durante el cual el decaimiento de la corriente es más moderado.

Informe Resumen de Cortocircuito

1,5-4 ciclos - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL, y LLG

Tensión pre-falta = 100 % de la Tensión nominal de Barra

Barra		Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
ID	kV	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus01 Principal	60.000	2.668	-15.403	15.633	2.870	-18.647	18.866	13.064	2.301	13.265	11.771	14.731	18.857
Bus09	60.000	2.668	-15.403	15.633	2.870	-18.647	18.866	13.064	2.301	13.265	11.771	14.731	18.857
Bus010	10.000	1.105	-17.187	17.223	1.734	-17.540	17.625	13.872	1.029	13.910	-15.523	9.336	18.114
Bus011	0.360	2.580	-13.419	13.665	2.618	-13.525	13.776	11.597	2.230	11.810	-12.939	4.614	13.737
Bus013	60.000	2.668	-15.403	15.633	2.870	-18.647	18.866	13.064	2.301	13.265	11.771	14.731	18.857
Bus014	8.000	5.175	-23.841	24.397	3.391	-21.670	21.934	18.716	2.778	18.921	-22.040	8.580	23.651
Bus015	0.607	2.613	-14.952	15.178	2.602	-15.141	15.363	12.885	2.209	13.073	-14.267	5.518	15.297
Bus018	60.000	2.668	-15.403	15.633	2.870	-18.647	18.866	13.064	2.301	13.265	11.771	14.731	18.857
Bus019	10.000	0.250	-1.692	1.710	0.214	-1.465	1.481	1.477	0.221	1.493	1.384	0.857	1.627
Bus020	10.000	0.250	-1.692	1.710	0.214	-1.465	1.481	1.477	0.221	1.493	1.384	0.857	1.627
Bus021	10.000	0.250	-1.692	1.710	0.214	-1.465	1.481	1.477	0.221	1.493	1.384	0.857	1.627
Bus022	0.220	3.476	-16.912	17.265	3.590	-17.340	17.708	15.018	3.193	15.354	13.252	11.583	17.601
Bus023	10.000	0.250	-1.692	1.710	0.214	-1.465	1.481	1.477	0.221	1.493	1.384	0.857	1.627
Bus024	0.220	2.704	-14.094	14.351	2.849	-14.610	14.885	12.548	2.440	12.783	11.051	9.568	14.618
Bus025	10.000	0.250	-1.692	1.710	0.214	-1.465	1.481	1.477	0.221	1.493	1.384	0.857	1.627
Bus026	10.000	0.250	-1.692	1.710	0.214	-1.465	1.481	1.477	0.221	1.493	1.384	0.857	1.627
Bus028	0.220	2.647	-14.151	14.396	2.866	-15.088	15.358	12.271	2.300	12.485	-13.815	5.759	14.967
Bus030	0.220	2.343	-12.456	12.674	2.513	-13.176	13.414	10.800	2.035	10.990	-12.141	4.942	13.108
Bus031	10.000	0.250	-1.692	1.710	0.214	-1.465	1.481	1.477	0.221	1.493	1.384	0.857	1.627
Bus034	0.220	2.678	-4.384	5.137	2.774	-4.451	5.244	3.797	2.321	4.451	-5.232	-0.062	5.233
Bus035	0.220	2.678	-4.384	5.137	2.774	-4.451	5.244	3.797	2.321	4.451	-5.232	-0.062	5.233
Tablero de Corriente 1	0.220	2.704	-14.094	14.351	2.849	-14.610	14.885	12.548	2.440	12.783	11.051	9.568	14.618
Tablero de Corriente 2	0.220	3.476	-16.912	17.265	3.590	-17.340	17.708	15.018	3.193	15.354	13.252	11.583	17.601

All fault currents are symmetrical (Red Equivalente de 1,5-4 ciclos) values in rms kA.

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.

