

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



## **MÉTODOS UTILIZADOS PARA REDUCIR LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITOS EN LA SUBESTACIÓN TOROMOCHO 220 / 23kV**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR :**

**CARLOS ALONZO CUEVA GALLEGOS**

**PROMOCIÓN**

**1985 - I**

**LIMA, PERÚ**

**2013**

**MÉTODOS UTILIZADOS PARA REDUCIR LOS NIVELES  
DE CORTOCIRCUITOS EN LA SUBESTACIÓN  
TOROMOCHO 220 / 23kV**

## **DEDICATORIA**

A DIOS  
A MIS PADRES CARLOS Y ROSA  
A MI ESPOSA CECILIA  
A MIS HIJOS RENATO Y SAMANTHA  
A MIS HERMANOS ALECO (†) Y CLAUDIA

**Gracias**

## SUMARIO

El presente trabajo describe la aplicación de las técnicas utilizadas para limitar las Corrientes de falla o de cortocircuito en la Subestación Principal del Proyecto Minero Toromocho de 220 / 23kV. Luego de una revisión de los métodos disponibles, se determinó aplicar: primero, el aumento de la impedancia de cortocircuito de los transformadores de potencia, y en segundo lugar, utilizar los limitadores de corriente de falla.

Los cálculos computacionales muestran la efectividad de estas técnicas en reducir los niveles de cortocircuito en la barra de 23kV. Estos resultados muestran que los niveles de cortocircuito pueden reducirse a niveles que pueden ser manejados por los equipos eléctricos de la subestación, específicamente, por los interruptores de potencia. El aumento de la impedancia de cortocircuito de los transformadores se considera una solución a muy corto plazo, a ser considerada al momento de la fabricación de los transformadores de potencias por la empresa ABB. El empleo de los Limitadores de Corriente de Falla, es una solución más permanente que permite limitar los niveles de cortocircuito, considerando, inclusive, la futura expansión del Proyecto Minero Toromocho.

## INDICE

<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>REVISIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN MEDIA Y ALTA TENSIÓN</b>	
<b>DEL PROYECTO TOROMOCHO .....</b>	<b>3</b>
1.1. Breve Descripción del Proyecto Toromocho .....	3
1.1.1. Ubicación .....	3
1.1.2. Características del Proyecto.....	3
1.2. Descripción del Sistema Eléctrico del Proyecto Toromocho .....	3
1.2.1. Características Principales .....	4
1.3. Estudio de Cargas .....	5
1.3.1. Escenarios .....	5
1.3.2. Estimación de las Cargas Eléctricas para la Etapa Inicial.....	7
1.3.3. Requerimientos de Energía Reactiva para la Etapa Inicial.....	7
1.3.4. Estimación de las Cargas Eléctricas para la Ampliación Futura.....	8
1.3.5. Dimensionamiento de los Transformadores Principales de Potencia 220 kV / 23 kV .....	8
1.3.6. Cargas de Emergencia .....	10
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA RELACIONADO CON LOS ALTOS NIVELES</b>	
<b>DE CORTOCIRCUITO EN LA SUBESTACIÓN TOROMOCHO 220 / 23 kV.....</b>	<b>11</b>
2.1. Estudio de Cortocircuito .....	11
2.1.1. Criterio de Cálculo .....	11
2.1.2. Niveles de Cortocircuito .....	13
2.1.3. Diagrama Unifilar en Alta Tensión .....	14
2.2. Problema relacionado con los altos niveles de cortocircuito .....	14
<b>CAPITULO III</b>	
<b>DESCRIPCIÓN Y REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DISPONIBLES PARA</b>	
<b>LA LIMITACIÓN DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITO.....</b>	<b>17</b>
3.1. Cambio de Topología .....	18
3.1.1. División de Barras .....	18

3.1.2.	División del Sistema en Sub-Redes .....	19
3.2.	Aumento de la capacidad de los Interruptores de Potencia .....	19
3.3.	Uso de Transformadores con Altas Impedancia .....	19
3.4.	Uso de reactores limitadores en serie .....	20
3.5.	Uso de limitadores de corriente de falla .....	22
3.5.1.	Características de limitación de corriente .....	22
3.5.2.	Limitadores de corrientes de falla (FCL).....	23
3.5.3.	Forma Constructiva .....	25
3.5.4.	Principio de operación .....	26
3.5.5.	Características de disparo .....	28
3.5.6.	Cálculo de los Valores de Disparo del Limitador de Corriente de Falla .....	32
3.5.7.	Cálculo de los valores de configuración de un Limitador de Corriente de Falla como dispositivo de medición y disparo .....	35
3.5.8.	Aplicación de los Limitadores de Corriente en Sistemas Eléctricos de Potencia .....	38

#### **CAPÍTULO IV**

#### **EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIONES PARA LIMITAR EL NIVEL DE CORTOCIRCUITOS EN LASUBESTACIÓN PRINCIPAL TOROMOCHO**

<b>220 / 23 kV.....</b>	<b>43</b>	
4.1.	Aumento de la Impedancia de Transformadores de Potencia 220 / 23kV .....	43
4.1.1.	Impedancia del Transformador .....	43
4.1.2.	Transformadores Principales de Potencia 220 / 23 kV e Interruptores de Subestación Principal en 23 kV.....	44
4.1.3.	Transformadores de Distribución e Interruptores Acopladores.....	44
4.1.4.	Escenario de Operación de la Planta.....	44
4.1.5.	Impedancias de los Cables y Líneas Aéreas .....	44
4.1.6.	Contribución de los Motores y Cargas.....	45
4.2.	Uso de Limitadores de Corriente de Falla en Barra 23 kV .....	47
4.2.1.	General .....	47
4.2.2.	Nivel de Cortocircuito (Subestación Pomacocha ) y Líneas Aéreas 220kV .....	47
4.2.3.	Transformadores Principales de Potencia 220 / 23 kV e Interruptores de Subestación Principal en 23kV .....	48
4.2.4.	Transformadores de Distribución e Interruptores Acopladores.....	48
4.2.5.	Escenario de Operación de la Planta .....	48
4.2.6.	Casos de Estudio .....	48
4.2.7.	Resultados del Estudio de Cortocircuito con el FCL .....	49

4.3.	Estudio de la Corriente Mínima de Corto Circuito. ....	49
4.4.	Estudio de la Corriente Máxima de Corto Circuito. ....	53
4.5.	Corriente Máxima de Corto Circuito Trifásica por Nivel de Tensión .....	56
4.6.	Características del Limitador de Corriente de Falla .....	57
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>63</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>65</b>
	ANEXO A: Hojas de Datos delimitador de Corriente FCL o IS Limiter .....	65
	ANEXO B: Reporte de Cálculos de Corriente de Cortocircuit Mínimo con ETAP	
	Reporte de Cálculos de Corriente de Cortocircuito Máximo con ETAP .....	67
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>81</b>

## INTRODUCCIÓN

### **a) Antecedentes**

El continuo crecimiento de la demanda de electricidad ha conducido a mejorar los sistemas de transmisión, para poder aumentar la capacidad de transferencia de energía. Esto se traduce en la necesidad de una mayor capacidad para manejar las corrientes de falla, cada vez más altas.

Sistemas interconectados con más rutas paralelas presentan impedancias en la fuente reducidas y, un incremento en el número de fuentes que contribuyen a las corrientes de falla. Para evitar daños o mal funcionamiento de los activos del sistema y para aumentar la confiabilidad, es fundamental gestionar adecuadamente el aumento de las corrientes de falla. Las altas corrientes de falla producen fuerzas mecánicas y efectos térmicos que pueden dañar o destruir el equipo de la subestación, interruptores automáticos, redes de puesta a tierra, las líneas de transmisión y a los transformadores. Los sistemas de protección y control también pueden ser seriamente afectados por estas altas corrientes. La sustitución de los equipos de potencia existentes por equipos nuevos con una mayor resistencia a cortocircuitos, a menudo es técnicamente imposible o antieconómico para los usuarios

Varios métodos y tecnologías para la limitación de la corriente de falla se discuten en este trabajo. Estos métodos incluyen la modificación de la topología con la partición de las redes en puntos estratégicos, la división de barras, la introducción de mayores niveles de tensión, el uso de transformadores con mayor impedancia de cortocircuito, instalando reactores limitadores de corriente de falla y el uso de fusibles limitadores. Estas tecnologías incluyen técnicas convencionales de estado sólido y de superconductores.

### **b) Objetivo**

Determinar una alternativa para limitar la corriente de cortocircuito en las barras de 23kV de la Subestación Toromocho de propiedad de Minera Chinalco Perú S.A. con el fin de que esta y el sistema de distribución asociado puedan operar con los niveles de seguridad requeridos

### **c) Alcance**

El presente trabajo presenta los estudios de simulación y las aplicaciones de técnicas convencionales en la Subestación Principal del Proyecto Toromocho de 220/23kV., a

fin de dar solución a los problemas de altos niveles de cortocircuito presentes en el sistema.

En este trabajo se discute en detalle los métodos disponibles para la limitación de los niveles de cortocircuito, mencionando su aplicabilidad y sus posibles ventajas y desventajas.

#### **d) Desarrollo del Trabajo**

En el Capítulo I se presenta una descripción de la características de Sistema Eléctrico en Alta y Media Tensión del Proyecto Toromocho, lo que incluye la estimación de cargas, el dimensionamiento de los transformadores de potencia 220/23kV .

En el Capítulo II se hace una presentación del problema presentado en las barras de 23 kV de la Subestación Toromocho, con valores de corriente de cortocircuito que superan los 40kA, que son los valores máximos que pueden manejar los interruptores de potencia asociados, en forma segura y sin comprometer la integridad de las instalaciones respectivas.

En el Capítulo III se revisan los métodos disponibles para la limitación de los niveles de cortocircuito, que van desde los métodos pasivos como el cambio de tipología o aumenta de la impedancia de transformadores hasta los métodos activos como el uso de reactores limitadores y de los limitadores de corriente de falla, también conocidos como FCL o IS-limiters.

En el Capítulo IV se presentan los cálculos de las corrientes de cortocircuito en la barra de la subestación con la ayuda del programa computacional ETAP, para las soluciones propuestas con magnitudes de corriente que pueden ser manejadas con los equipos en la barra de 23 kV.

Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

# CAPÍTULO I

## REVISIÓN DE SISTEMA ELÉCTRICO EN ALTA Y MEDIA TENSIÓN DEL PROYECTO TOROMOCHO

### **1.1 Breve Descripción del Proyecto Toromocho**

#### **1.1.1 Ubicación**

El proyecto Toromocho consiste en una mina de tajo abierto con reservas de cobre y molibdeno, localizada en la parte central de los Andes del Perú; en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín, aproximadamente a 160 km al este de Lima, a una altitud que varía entre los 4 300 y 4 550 msnm.

#### **1.1.2 Características del Proyecto**

El titular del Proyecto Toromocho (el Proyecto) es Minera Chinalco Perú S.A. (Chinalco), de propiedad de Aluminium Corporation of China.

Las exploraciones geológicas y el planeamiento de mina han determinado que el depósito Toromocho contiene una reserva de 1 526 millones de toneladas de mineral con una ley promedio de cobre de 0,48%, una ley promedio de molibdeno de 0,019% y una ley promedio de plata de 6,88 gramos por tonelada, basado en una ley de corte de aproximadamente 0,37% de cobre.