6.6 Corriente en Estado Estacionario o de Tiempo Retardado

Periodo de estado permanente o síncrono. Asociado con la reactancia síncrona, con una duración más allá de treinta ciclos y durante el cual la corriente de corto circuito permanece constante. Esto es, no existe decaimiento de la componente CA.

Informe Resumen de Cortocircuito

Corriente de Falta en Estado Estable (30 ciclos) - Trifásica, LG, LL y LLG

Tensión pre-falta = 100 % de la Tensión nominal de Barra

Barra		Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
ID	kV	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus01 Principal	60.000	2.643	-15.059	15.290	2.865	-18.465	18.686	12.909	2.289	13.110	11.539	14.512	18.540
Bus09	60.000	2.643	-15.059	15.290	2.865	-18.465	18.686	12.909	2.289	13.110	11.539	14.512	18.540
Bus010	10.000	1.077	-16.178	16.214	1.765	-17.028	17.119	13.473	1.016	13.511	-14.957	8.759	17.333
Bus011	0.360	2.573	-13.396	13.641	2.615	-13.517	13.768	11.587	2.227	11.799	-12.923	4.609	13.720
Bus013	60.000	2.643	-15.059	15.290	2.865	-18.465	18.686	12.909	2.289	13.110	11.539	14.512	18.540
Bus014	8.000	3.500	-19.818	20.125	3.089	-20.105	20.341	17.072	2.325	17.230	-19.281	7.728	20.772
Bus015	0.607	2.561	-14.807	15.027	2.585	-15.090	15.310	12.821	2.187	13.006	-14.163	5.498	15.193
Bus018	60.000	2.643	-15.059	15.290	2.865	-18.465	18.686	12.909	2.289	13.110	11.539	14.512	18.540
Bus019	10.000	0.227	-1.604	1.620	0.200	-1.414	1.428	1.389	0.197	1.403	1.300	0.829	1.542
Bus020	10.000	0.227	-1.604	1.620	0.200	-1.414	1.428	1.389	0.197	1.403	1.300	0.829	1.542
Bus021	10.000	0.227	-1.604	1.620	0.200	-1.414	1.428	1.389	0.197	1.403	1.300	0.829	1.542
Bus022	0.220	2.598	-14.011	14.250	2.821	-14.968	15.231	12.134	2.250	12.341	-13.676	5.782	14.848
Bus023	10.000	0.227	-1.604	1.620	0.200	-1.414	1.428	1.389	0.197	1.403	1.300	0.829	1.542
Bus024	0.220	2.305	-12.348	12.561	2.479	-13.085	13.317	10.693	1.997	10.878	-12.033	4.961	13.016
Bus025	10.000	0.227	-1.604	1.620	0.200	-1.414	1.428	1.389	0.197	1.403	1.300	0.829	1.542
Bus026	10.000	0.227	-1.604	1.620	0.200	-1.414	1.428	1.389	0.197	1.403	1.300	0.829	1.542
Bus028	0.220	2.598	-14.011	14.250	2.821	-14.968	15.231	12.134	2.250	12.341	-13.676	5.782	14.848
Bus030	0.220	2.305	-12.348	12.561	2.479	-13.085	13.317	10.693	1.997	10.878	-12.033	4.961	13.016
Bus031	10.000	0.227	-1.604	1.620	0.200	-1.414	1.428	1.389	0.197	1.403	1.300	0.829	1.542
Bus034	0.220	2.661	-4.374	5.120	2.761	-4.444	5.231	3.788	2.305	4.434	-5.221	-0.048	5.222
Bus035	0.220	2.661	-4.374	5.120	2.761	-4.444	5.231	3.788	2.305	4.434	-5.221	-0.048	5.222
Tablero de Corriente 1	0.220	2.305	-12.348	12.561	2.479	-13.085	13.317	10.693	1.997	10.878	-12.033	4.961	13.016
Tablero de Corriente 2	0.220	2.598	-14.011	14.250	2.821	-14.968	15.231	12.134	2.250	12.341	-13.676	5.782	14.848

All fault currents are symmetrical (Red de Estado Estable (30 ciclos)) values in rms kA.

* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.

6.7 Diagrama Unifilar Completo del Sistema

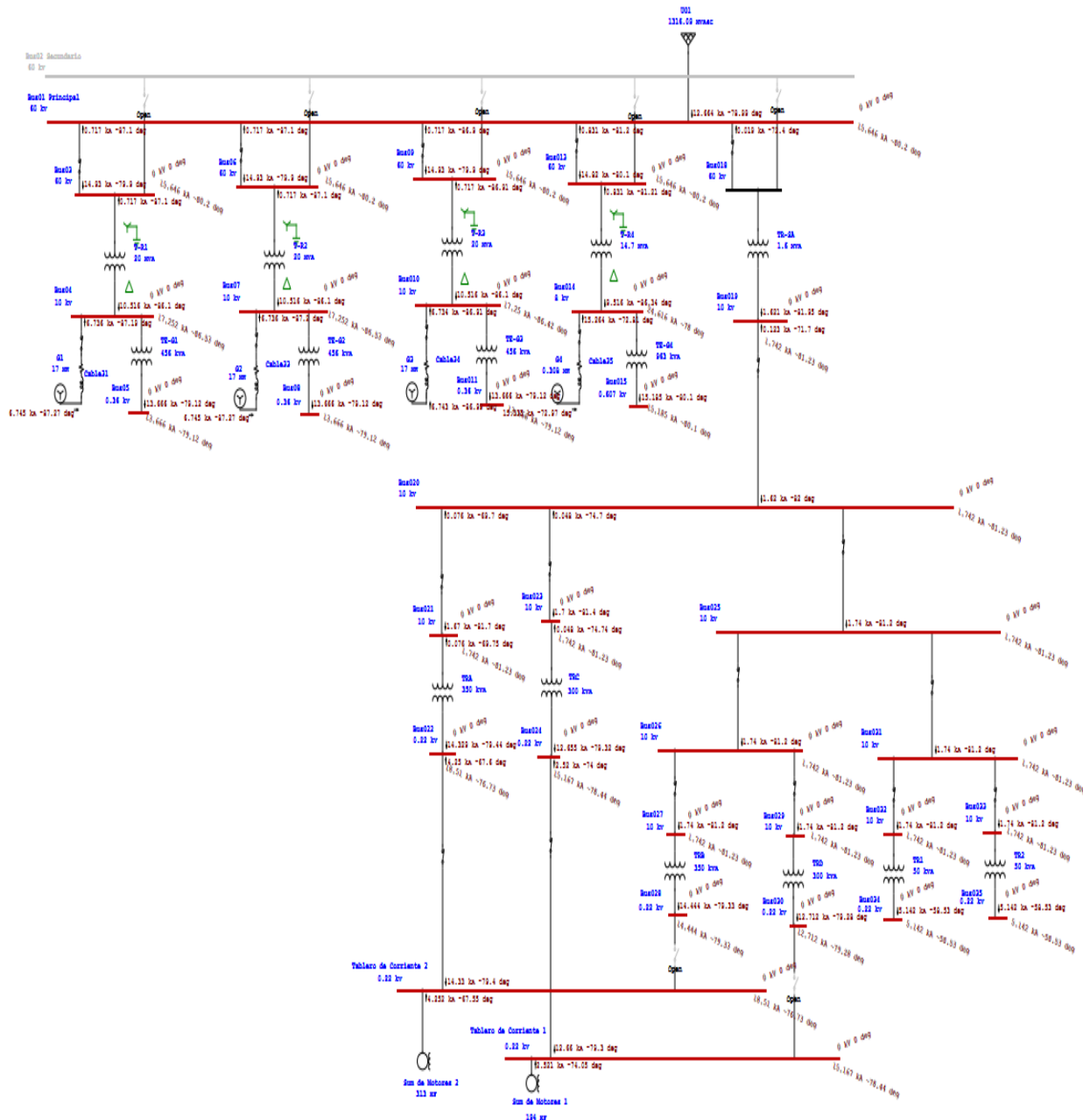


Figura 6.6. Imagen de diagrama unifilar en estándar ANSI.