El Proyecto prevé 32 años de operaciones de minado, durante los cuales también se realizará la producción de concentrado y almacenamiento de mineral de baja ley. Posteriormente, por un período adicional de 4 años, las operaciones estarán dirigidas al aprovechamiento del mineral de baja ley almacenado durante los primeros 32 años, sumando en total 36 años de operación propuesta para el Proyecto. El plan de operaciones del Proyecto contempla la extracción mineral de una mina a tajo abierto utilizando métodos convencionales de explotación, usando palas y camiones para el transporte del mineral y/o desmonte.

El mineral a procesar será trasladado mediante volquetes hacia la chancadora primaria, ubicada al sur del tajo para posteriormente ser trasladado mediante fajas transportadoras hacia la planta concentradora, la cual estarán ubicada a 6 km del área de operaciones de mina. La capacidad de procesamiento de la planta concentradora será de aproximadamente 117 200 tpd.

### **1.2 Descripción del Sistema Eléctrico del Proyecto Toromocho**

### 1.2.1 Características Principales

El sistema eléctrico del Proyecto Toromocho presenta las siguientes características:

Tensión nominal entre fases :	220 kV
Máxima tensión del sistema	242 kV
Factor de potencia	0,95
Frecuencia	60 Hz

Con la finalidad de suministrar energía al Proyecto Toromocho, se ha contemplado una infraestructura eléctrica que consiste en la instalación de la Línea de Transmisión Eléctrica en 220 kV, de doble circuito, que recibirá la electricidad proveniente del sistema eléctrico interconectado nacional (SEIN), efectuándose el empalme en la S.E. Pomacocha existente hasta la S.E. Toromocho futura.

La Línea de Transmisión Eléctrica en 220 kV S.E. Pomacocha - S.E. Toromocho, presenta las siguientes características:

Nivel de tensión	:	220 kV
Numero de circuitos	:	Dos (02)
Sistema	:	Trifásico
Tipo de estructuras	:	Metálicas de acero en celosía
Conductor	:	683,4 mm <sup>2</sup> , AAAC
Cable de guarda	:	Conformado por 2 tipos de conductor: Cable de acero tipo EHS 3/8 h. OPGW HexaCore Optical Ground Wire 140,75 mm <sup>2</sup> (según la especificación DNO-8295; AFL Telecommunications LLC)
Longitud	:	9,20 km
Estructuras	:	Torres de celosía autosoportadas Metálicas galvanizadas.
Aisladores	:	Vidrio templado o porcelana estándar
Herrajes	:	Acero forjado galvanizado en caliente
Puesta a Tierra	:	Conductor Copperweld 2 AWG Jabalinas Copperweld 16mm <sup>2</sup> x 3,0
Capacidad de transmisión	:	250 MVA por circuito
Subestación de salida	:	S.E. Pomacocha (4 340 msnm)

Subestación de llegada

S.E. Toromocho (4 553 msnm)

A continuación se presenta una breve referencia de las subestaciones mencionadas,

#### **a) Subestación Toromocho**

La Subestación Toromocho 220/23 kV que alimentará a la Línea de Distribución 23 kV Toromocho – Kingsmill es una nueva subestación que se conectará al Sistema Interconectado Nacional en la Subestación Pomacocha con una línea de doble circuito 220 kV. Esta nueva subestación forma parte del Complejo Toromocho.

La Subestación Toromocho tendrá un Patio 220 kV, tres Transformadores de Potencia 220/23 kV y una Sala 23 kV. En el Patio 220 kV se instalarán los equipos al exterior en un esquema de maniobra de simple barra.

Los Transformadores 220/23 kV serán de 70/100/110 MVA con un sistema de refrigeración natural y forzada en dos etapas ONAN/ONAF1/ONAF2. Estos equipos serán instalados al exterior al lado del Patio 220 kV. Los transformadores serán conectados a la Sala 23 kV mediante cables de energía 25 kV (cuatro cables en paralelo por fase) instalados sobre bandejas.

La Sala 23 kV servirá para instalar las celdas en SF<sub>6</sub>, denominadas tipo GIS. Todos los circuitos tendrán un relé digital multifunción y un interruptor para maniobra y protección.

#### **b) Subestación Pomacocha**

La subestación Pomacocha 220 kV, actualmente es un patio de maniobras que está conformado por un sistema de cinco líneas bajo una configuración tipo “H” a 220 kV. La subestación cuenta con una sala de control, sala de bastidores de relés, sala de servicios auxiliares y sala de baterías.

Las celdas de línea están equipadas con un sistema de protección redundante, con dos relés multifunción de tecnología numérica. Todas las protecciones se encuentran integradas.

### **1.3 Estudio de cargas**

El propósito del estudio de carga fue determinar el funcionamiento en estado estacionario del sistema de distribución eléctrica del Proyecto Toromocho.

El estudio de flujo de carga calculó las tensiones en barra y las caídas de tensión, los factores de carga por ramal y los flujos de energía en todo el sistema eléctrico.

También se calcularon las pérdidas reales y de potencia reactiva en cada rama y el total de las pérdidas del sistema de alimentación.

#### **1.3.1 Escenarios**

Los cálculos de la carga eléctrica de estudio se realizaron para el caso base, que incluye la Etapa Inicial y Etapa Ampliación Futura.

**Etapa Inicial:**

- La Planta trabajara a un nivel de procesamiento de 117 200 tpd.
- Las principales cargas del Proyecto serán:
  - 01 Molino SAG
  - 02 Molinos de Bolas
  - 03 Palas
  - 03 Perforadoras.
  - 12 Bombas de desplazamiento positivo operando a máxima capacidad.
- El molino SAG contará con un motor con una potencia de placa de 28.000 kW, un factor de servicio de 1,00 y un factor de potencia aproximada de 73%. Los 2 molinos de bolas tendrán cada uno motores con una potencia de placa de 22.000 kW, un factor de servicio de 1,00 y un factor de potencia aproximada de 73%. El estudio de carga consideró a un factor pico y factor de funcionamiento de 1,0 y 0, 95 para los molinos de bola y molino SAG, respectivamente.
- Otras cargas importantes del Proyecto en la Etapa Inicial, son las Palas Eléctricas con una potencia de placa de 3.450 kW, un factor de servicio de 1,00 y un factor de potencia de 95%. Las Perforadoras con una potencia de placa de 1.044 kW, un factor de servicio de 1,00 y un factor de potencia de 95%. Las Bombas de desplazamiento vertical con una potencia de placa de 3.000 kW, un factor de servicio de 1,00 y un factor de potencia de 86%.
- El diseño y operación de la planta esta dividida en dos fases:
  - Fase I - Años 1 al 7 de la planta.
    - La planta opera con 2 palas y 2 perforadoras.
    - 10 bombas de desplazamiento positivo, operando a capacidad reducida.
  - Fase II – Años 8 al 15 de la planta.
    - La planta opera con 3 palas y 3 perforadoras.
    - 12 bombas de desplazamiento dispositivo operando a la máxima capacidad.

#### **Etapa Ampliación Futura:**

- La Planta incrementará a futuro su nivel de procesamiento de 117 200 tpd. A 150 000 tpd
- Las principales cargas del Proyecto estarán dentro del área de procesamiento de mineral y serán:
  - 01 Molino SAG
  - 02 Molinos de Bolas
  - 01 Línea de Celdas de Flotación

- Las Dimensiones y Potencias de los Molinos y Celdas de Flotación no han sido determinados en exactitud, ya que ello se realizará mediante el estudio de Ingeniería Básica, cuando se apruebe la expansión de la Planta. Sin embargo, se ha estimado un aumento de la carga en 25 % de la Potencia instalada en la Etapa Inicial.

### 1.3.2 Estimación de las Cargas Eléctricas para la Etapa Inicial

La Tabla N° 1.1 resume la estimación de la carga eléctrica, sin considerar la compensación del factor de potencia.

**TABLA N° 1.1** Estimación de la Carga Eléctrica sin Compensación del factor de potencia para Etapa Inicial

Tipo de Carga	MW	MVAR	MVA	Factor de Potencia (@ 220kV)
Instalada	257	170	303	83%
Conectada	236	158	278	82%
Demanda Máxima	178	169	245	72%
Demanda Promedio	159	153	221	72%

De la información indicada en la Tabla N° 1.1, se pueden calcular los siguientes factores de carga para todo el proyecto:

- Factor de Demanda Promedio = Demanda Promedio MW / Potencia Conectada MW  
= 67 %
- Factor de Carga = Demanda Promedio MW / Demanda Máxima MW  
= 89 %
- Factor de Demanda = Demanda Máxima MW / Potencia Conectada  
= 75 %

La Tabla N° 1.2 resume la estimación de la carga eléctrica teniendo en cuenta 110 MVAR de compensación del factor de potencia.

### 1.3.3 Requerimientos de Energía Reactiva para la Etapa Inicial

La planta cuenta con un factor de potencia de 0,72 tanto para el régimen de funcionamiento diurno como nocturno.

La planta debe tener un factor de potencia 0,95 en el punto de acoplamiento con el sistema para cumplir con los requisitos de las COES. Por eso es necesaria la instalación de bancos de condensadores para la corrección del factor de potencia para alcanzar este valor.

Un valor mínimo de 110 MVAR es requerido para alcanzar el factor de potencia de 0,95 en retraso. Este es el valor necesario para el peor de los casos, que corresponde a demanda máxima. El diseño final y dimensionamiento de las baterías de condensadores son determinados con el estudio de flujo de carga y de corrección de factor de potencia.

**TABLA N° 1.2** Estimación de la Carga Eléctrica con Compensación del factor de Potencia de 110 MVAR

<b>Tipo de Carga</b>	<b>MW</b>	<b>MVAR</b>	<b>MVA</b>	<b>Factor de Potencia (@ 220kV)</b>
Instalada	257	60	258	97%
Conectada	236	48	234	98%
Demanda Máxima	178	59	187	95%
Demanda Promedio	159	43	165	95%

#### **1.3.4 Estimación de las Cargas Eléctricas para la Etapa Ampliación Futura**

Teniendo en cuenta que se estima un incremento de 25 % de la carga total considerada en la Etapa I.

Es decir, la Demanda Máxima sería de aproximadamente 215 MW.

#### **1.3.5 Dimensionamiento de los Transformadores Principales de Potencia 220 / 23 kV**

Para suplir los requerimientos de energía eléctrica del proyecto, se ha considerado un esquema de tres (3) 220 kV -23 kV transformadores principales de potencia para la Etapa Inicial. Este diseño proporciona una redundancia y flexibilidad para los transformadores de alimentación principal. Para una futura expansión del Proyecto Toromocho se considera la adición de un cuarto transformador principal 220 kV - 23 kV.

Los transformadores principales de potencia 220 kV- 23 kV se dimensionaron de acuerdo con los criterios siguientes:

- Los dimensionamientos de capacidades se basaron en las estimaciones de carga eléctrica para el caso base y se tuvo en cuenta la compensación de energía reactiva.
- Los tres transformadores deberían ser de la misma capacidad nominal.
- Operación con dos transformadores tipo ONAN / ONAF, capaces de abastecer las necesidades de energía del proyecto con 50% de la carga de la planta en cada unidad.

- El dimensionamiento ONAN de cada transformador debería ser suficiente para manejar el 33% de la carga de máxima demanda del proyecto.
- El dimensionamiento ONAF de cada transformador debería ser suficiente para manejar el 50% de la carga máxima demanda del proyecto.

Utilizando los criterios anteriores descritos, los transformadores fueron luego dimensionados de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Transformador ONAN MVA} &= \text{Máxima Demanda MVA} / 3 = 187/3 \\ &= 62 \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Transformador ONAF MVA} &= \text{Máxima Demanda MVA} / 2 = 187/2 \\ &= 94 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Aplicando lo indicado en la Tabla N° 1.3 de capacidades nominales preferidas de transformadores de acuerdo a IEEE / ANSI CS57.12.00, los tres transformadores principales de potencia 220-23 kV serían de una potencia nominal de 75/100/110 MVA, OA / FA (55 ° C) / FA (65 ° C) con las tres unidades por lo general trabajarían en OA (55 ° C) con el escenario de que son capaces de alimentar la carga completa de la planta y un 17% de capacidad adicional de reserva para futuras expansiones menores.

**TABLA N° 1.3** Potencia Nominales Preferidas para Transformadores según IEEE /ANSI C57.12.00

<b>Transformadores Monofásicos</b>	<b>Transformadores Trifásicos</b>
<b>(KVA)</b>	<b>(KVA)</b>
5	15
10	30
15	45
25	75
37.5	112.5
50	150
75	225
100	300
167	500
250	750
333	1000
500	1500
833	2500
1250	3750
1667	5000
2500	7500
3333	10000
-	12000

5000	15000
6667	20000
8333	25000
10000	30000
12500	37500
16667	50000
20000	60000
25000	75000
33333	100000

Para la Etapa de Futura Ampliación se ha considerado la instalación de un cuarto transformador con una potencia nominal de 75/100/110 MVA, OA / FA (55 ° C) / FA (65 ° C).

### **1.3.6 Cargas de Emergencia**

Teniendo en cuenta la lista de carga de emergencia, el requisito de potencia de las cargas de emergencia es de 3,2 MW.

Para fines del presente trabajo se va considerar la configuración y cargas correspondientes a la Etapa Inicial del Proyecto Toromocho. Es muy posible que los resultados del presente análisis serán de mucha utilidad, para cuando se efectúe una futura ampliación

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA RELACIONADO CON LOS ALTOS NIVELES DE CORTOCIRCUITOS EN LA SUBESTACIÓN TOROMOCHO 220 / 23kV

#### 2.1 Estudio de Cortocircuito

El propósito del estudio de cortocircuito ha sido determinar la magnitud de la corriente disponible en varios puntos seleccionados del sistema de distribución eléctrica del Proyecto Toromocho, en caso de que se produzcan fallas.

El estudio se basa el método de cálculo de corto circuito según la norma IEC y se realizó tanto para los valores máximo y mínimo de cortocircuito disponibles en el sistema. Esto nos da dos diferentes umbrales de los valores de corto circuito, que pueden ser utilizados para definir la calibración de los dispositivos de protección y para las clasificaciones de equipos eléctricos, así como proporcionar una base para otros cálculos tales como flujo de carga y análisis de caída de tensión.

En primer lugar, se analiza la condición de cortocircuito trifásico, ya que este tipo de falla produce el valor de corriente más alta, por lo tanto, nos proporciona el peor escenario posible para cada caso.

En segundo lugar, se asume una condición de falla a tierra, que proporciona una base para los cálculos de conexión a tierra y el diseño del sistema de puesta a tierra.

El estudio de corto circuito nos da la información necesaria para determinar si los interruptores y fusibles serán capaces de interrumpir un falla (rangos de sobre corriente), así como los medios para determinar si los tramos de la barra entre la conmutación y los centros de control de motores se han diseñado adecuada para resistir las fuerzas generadas a partir de las corrientes de falla.

Además, este tipo de estudio indica las corrientes máximas y mínimas de corto circuito disponibles para asegurar el funcionamiento y la coordinación de los dispositivos de protección eléctrica.

##### 2.1.1 Criterio de Cálculo

**a. Método :** El sistema eléctrico completo se modeló mediante el software ETAP, la versión 5.5.6, y los resultados se obtuvieron mediante la ejecución del Módulo de Análisis de Corto Circuito.

Los parámetros de evaluación de ETAP utilizados son los siguientes:

- El método de cálculo de cortocircuito basado en IEC.
- Una fuente de tensión equivalente en la ubicación de la falla que sustituye a todas las fuentes de tensión.

Un factor de tensión,  $c$  se aplica para ajustar el valor de la fuente de voltaje equivalente para ambos cálculos de corriente mínimos y máximos, de la manera indicada en la Tabla N° 2.1.

**TABLA N° 2.1:** Determinación del factor de tensión  $c$

Tensión Nominal	Factor $c$
<1001 V	1.0
1001 a 35000 V	1.0
>35000 V	1.0

#### **Corriente corto circuito simétrica inicial SC, $I''^k$**

Este es el valor eficaz de la componente alterna simétrica de una corriente de cortocircuito disponible en el instante en que el cortocircuito se produce, si la impedancia se mantiene en un valor de tiempo cero.

#### **Corriente de corto circuito Pico SC, $I_p$**

Este es el valor máximo posible instantáneo de la corriente de cortocircuito disponible.

#### **Corriente de corto circuito Estado Estacionario SC, $I_k$**

Este es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito que se mantiene después de la declinación de los transitorios.

Todas las máquinas están representadas por sus impedancias internas.

- Método de cálculo C (Frecuencia Equivalente) para determinar  $X / R$  para el pico kA  
El valor del factor  $k$  se calcula utilizando una frecuencia de alterada  $R / X$ . este valor  $R / X$  se calcula a una frecuencia más baja y luego se multiplica por un factor dependiente de la frecuencia.
- Contribución del motor basado en la carga categorizada de acuerdo al modo de operación seleccionado.
- Se han incluido las Impedancia de los cables en MT y BT.
- Ajuste de los kV base para el tap del transformador.
- Tensiones de base de los barras se calculan utilizando las relaciones de transformación a su vez, que incluyen los valores nominales de kVs de los transformadores, así como los ajustes de los taps.
- Valor  $C_{max} = 1.05$   
(+6.0% V Tolerancia)

Este es el valor utilizado para el cálculo de factores de corrección de impedancia, K para sistemas con tolerancia de voltaje 6%.

- Dispositivos de protección basados en la máxima corriente de cortocircuito.

### 2.1.2 Niveles de Cortocircuito

Los siguientes son los datos de cortocircuito disponibles para la subestación Pomacocha, a partir de la cual, la subestación de Toromocho recibe su alimentación de energía a través de un línea de transmisión en 220kV simple / doble circuito.

#### a) Máxima Corriente de Corto Circuito Disponible

**TABLA N° 2.2: Máxima Corriente de Cortocircuito**

	$MVA_{sc}$	X/R	$kA_{sc}$
Trifásico	5219	9.37	13.695
Monofásico	1312	9.37	10.326

Impedancia de cortocircuito correspondiente, calculada con ETAP con un valor base de 100 MVA:

**TABLA N° 2.3: Impedancia de Corto Circuito**

	% R	% X
<b>Positiva</b>	0.203	1.91
<b>Negativa</b>	0.203	1.91
<b>Cero</b>	0.402	3.77

#### b) Mínima Corriente de Corto Circuito Disponible

**TABLA N° 2.4: Mínima Corriente de Cortocircuito**

	$MVA_{sc}$	X/R	$kA_{sc}$
<b>Trifásico</b>	3895	9.872	10.221
<b>Monofásico</b>	977	9.872	7.689

Impedancia de cortocircuito correspondiente, calculada con ETAP con un valor base de 100 MVA:

**TABLA N° 2.5: Impedancia de Cortocircuito**

	% R	% X
<b>Positiva</b>	0.259	2.55
<b>Negativa</b>	0.259	2.55
<b>Cero</b>	0.514	5.08

Estos datos han sido proporcionados por Minera Chinalco Perú (MCP), y se basan en los estudios realizados por EDP, y considera la implementación de cambios a futuro y la expansión del sistema al año 2020.

### 2.1.3 Diagrama Unifilar del Sistema en Alta Tensión

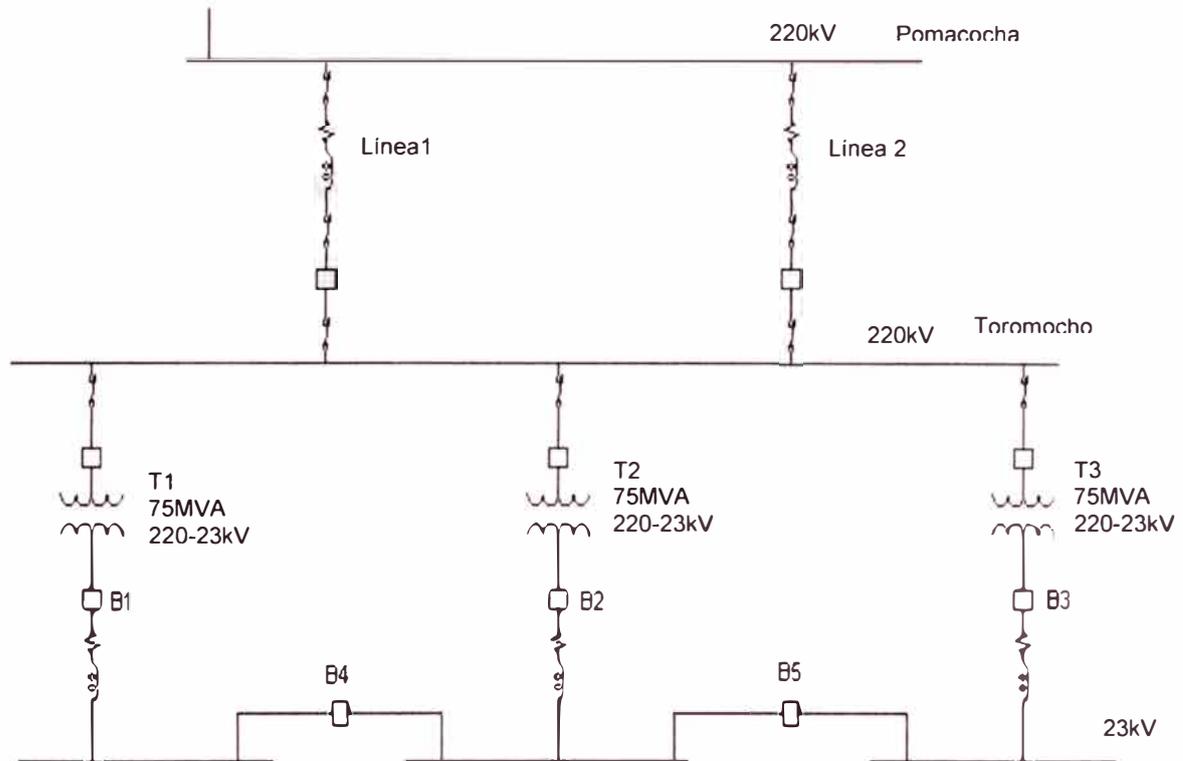


Fig. 2.1 Diagrama Unifilar Proyecto Toromocho en Alta Tensión

## 2.2 Descripción del Problema relacionado con altos niveles de Cortocircuitos en la Subestación Toromocho 220 / 23kV

Al momento de los cálculos iniciales de los Niveles de Circuito se han observado niveles de cortocircuito muy elevados para la barra de 23kV, los cuáles superan los valores de 40kA que es la máxima corriente de interrupción que pueden manejar los interruptores de potencia.