ETAP muestra gráficamente en cada uno de los puntos que hemos puesto como “fallados” todas las aportaciones de corrientes de cada componente, su dirección y la suma total en cada punto.

Capítulo 7: Conclusiones

Durante el proceso de desarrollo e investigación de este trabajo de tesis comenzamos con un tema bastante amplio como lo es el estudio de cortocircuito, ya que con el vienen algunos otros temas de mucho interés, como el dimensionamiento de protecciones, diseños de mallas de tierras, excitación de generadores, etc. Se hace énfasis en la importancia de la segmentación específica de un solo tema a estudiar, desarrollar y tener conocimientos más enfocados que nos vayan sirviendo durante nuestra carrera profesional como Ingenieros Electricistas.

Este trabajo de tesis se enfocó en el estudio de cortocircuito mediante el uso de una herramienta computacional y en su importancia dentro de cualquier sistema eléctrico de gran magnitud, para lo que la introducción de herramientas computacionales que ayuden con el manejo de estas grandes cantidades de información ha sido indispensable para el ingeniero de diseño.

Se desarrolló el estudio para la central hidroeléctrica Callahuanca en el software ETAP, siendo esta central un sistema con generadores de gran tamaño, se presentan los 3 estados de interés en una falla, haciendo uso del estándar ANSI, y con ello sobresaltando las características más relevantes de esa herramienta computacional, así como algunas ventajas y desventajas del mismo.

Se trabajó con otra herramienta computacional, para con ello mostrar un contraste entre herramientas computacionales antes usadas, en este caso PSAF de CYME International, cumpliendo con el objetivo de observar las similitudes y avances de las nuevas generaciones de herramientas computacionales.

Concluimos que ETAP, es una herramienta que bien implementada nos ofrecerá una gran cantidad de información, tanto de diseño como resultados certeros, y esto lo pudimos comprobar con el desarrollo de un ejemplo mediante cálculos matemáticos a mano, lo cual también nos ayuda a reforzar nuestros conocimientos, para con ello dar interpretaciones confiables.

Se resaltan algunos de los factores que contribuyen al margen de error que pudiera existir entre resultados obtenidos mediante el software a implementar, y el método “a mano” usado.

Cada cual con sus ventajas y desventajas, es de absoluta relevancia tener conocimiento de ambos, ya que se puede apoyar tanto uno de otro para obtener finalmente resultados más certeros y confiables.

Mediante el método de las componentes simétricas podemos llegar al resultado más exacto de la corriente de cortocircuito, pero este incluye algunas desventajas, como que se requiere una base específica con la que se tiene que trabajar durante todo el proceso, considerablemente el número de cálculos nos puede llevar a cometer algún error durante el proceso, que si requerimos modificar el valor de algún componente bajo estudio, debemos comenzar el procedimiento de nuevo, el tiempo que nos lleve tomar práctica también podría tenerse bajo consideración, agregando que mientras el sistema se vuelve más robusto el manejo de grandes cantidades de información se puede tornar complicado. Ciertamente la principal ventaja de implementar métodos a manos, es la certidumbre de que los cálculos realizados son correctos.

El método es cómodo para resolver problemas con pocos nodos; sin embargo, cuando se trata de sistemas de mayor tamaño, resulta poco práctico. Por otra parte, para calcular un corto circuito en otra barra es necesario hacer de nuevo todas las reducciones. Cuando se trata de sistemas de gran magnitud, los cálculos manuales resultan demasiado tediosos y se debe recurrir al uso de las herramientas computacionales.