En este caso hemos considerado el siguiente escenario:

Se considera que la reactancia de estos transformadores es de un valor convencional

$$X = 8\%$$

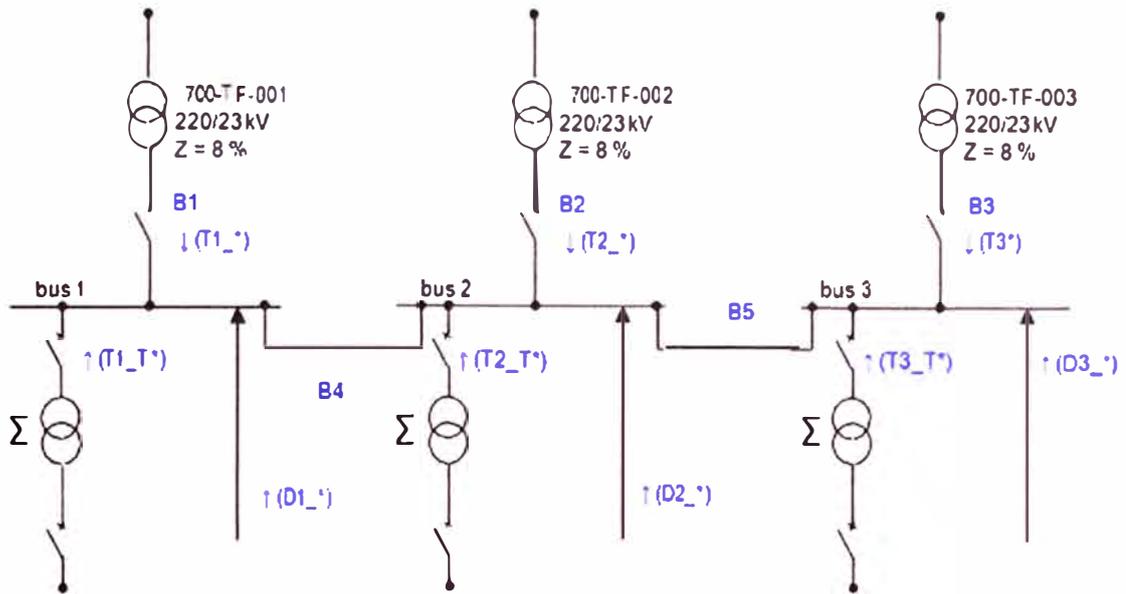
La figura 2.2 muestra el esquema simplificado unifilar del "Proyecto Toromocho"

Donde:

$Tx\_*$  = Corriente de Falla contribuida por el transformador 700-TF-00x

$Tx\ T^*$  = Sumatoria de Corrientes de Falla contribuidas a través de los transformadores conectados aguas abajo del sistema

$Dx_{*}$  = Sumatoria de Corrientes de Falla contribuidas por todos las cargas ubicadas aguas abajo del sistema  
 $Bx$  = Interruptor de llegada o de acoplamiento



**Fig.2.2** Diagrama Unifilar Simplificado del Proyecto Toromocho

Las diferentes condiciones de falla y por lo tanto la contribución de cada parte del sistema se toman del Estudio de Corto Circuito del Proyecto Toromocho, que figura en el Anexo B del presente documento. La Tabla N° 2.1, representa los diferentes casos con los valores respectivos derivados de la misma.

**TABLA N° 2.1** Casos considerados para cálculo cortocircuito

CASO	DESCRIPCION	T1_ [kA]	T1_T [kA]	D1_ [kA]	T2_ [kA]	T2_T [kA]	D2_ [kA]	T3 [kA]	T3_T [kA]	D3_ [kA]	Bus Max [kA]
1	B1,B2,B3,B4,B5= cerrados	15.61	1.231	1.707	15.61	0.347	1.543	15.61	0.645	3.031	<b>55.334</b>
2	B1,B2,B3 = cerrados B4,B5 = abiertos	20.01	1.231	1.707	20.01	0.347	1.543	20.01	0.645	3.031	22.948
3	B1,B3,B4,B5 = cerrados B2 = abierto	17.41	1.231	1.707	-	0.347	1.543	17.41	0.645	3.031	<b>43.324</b>
4	B1,B2,B4,B5 = cerrados B3 = abierto	17.41	1.231	1.707	13.33	0.347	1.543	-	0.645	3.031	<b>43.324</b>

Donde observamos que los niveles de cortocircuito son altos, tanto para el Caso 1 que es de 55.334 kA, como para los Casos 3 y 4 que es 43.324, es decir:

$$55.33 \text{ kA} > 40 \text{ kA (Caso 1)}$$

$$43.32 \text{ kA} > 40 \text{ kA (Caso 3 y 4)}$$

Valores que superan los 40kA que es la máxima corriente de interrupción que pueden manejar los interruptores de potencia.

Los análisis de cortocircuito muestran que los niveles de cortocircuito en la Barra de 23 kV de la Subestación Toromocho son muy elevados y superan los valores de la capacidad de ruptura o poder de corte de los interruptores en 23 kV. Si la corriente de cortocircuito se establece a un valor superior al poder de corte de un interruptor, éste no podrá interrumpirla, y se destruirá

En tal sentido, se deben investigar opciones para disminuir los valores de cortocircuito en la Subestación Toromocho a valores que no superen los 40 kA en la barra de 23 kV, lo cual es el objeto del presente trabajo.

### CAPITULO III

## DESCRIPCIÓN Y REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DISPONIBLES PARA LA LIMITACIÓN DE LOS NIVELES DE CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos en las redes eléctricas pueden resultar en flujos de corrientes muy altas en los equipos conectados. Estas altas corrientes de falla pueden producir esfuerzos térmicos y mecánicos que pueden dañar gravemente, o destruir incluso, los equipos eléctricos conectados a la red

Los siguientes componentes principales de los sistemas de potencia, pueden ser afectados por las elevadas corrientes de falla [2]:

- Líneas de Transmisión.
- Transformadores de Potencias
- Subestaciones Encapsuladas de Gas (GIS)
- Aisladores
- Barras
- Interruptores de Potencias
- Sistemas de Puesta a Tierra
- Sistemas de Medición y Protección

Diversas tecnologías y métodos están disponibles en la práctica para limitar las corrientes de falla en los sistemas de energía eléctrica [6]. Estos incluyen a:

- Tecnologías convencionales tales como Reactores Limitadores de Corrientes.
- Nuevas Tecnologías como Limitadores de Corrientes de Estado Sólido y Limitadores de Corriente con Superconductores.
- Métodos Pasivos, en los cuales la impedancia de los circuitos son incrementados tanto en condiciones normales como en condiciones de falla.

Existen disponibles:

#### **Métodos pasivos:**

Se consideran los siguientes métodos:

- Métodos topológicos que incluyen la partición de redes, partición de barras
- En los mismos aparatos, usando transformadores con alta impedancia de cortocircuito.

**Métodos Activos** : Proporcionan una pequeña impedancia en condiciones normales de operación y un incremento de la impedancia al momento de falla.

Se consideran los siguientes métodos:

- Uso de Fusibles de AT limitadores de corriente.
- Uso de Limitadores de Corriente de Falla (conocidos comercialmente en inglés como FCL o Is- Limiters). Estos son activados por una pequeña carga explosiva que abre un enlace para desviar la corriente de defecto a un fusible limitador de corriente paralela. Un módulo electrónico se utiliza para accionar el dispositivo mediante la detección de la tasa de aumento de la corriente de falla.

Estos limitadores de corriente de falla, a diferencia de los reactores y transformadores de alta impedancia, limitan las corrientes de falla sin la adición de impedancia para el circuito durante la operación normal. El desarrollo de superconductores aplicados a los actuales limitadores está siendo desarrollado por varias empresas eléctricas y fabricantes de todo el mundo.

En la Tabla N° 3.1, se presentan las ventajas y desventajas de varios métodos tradicionales para limitar la corriente de falla.

A continuación se describen brevemente, varias soluciones prácticas a problemas de altas corrientes de falla.

### **3.1 Cambios en la Topología:**

#### **3.1.1 División de Barras**

Este es uno de los métodos denominados “pasivos”, en los cuales se aumenta la impedancia del circuito en condiciones normales y de fallo.

El aumento de las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero vistos por el fallo, se traducirá en la reducción de las corrientes de cortocircuito.

Esto se logra en una subestación dividiendo las barras en dos o más secciones. Esta solución es bastante común y menos costosa que la mejora o aumento de capacidad de los interruptores[ 5].

La división de barras en las subestaciones puede resultar en la separación de fuentes de energía que podría alimentar a una falla [2]. Esto puede lograrse mediante la apertura de lazos normalmente cerrados, o por la separación de barras existentes.

Esta solución puede reducir efectivamente el número de fuentes que contribuyen a las corrientes de fallo. Mientras tanto, se reduce el número de fuentes de energía que suministran las cargas a la red en condiciones normales de funcionamiento o de contingencia. Por lo tanto, políticas especiales son necesarias para tener éxito en la operación y el control del sistema de potencia. Sin embargo, la división de carga requiere de un cuidadoso estudio, ya que la flexibilidad de funcionamiento puede ser degradado

de manera significativa. Además, la confiabilidad puede verse afectada al reducirse el número de transformadores que alimentan la carga.

**TABLA N° 3.1:** Métodos Tradicionales para la limitación de la corriente de falla (IEEE Spectrum Edición Julio 1997) [1]

Método	Ventajas	Desventajas
Interruptor de Potencia	* Probado * Confiable	* Requiere corriente cero para disparar * Alto costo y tiene vida útil limitada
Transformadores de Alta Impedancia	* Ampliamente usados	* Introduce ineficiencias en el sistema (altas pérdidas).
Fusibles	* Simple	* Se accionan con mucha frecuencia * Deben ser reemplazados manualmente.
Reactores	* Probados * Tradicional	* Implica gran caída de tensión * Causa sustancial pérdida de potencia durante operación normal.
Reconfiguración del Sistema (Partición de Barras)	* Probado * Preferida para áreas de rápido crecimiento	* Reduce la confiabilidad del sistema. * Reduce la flexibilidad de operación * Adiciona costos por la apertura de los Interruptores de Potencia.

### 3.1.2 División del Sistema en Sub-Redes

En este método, el sistema de potencia se divide en pequeñas sub-redes de un determinado nivel de tensión. Estas sub-redes están conectados al siguiente nivel de tensión más alto siguiente. Esta configuración reduce la las corrientes de cortocircuito en las sub redes sin afectar las capacidad nominal de los interruptores de potencia[4].

### 3.2 Aumento de la capacidad de los Interruptores de Potencia

Un nivel esperado de alta corriente de falla en un sistema de potencia, normalmente afecta a más de un interruptor de circuito. Para superar este problema, las empresas de electricidad pueden cambiar estos interruptores con otros de mayor capacidad de cortocircuito. Sin embargo, esta solución no va a reducir las corrientes de falla en el sistema y, la sustitución requerida tiene un coste elevado y, en algunos casos, con un considerable tiempo de implementación. Esta solución cara, sólo podría estar justificada en los casos de cambio del interruptor, que por lo años de servicio ha perdido el nivel de confiabilidad aceptable y requiere de altos costos de mantenimiento.

### 3.3 Uso de Transformadores con alta Impedancia

El Porcentaje de la impedancia de porcentaje de un transformador es la caída de voltaje a plena carga debido a la resistencia del devanado y la reactancia de fuga expresado como un porcentaje de la tensión nominal.

También es el porcentaje de la tensión en bornes normal en el lado requerido para hacer circular corriente a plena carga bajo condiciones de corto circuito en el otro lado.

La impedancia de un transformador tiene un efecto importante sobre los niveles de falla del sistema. Determina el valor máximo de la corriente que fluirá bajo condiciones de falla [5].

Es fácil de calcular la corriente máxima que puede entregar un transformador bajo condiciones de fallo simétricas. A modo de ejemplo, consideremos un 2 MVA transformador con una impedancia de 5%. El nivel de falla máxima disponible en el secundario es:

$$2 \times \text{MVA} / 5 = 40 \text{ MVA}$$

Así, un transformador con una impedancia inferior dará lugar a un nivel de falla o cortocircuito mayor (y viceversa).

El valor calculado anteriormente es un máximo. En la práctica, el nivel de falla real se reduce por los efectos de la impedancia de la fuente, la impedancia de cables y líneas aéreas entre el transformador y la falla, y la impedancia de falla en sí.

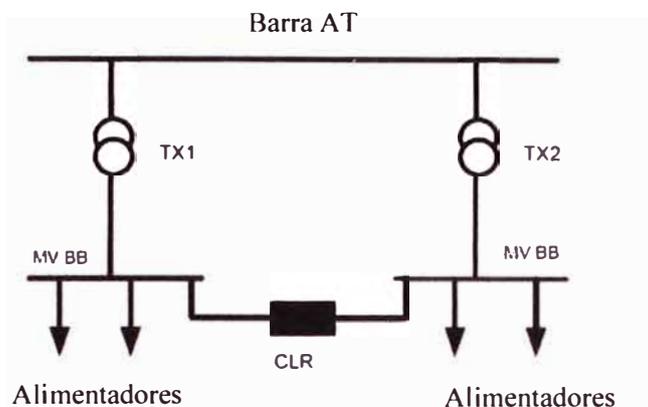
Los valores típicos de impedancia consideradas por los fabricantes de transformadores varía entre 2% y 9%.

### **3.4 Uso de Reactores Limitadores de Corriente**

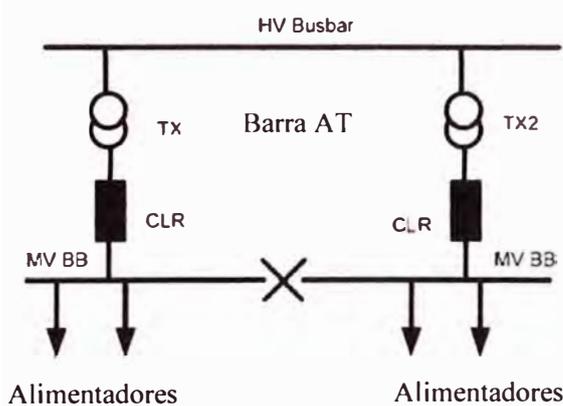
Las corrientes de falla se pueden reducir a la capacidad nominal de los aparatos de desconexión y maniobra, mediante la conexión de reactores en serie en el circuito conocido como Reactor Limitador de Corriente (o por su denominación en inglés Current Limitator Reactor o CLR). La caída de tensión en los terminales del reactor aumenta durante la falla. Los reactores de núcleo de aire pueden ofrecer una opción económica. Las desventajas de estos CLR convencionales incluyen caída inevitable tensión en condiciones normales de funcionamiento y presentar una constante fuente de pérdidas. Pueden interactuar con otros componentes del sistema y producir inestabilidad. La Tensión transitoria puede aumentar hasta límites severos, por lo que se requeriría de contar con condensadores apropiados para mitigar este problema.

Figuras 3.1 a 3.4 muestran posibles lugares de instalación de CLR en sistemas de potencia. La instalación de un CLR entre las secciones de las barras como se muestra en la figura 3.1 es eficaz para reducir el nivel de cortocircuito, pero no limita las contribuciones individuales de las fuentes de entrada. En la configuración mostrada en la figura 3.2, la contribución individual de las fuentes de alimentación se puede reducir a un

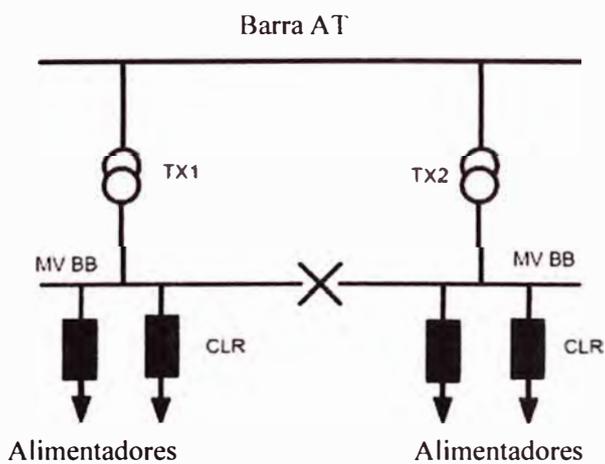
nivel aceptable. Sin embargo, esta configuración adolece de pérdidas elevadas y la regulación es pobre. Estas desventajas pueden superarse mediante el uso de la configuración mostrada en la fig. 3.3, donde un CLR está instalado en cada alimentador de salida



**Fig. 3.1** Conexión del CLR entre las barras de MT



**Fig. 3.2** Conexión del CLR en los alimentadores de entrada



**Fig. 3.3** Conexión del CLR en los alimentadores de salida

En la fig. 3.4, un CLR está instalado en cada alimentador del generador, lo que limita la corriente de falla de las fuentes individuales.

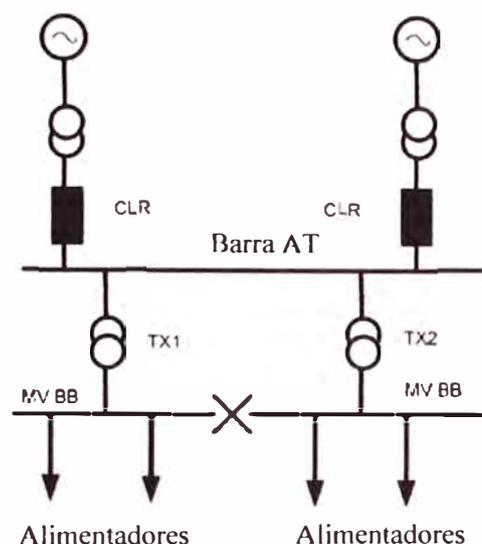


Fig. 3.4 Conexión del CLR en los alimentadores de generación

En general, existen varios factores que podrían hacer inviable la aplicación de los reactores limitadores, como por ejemplo caída de voltaje y pérdidas de potencia elevadas.

### 3.5 Limitadores de Corriente de Falla.

#### 3.5.1 Características de limitación de corriente:

Cuando se usan fusibles en media y alta tensión [7], es necesario utilizar fusibles cuyas características eviten que las corrientes de cortocircuito alcancen valores demasiado elevados. Las corrientes de cortocircuito elevadas en media y alta tensión pueden generar grandes daños no solamente a los equipos sino que también a las personas. Actualmente se pueden encontrar en el mercado fusibles con características de limitación de corriente. De hecho, los limitadores de corrientes de cortocircuitos (FCL) o Is- Limiter, son un tipo especial de fusibles limitadores. En el caso de estos limitadores de corriente de cortocircuito se utilizan técnicas especiales para lograr limitar los valores de cortocircuito y por eso se les dedica un apartado especial en este trabajo. Los fusibles limitadores de corriente (en inglés "Current-Limiting Fuses") están diseñados de tal forma que interrumpan la corriente de cortocircuito durante el primer ciclo para evitar de esta forma que se alcance el pico natural máximo de corriente de cortocircuito disponible en el punto de falla.

El principio de funcionamiento de estos fusibles se basa en la producción de un arco que genere un voltaje el cual exceda el voltaje del sistema para así forzar a la corriente a un valor de cero en el siguiente paso por cero del voltaje. El voltaje del arco se genera como

consecuencia de la fundición del elemento conductor y del medio de extinción que rodea a este, generando un camino de alta impedancia. Como sabemos, una falla de cortocircuito genera una corriente más inductiva que resistiva por lo que al fundirse el fusible y generar un camino resistivo, la corriente y el voltaje son forzados a estar en fase y por lo tanto el próximo paso por cero del voltaje corresponde también al próximo paso por cero de la corriente (están en fase el voltaje y la corriente como debe de ser en un circuito resistivo). Es importante notar que cuando se inicia el arco la corriente es inductiva (no resistiva), sin embargo, esta corriente es limitada a un valor mucho más bajo conforme el arco se va volviendo más resistivo. La interrupción total sucede cuando la corriente (y por lo tanto el voltaje) pasan por cero.

El grado de limitación de corriente dependerá de la corriente de cortocircuito disponible en el punto de falla y del momento específico de la onda de voltaje en el que se produce el cortocircuito. A más corriente disponible en el punto de la falla, más será la corriente que circula inicialmente por el fusible y menos la acción limitadora de este. Cuando la falla es completamente asimétrica, el punto máximo de la corriente de cortocircuito sucede aproximadamente a medio ciclo (corriente más inductiva) y cuando es simétrica, el punto máximo de la corriente de cortocircuito sucede exactamente a un cuarto de ciclo (menos inductiva). Debido a esto, la acción limitadora de los fusibles cambia con el grado de asimetría de la falla, entre más asimétrica (inductiva) mayor será la corriente de falla y menos la acción limitadora del fusible.

Los fabricantes de estos fusibles proporcionan las curvas características de limitación de corriente en la cual relacionan el valor eficaz (RMS) inicial de la corriente asimétrica disponible en el punto de la falla (corriente de cortocircuito máxima disponible) con el pico de corriente máximo permitido por el fusible en amperios instantáneos durante el tiempo de desconexión (también llamada corriente de paso).

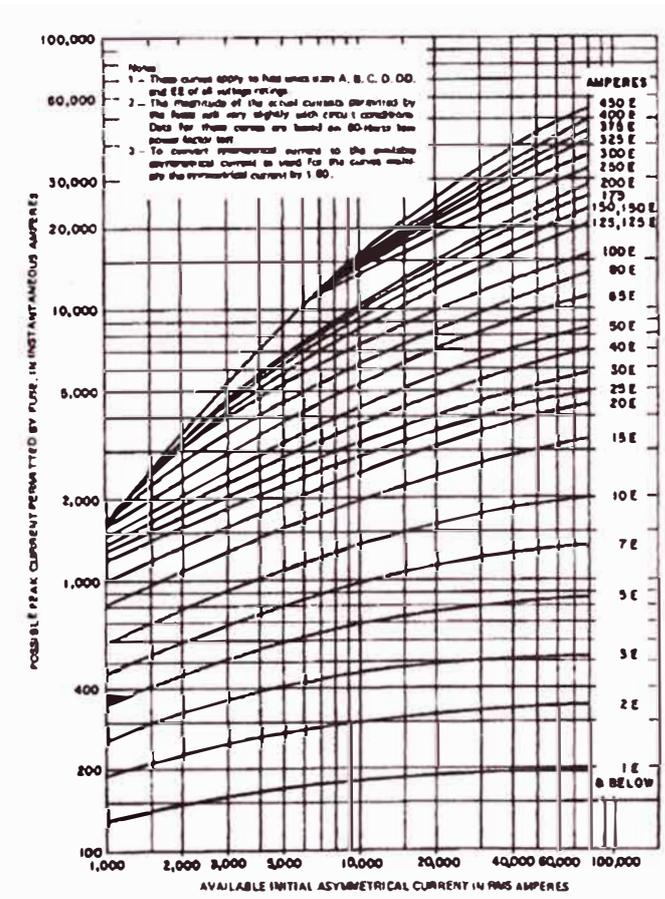
Algunos fabricantes proporcionan las curvas en función de la corriente máxima inicial disponible en el punto de falla en valores eficaces (RMS) simétricos en lugar de valores asimétricos. Generalmente se utiliza un valor de asimetría de 1.6 para convertir un valor simétrico a un valor asimétrico. En la fig. 3.5 podemos observar una gráfica en la cual se expresa la corriente máxima disponible en valores asimétricos.