7.1 Retos considerables durante este trabajo de tesis.

1. Como primer punto, considerablemente el estudio de cortocircuito es un tema muy amplio, que abarca demasiados temas de los que se tiene que conocer la teoría básica, sus comportamientos y características de todo un sistema lleno de equipos interactuantes entre sí.
2. Por lo que se recurre a la segmentación de un tema en específico, y una vez mencionado que los sistemas suelen ir acompañados de muchas otras cuestiones, es fácil extraviarse por el camino y perder de vista el objetivo general. De allí, la importancia de la segmentación, y de atacar un tema y un objetivo particular.
3. La basta información, hablando de extraviarse en el camino. Podemos indagar en un mar de información, libros, investigaciones, internet. Uno de los principales retos fue encontrar información confiable y entendible. Todos aprendemos de diferentes maneras.
4. El acceso a ETAP. Para poder acceder a este software se tuvo que pagar un curso, y para poder acceder al curso, se tuvo que trabajar como práctica en PSAF de CyME, lo cual fue relativamente complicado, por el poco tiempo que lo usamos. Se diseñó la misma central hidroeléctrica, lo cual tardó aproximadamente dos semanas, siendo que en ETAP se realizó en menos de un día, lo que me lleva al siguiente reto.
5. Curso impartido por una persona de origen Austriaco, (3 días de inglés técnico suenan sencillos). Una vez terminado el curso y una vez terminado el diseño de Callahuanca, vienen las dificultades: Falta de conocimiento de normas, falta de datos de la central hidroeléctrica y sus componentes.

6. ETAP se vuelve amigable a medida que adquieres experiencia en él, como casi todo. Por lo que en términos generales, hablar de adversidades durante el comienzo de su uso no es posible.
7. Finalmente, la correcta interpretación de los resultados obtenidos, como se ha venido mencionando, es uno de los puntos más importantes y dependen del ingeniero a cargo. Personalmente el punto también más difícil, ya que se tienen que considerar todas las posibilidades, hay que recordar el comportamiento de los equipos, la teoría del cortocircuito, flujos de potencias, tipos de materiales, datos técnicos nominales. etcétera,

Por todo lo anterior y ya que el estudio requiere de la mayor precisión y cualquier factor es relevante, se puede considerar lo siguiente:

7.2 Recomendaciones generales:

- El ingeniero de diseño debe primeramente, tener los conocimientos teóricos que le vayan sirviendo durante el proceso de diseño, tal como el comportamiento de las fuentes contribuyentes.
- Identificar los valores correctos de fabricante de cada equipo, especificaciones y datos técnicos nominales.
- Tener identificados claramente cuáles son los resultados que desea obtener, específicamente, cual es el uso que se les pretende dar.
- Conocer las normas existentes, las normas bajo las que están contruidos los equipos y las normas implementadas en todo el sistema existente, de este modo se elegirá la más adecuada para el estudio.
- De ser posible, elegir un punto del sistema y realizar un breve cálculo matemático, para comparar y comprobar resultados.

Trabajos citados

Bojórquez, V. J. (2007). *Estudio comparativo de las normas IEC y ANSI para el cálculo de cortocircuito*. México: Escuela superior de Ingeniería mecánica.

González, G. G. (2010). *Análisis de cortocircuito a sistemas eléctricos*. México, D.F.: IPN.

Hydro, A. (2014). *Memoria de cálculo de estudio de corto circuito de la central hidro electrica Carlos Fonseca*. Morelia, Mich.: Andritz Hydro.

J.R. Seiver, J. P. (1999). *Short circuit calculations: The easy way*. U.S.A.: Ec & M Books.

Martinez, T. P. (1998). *Análisis de la corriente de cortocircuito en el sistema eléctrico*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.

Metz-Noblat, B. d. (2000). *Reproducción del uaderno técnico n° 158 Calculo de corrientes de cortocircuito*. España: Scheneider electric.

Quesada, J. C. (2014). *Estudio de cortocircuito y coordinación de protecciones en CVG ALUNASA*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingenieria eléctrica .