Estos fusibles son los más utilizados en la industria y son utilizados por los FCL's por lo que será el objeto de estudio en los puntos siguientes.

### **3.5.2 Limitadores de corrientes de falla (FCL).**

Los limitadores de corriente de falla ó FCL por sus siglas en Ingles (*Fault Current Limiter*) son también llamado Protectores limitadores de corriente o (*Current Limiting Protectors*) o Is- Limiters. Por facilidad y por ser un término genérico, se le llamará limitador de

corriente de falla o FCL o Is Limiter. Los fusibles limitadores de corriente logran buenos resultados en los rangos bajos de corriente de carga (hasta 400 amperios) ya que se logra limitación de corriente a un precio bajo. En los rangos de 200 a 3,000 amperios, se usan comúnmente interruptores de potencia. Los interruptores de potencia pueden soportar grandes corrientes de carga continua, sin embargo, no tienen características de limitación de corriente suficiente y son relativamente lentos al actuar (3 – 5 ciclos normalmente). Debido a esto, cuando se requiere aperturas rápidas en los rangos de altas corrientes o cuando los interruptores de potencia han quedado subdimensionados para los niveles de corriente de cortocircuito del sistema, los FCL's podrían ser una buena opción.



Fuente: GET-3039G. GE Current-Limiting Pow

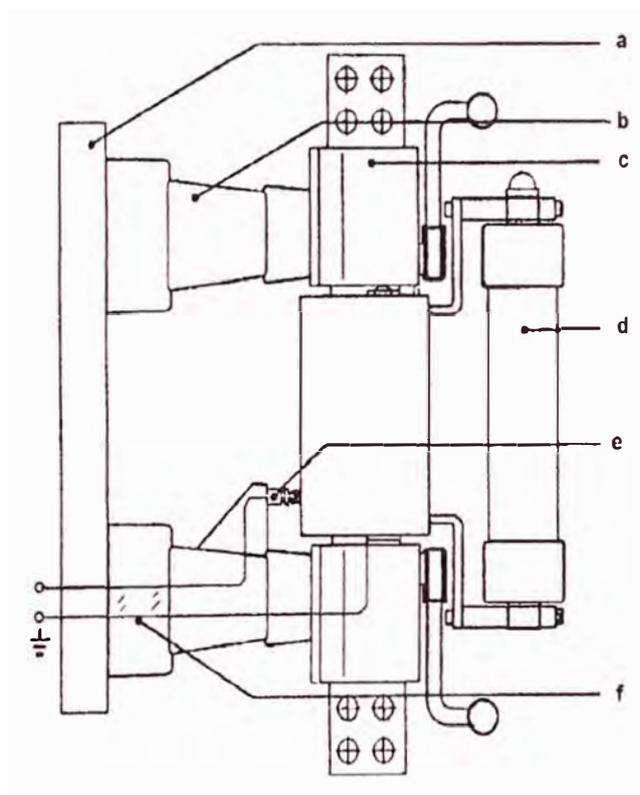
Fig 3.5. Curva característica de un fusible limitador de corriente (corriente asimétrica de cortocircuito máxima disponible)

### 3.5.3 Forma constructiva

En el punto 3.5.1 se explicó que el FCL [3] es un tipo especial de fusible limitador. En realidad, el FCL es un limitador para corrientes nominales de carga altas, normalmente

entre 1,200 a 5,000 amperios; mientras que los fusibles limitadores trabajan hasta aproximadamente los 400 amperios. Debido a esto, la operación y forma constructiva de los FCL's difieren de los fusibles limitadores. Un FCL esta formado por un elemento conductor (que es interrumpido por medio de un explosivo) en paralelo con un fusible limitador. Los voltajes de operación de un FCL pueden variar desde 0.750 kV hasta 38 kV. Los FCL's se fabrican, al igual que los fusibles limitadores, para exteriores y para interiores.

Cuando la aplicación es en media tensión, los FCL's a usar son para interiores. Un FCL está formado básicamente por los elementos de soporte y por los elementos de interrupción.



Fuente : Is-limiter. ABB Calor Emag

**Fig. 3.6.** Elementos de soporte de un FCL

Los elementos de soporte se muestran en la figura 3.6 y están conformados por:

- a. Base.
- b. Aislador.
- c. Elemento conductor con explosivo y bases de sujeción.
- d. Fusible limitador (elemento de interrupción).

- e. Contacto telescópico (transmite la señal al explosivo).
- f. Aislador con transformador de pulso (transmite el pulso para la explosión enviado por un sistema de disparo el cual ha detectado una corriente de cortocircuito).

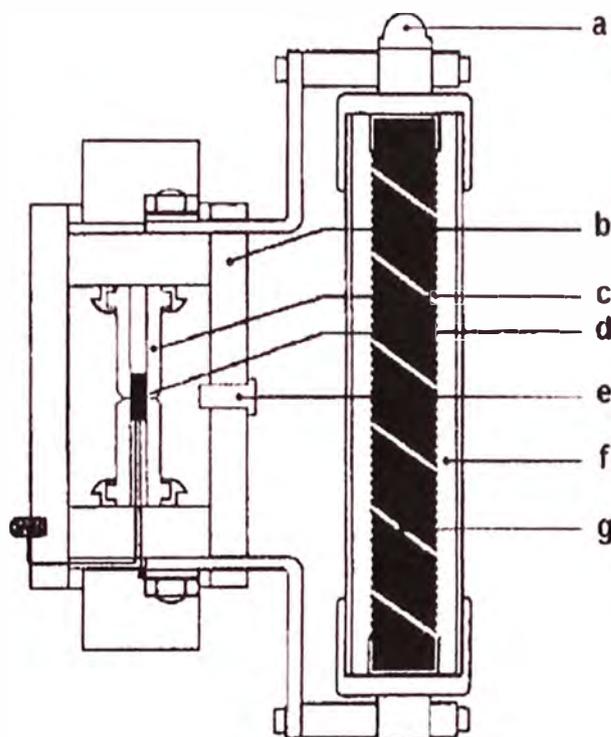


Fig. 3.7. Elementos de interrupción de un FCL

#### 3.5.4 Principio de operación

Un FCL está formado básicamente por un elemento conductor principal de una sección transversal grande (d en fig. 3.7), un fusible limitador (g en fig. 3.7) y un sistema de detección y disparo.

El elemento conductor es el que transporta la corriente de carga continua la cual puede ser desde 1,200 hasta 5,000 amperios dependiendo de la capacidad del limitador. Este conductor es un elemento de alta capacidad de conducción pero de muy baja capacidad interruptiva. Generalmente está formado por un conductor de cobre de gran sección transversal la cual está calculada para la corriente de carga continua para la cual fue diseñado el FCL. Este conductor no es uniforme, más bien tiene algunas hendiduras transversales e igualmente espaciadas a lo largo del conductor y que se convierten en los puntos de ruptura del conductor al momento de actuar. Debajo de cada hendidura, se encuentran las cargas explosivas que se encargan de romper el conductor principal cuando se requiere una apertura debido a una corriente de falla. Cuando las cargas

explotan, provocan un corte lineal en el conductor justo en los puntos en donde se encuentran las hendiduras provocando de esta forma que las dos mitades del conductor cortado se doblen. Al doblarse estas partes, forma múltiples espacios. Como es normal al interrumpir cualquier corriente eléctrica, se forma arcos entre las partes que son separadas en forma abrupta. Los voltajes de arco generados se utilizan para transferir la corriente al fusible limitador que se encuentra conectado en paralelo al conductor principal. Mientras el fusible actúa el conductor principal restablece la rigidez dieléctrica en las aberturas dejadas por la separación de las partes conductoras. El número de hendiduras depende de la capacidad del FCL, a mayor capacidad, mayor número de hendiduras y por lo tanto mayor número de cargas explosivas. En la figura 3.8, se puede observar la secuencia de apertura del conductor principal por medio de los explosivos.

El fusible limitador, como se mencionó anteriormente, toma la corriente de carga cuando el conductor principal se abre abruptamente debido a la carga explosiva. Debido a que este es un fusible limitador, su sección transversal es mucho menor a la sección transversal del conductor principal y por lo tanto es un elemento de baja capacidad de conducción pero de una alta capacidad de interrupción (normalmente alcanzan los 40 kA o en casos especiales los 120 kA simétricos eficaces) . Como se explicó en el punto 4.5.1., el fusible limitador no permite que la corriente de cortocircuito alcance el valor máximo, más bien lo limita mucho antes de que dicha corriente alcance su punto máximo (característica de limitación de corriente). Esto lo logra por medio del arco que se forma durante la apertura. Este arco genera un voltaje que se opone al voltaje aplicado y limita la corriente de falla. La interrupción total se logra en el próximo paso por cero del voltaje pero la corriente ya ha sido limitada.

Un sistema de detección de corriente formado por un transformador de corriente y un aparato electrónico de medición y disparo se encargan de detectar las corrientes de cortocircuito y enviar la señal de disparo al transformador de pulsos ( $f$  en figura 3.7).

Este transformador transmite el pulso de disparo al contacto telescópico ( $e$  en figura 3.7) el cual a su vez transmite el pulso a la carga explosiva que se encuentra en el conductor principal. Esto ocasiona una explosión que separa el conductor principal interrumpiendo de esta forma la corriente (ver arriba la explicación detallada del conductor principal).

Un esquema de este sistema de detección y disparo se puede observar en la figura 3.9 y el cual consta de:

- a. Transformador de corriente para la detección de la corriente de falla.
- b. Aparato electrónico de medición y disparo.
- c. Transformador de pulsos para adaptación de potenciales. Convierte el pulso de disparo de bajo voltaje a un pulso de un potencial elevado.

d. Conjunto de conductor principal, fusible limitador y soportes (FCL).

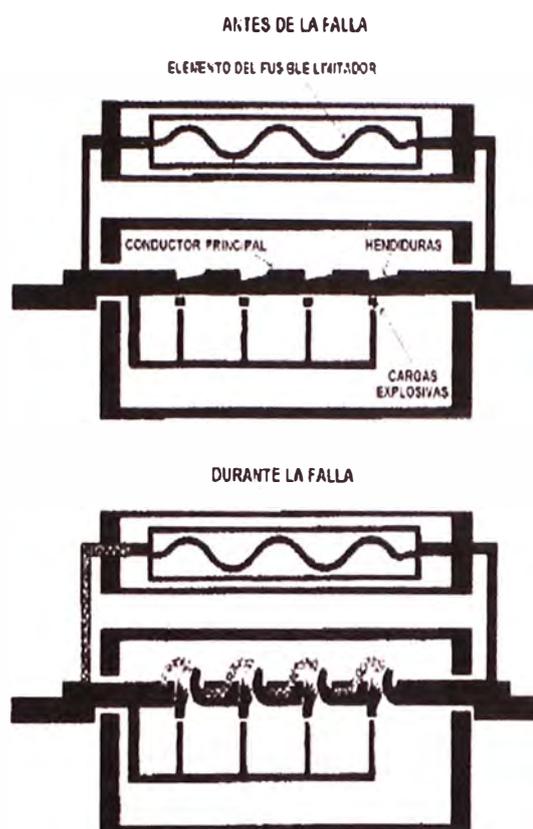


Fig 3.8. Secuencia de apertura del conductor principal de un FCL

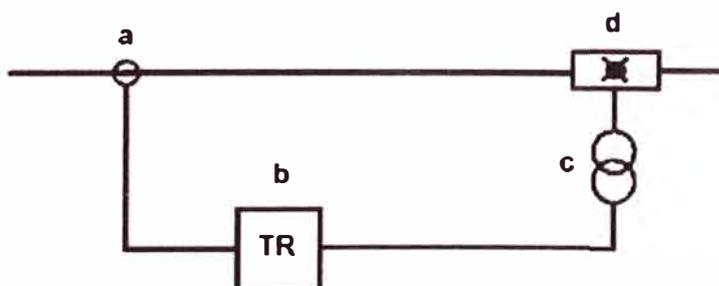


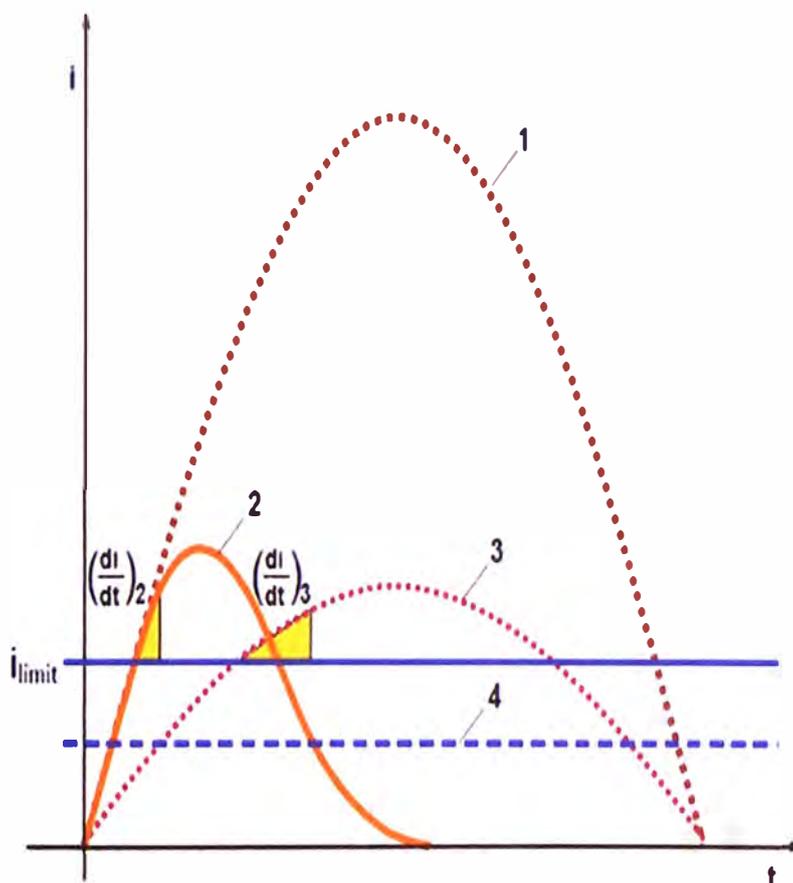
Fig. 3.9. Esquema de conexión del sistema de detección y disparo de un FCL

### 3.5.5 Características de disparo

Debido a que el FCL es un dispositivo híbrido [3] formado por un elemento de alta capacidad de conducción pero baja capacidad interruptiva (conductor principal) y por un elemento de baja capacidad de conducción pero alta capacidad interruptiva (fusible limitador), es necesario analizar las características de disparo principalmente en lo relativo al tiempo de respuesta.

Con el fin de lograr la apertura deseada en tan corto tiempo, una pequeña carga es utilizada para la apertura del interruptor (conductor principal).

Cuando el conductor principal está abierto, la corriente continúa fluyendo a través del fusible en paralelo, donde es limitada dentro de los 0,5 ms y, siendo cuando la tensión vuelve a pasar por cero.



Donde :

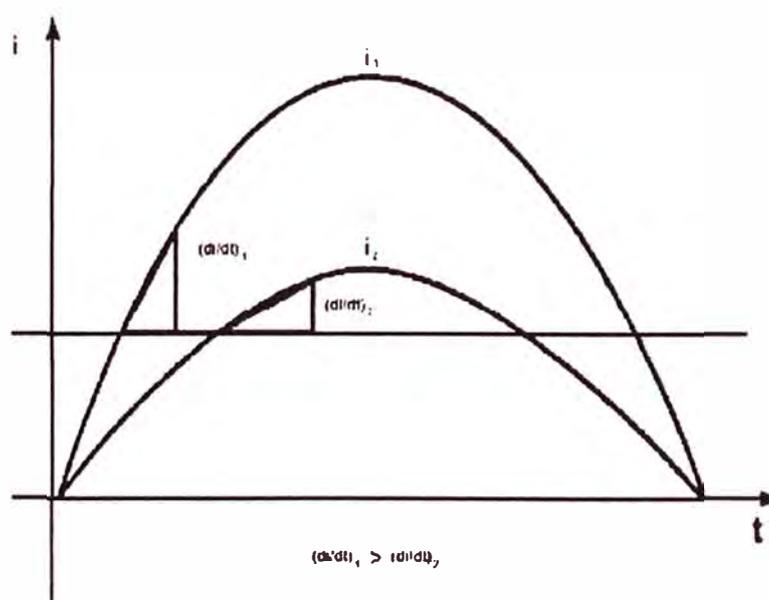
- 1 Corriente de Corto circuito sin FCL
- 2 Corriente de Corto circuito con el FCL disparado
- 3 Sobre corriente. El FCL no disparado
- 4 Valor pico de la corriente de servicio.

**Fig. 3.10** Detección de la Corriente de Corto circuito

La corriente que fluye a través del FCL es controlado por un dispositivo electrónico de medición y disparo. A la primera elevación de la corriente de corto circuito este dispositivo decide si el disparo del FCL es necesario. Para llegar a esta decisión, la corriente instantánea y la rapidez de cambio del valor de dicha corriente se miden y son

evaluados constantemente. La rapidez de cambio del valor de la corriente no es más que la derivada de la corriente respecto al tiempo es decir  $di/dt$ . Cuando los valores límites establecidos son alcanzado o excedidos ( $i_{limit}$ ) para ambas variables simultáneamente, el FCL dispara. Tal como se observa en la figura 3.10, se puede apreciar en qué circunstancias hay disparo del FCL.

El nivel de la corriente instantánea es medido para tomar una decisión sobre la base de la corriente que ya está pasando por el FCL y la derivada de la corriente nos indica la tendencia de la corriente también de acuerdo a la severidad de la falla. Para un mismo valor de corriente instantánea en un punto para ondas de un mismo período, la rapidez de cambio nos indica que tan severa es la falla y cuál sería su punto máximo si no se interrumpiera. Esta corriente de falla que es interrumpida y que no llega a existir se le llama corriente posible, esperada o inminente (en inglés "Prospective Current"). Esto se puede observar en la figura 3.11, la cual muestra que entre más grande es la corriente esperada o posible, más grande es la derivada de la corriente respecto al tiempo.

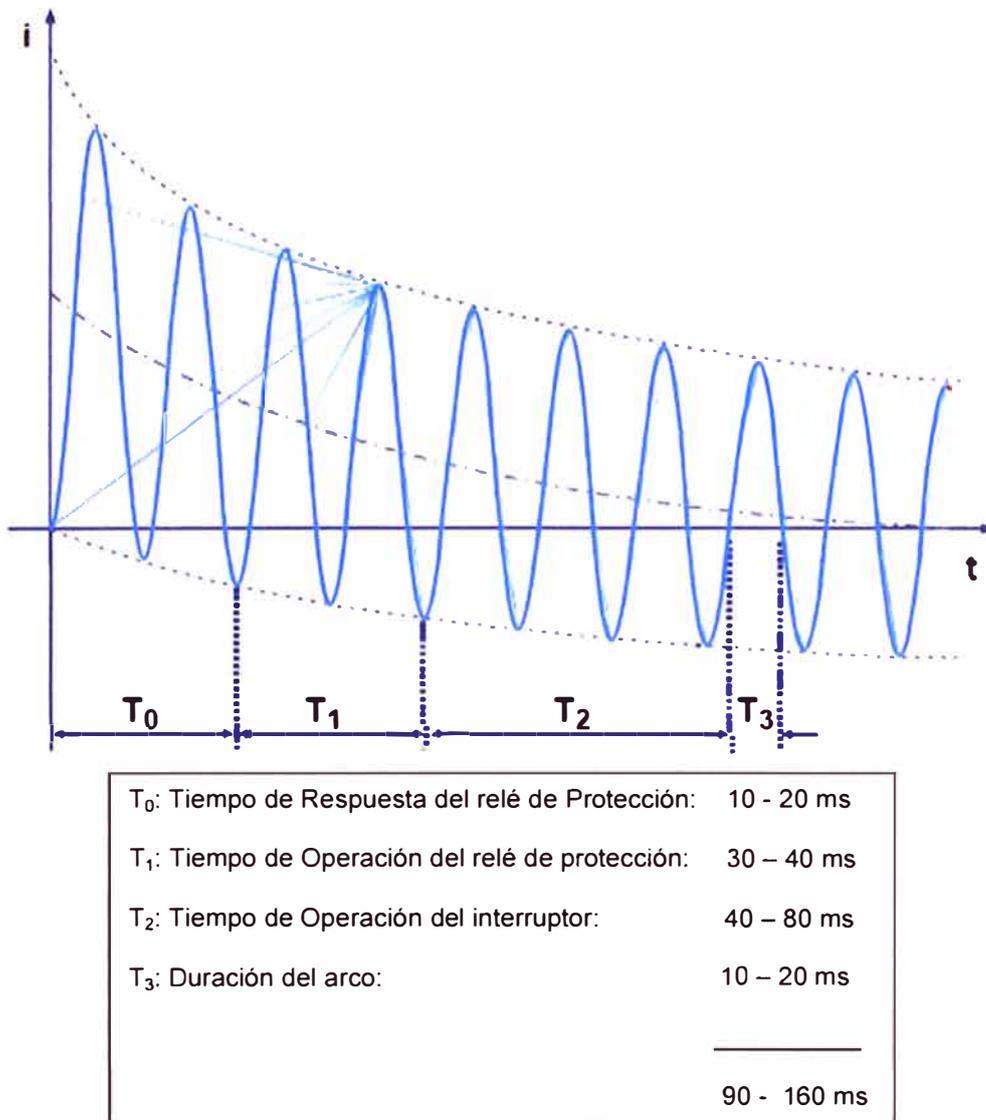


**Fig. 3.11.** Relación entre la amplitud de una corriente y su derivada

Se estima que los siguientes tiempos se pueden tomar de referencia para calcular el tiempo en el que un FCL limpia una falla:

- Sensado: 0.080 mS.
- Apertura conductor principal: 0.013 mS.
- Apertura fusible: 0.500 mS.
- Total: 0.593 mS.

En un sistema de 60 Hertz, un ciclo tiene 16 mS y si estimamos la apertura del FCL dentro de 1 mS, entonces este estaría operando dentro del primer cuarto de ciclo (4mS).



**Fig 3.12** : Tiempos típicos de operación de los relés de protección y los interruptores de potencia.

Cuando se diseña un sistema usando FCL's, es útil determinar el parámetro de energía  $I^2t$  de dicho FCL para poder coordinarlo con los fusibles.

En la Figura 3.12 se pueden apreciar los tiempos típicos de operación de los relés de protección y los interruptores de potencia.

En la Fig. 3.13 se puede apreciar el tiempo de disparo del FCL indicado por la pequeña área coloreada, es decir que este dispositivo de alta velocidad origina el disparo muy rápido con un pequeño valor de corriente. En el FCL la corriente conmuta a un fusible en

paralelo con gran capacidad de apertura, el cual limita la corriente de cortocircuito durante su primera subida.

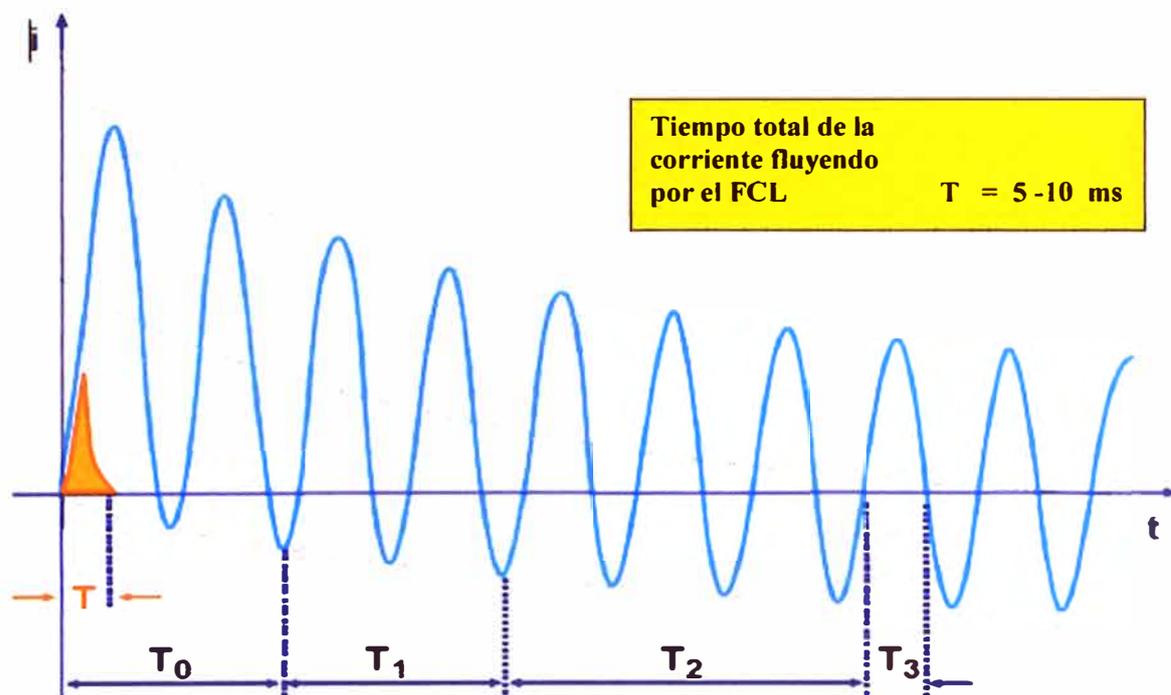


Fig 3.13 : Tiempo de disparo del FCL

### 3.5.6. Cálculo de los Valores de Disparo del Limitador de Corriente de Falla.

#### a. ¿Cómo se define el Valor de Disparo?

El valor de disparo ( $I_T$ ) es el valor eficaz esperado en la primera mitad de la forma de onda de la corriente de cortocircuito que fluye a través del Limitador de Corriente de Falla, en cuyo caso el Limitador debe disparar apenas ocurre el primer incremento de corriente.

El uso de dispositivos limitadores de corriente de falla todavía no es muy usual, y por lo tanto, las consideraciones contempladas en el cálculo del valor de disparo no son muy conocidas. En el ejemplo (fig 3.14) se presenta una explicación de cómo se calcula el valor de disparo del Limitador de Corriente de Falla.

Si el cortocircuito se produce en el lugar de falla (1) (cortocircuito en barras), el valor de disparo sería de 20 kA.

Con un corto circuito en la ubicación de falla (2), el Limitador de Corriente de Falla debe todavía detectar la corriente de cortocircuito de 25 kA que fluye a través de la impedancia Z (el cable y el reactor). La corriente a través del FCL es entonces 12.5 kA. Sin embargo, si una corriente menor a 25 kA fluye a través de la impedancia Z, el interruptor ubicado en la alimentación de salida puede disparar para interrumpir la

corriente de corto-circuito y el limitador de corriente de falla no tiene porqué disparar. Entonces el valor de disparo calculado para este ejemplo es por lo tanto, 12.5 kA.

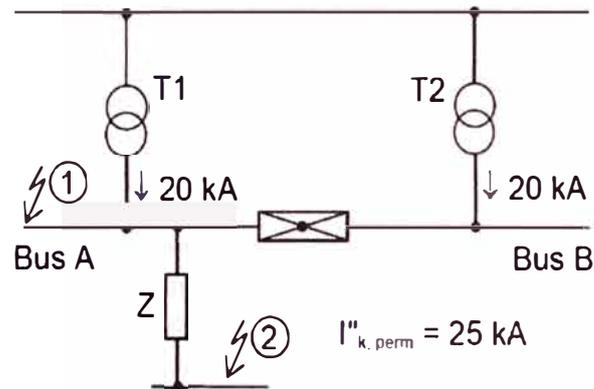


Fig. 3.14 Ejemplo de cálculo de valores de disparo

Conclusión:

Si el limitador de corriente de falla dispara en un valor esperado de 12.5 kA (rms) en la primera elevación de corriente, entonces, los equipos eléctricos del sistema están protegidos de corrientes de cortocircuito excesivamente altas en cualquier lugar de falla.

**b. ¿Cómo se calcula generalmente este valor de disparo?**

La Figura 3.15 muestra el diagrama del circuito equivalente simplificado de un sistema con dos barras A y B, los cuales son alimentados a través de impedancias Z1 y Z2 desde una red que se asume como un sistema con voltaje constante y frecuencia constante, y están acoplados entre sí por un limitador de corriente de falla. Z1 y Z2 representan cada uno la impedancia resultante en el caso de varios alimentadores paralelos que alimentan las correspondientes barras. Z3 expresa la impedancia entre la barra A y el lugar de la falla.

Además, para el caso de un cortocircuito en barra ( $Z_3 = 0$ ), se aplica lo siguiente:

$$I_1 = I''_{k1} \text{ y } I_2 = I''_{k2}$$

Estas dos corrientes ( $I''_{k1}$  y  $I''_{k2}$ ) es probable que sean muy familiares en los cálculos normales de cortocircuito. Por lo general, la determinación del valor de disparo se asume con un corto-circuito detrás Z3 (figura 3.15) con  $Z_3 \neq 0$ .

El limitador de corriente de falla disparará cuando:

$$I_3 = I_1 + I_2 \geq I''_{k, perm.1} \quad (3.1)$$

Como la relación de entre Corrientes  $I_1 / I_2$  está determinada por las impedancias Z1 y Z2, aplica lo siguiente:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I''_{k1}}{I''_{k2}} \quad (3.2)$$

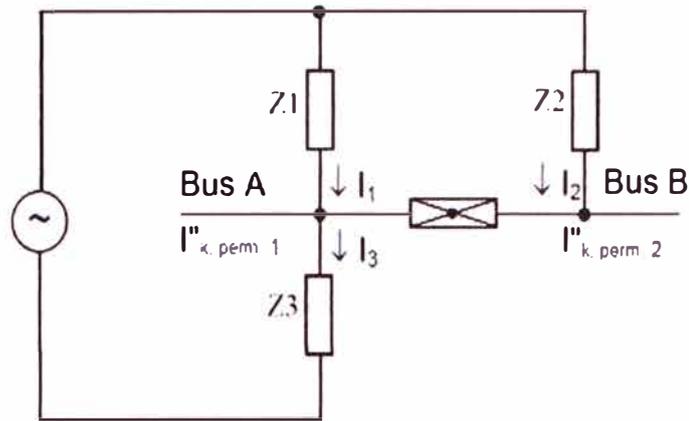


Fig. 3.15 Diagrama del circuito equivalente simplificado

Reemplazando la ecuación (3.2) dentro de (3.1) resulta:

$$I_3 = I_2 \left( 1 + \frac{I''_{k1}}{I''_{k2}} \right) \geq I''_{k, perm. 1}$$

En el caso límite, el signo igual se aplica, y la corriente parcial  $I_2$  que fluye en la barra B es igual a valor de disparo  $I_{T2}$ :

$$I_{T2} \left( 1 + \frac{I''_{k1}}{I''_{k2}} \right) = I''_{k, perm. 1}$$

Luego, el valor de disparo  $I_{T2}$  se calcula:

$$I_{T2} = I''_{k, perm. 1} \times \frac{I''_{k2}}{I''_{k1} + I''_{k2}} \quad (3.3)$$

Para un cortocircuito en la barra B, el valor de disparo  $I_{T1}$  se calcula como:

$$I_{T1} = I''_{k, perm. 2} \times \frac{I''_{k1}}{I''_{k1} + I''_{k2}} \quad (3.4)$$

Normalmente,  $I_{T1} \neq I_{T2}$ . Para las unidades de disparo de limitadores de corriente de falla en forma estándar, el menor de los dos valores calculados va a ser el valor de disparo.

### c. ¿Qué datos son necesarios para el cálculo?

Las ecuaciones (3.3) y (3.4) muestran que las cantidades que afectan al valor de disparo, incluyen los valores permitidos de corrientes de cortocircuito  $I''_{k, perm. 1}$  y  $I''_{k, perm. 2}$ . En aplicaciones prácticas, estas cantidades se suelen especificar y se pueden tomar como fijas. En esto, se diferencian de otras cantidades tales como  $I''_{k1}$  y  $I''_{k2}$ , que también entran en el cálculo del valor de disparo, pero son en su mayoría variables.  $I''_{k1}$  y  $I''_{k2}$  pueden cambiar con la condición de circuito, por ejemplo, con el número o capacidad de los alimentadores, transformadores y motores.

Es usual que la unidad de disparo esté diseñada para un valor único de disparo. Con el fin de evitar de que los interruptores sean sobrecargados en cualquier circunstancia

posible, éste debe ser el valor más bajo de disparo obtenido del cálculo, teniendo en cuenta todas las condiciones previstas para el circuito.

Se puede observar a partir de las ecuaciones (3.3) y (3.4), que sólo se deben conocer los valores extremos de la relación  $I''_{k1} / I''_{k2}$  para determinar el valor más bajo que genere el disparo.

Cuando la relación  $I''_{k1} / I''_{k2}$  está en un máximo,  $I_{T2}$  se asumirá en su mínimo, mientras que con  $I''_{k1} / I''_{k2}$  en un mínimo,  $I_{T1}$  se asumirá en su mínimo.

En otras palabras, para determinar el valor de disparo, solamente las condiciones del circuito con el mayor desequilibrio y severidad de corto-circuito en los dos lados del limitador de corriente de falla deben ser tomadas en cuenta.

Hasta la fecha, la experiencia práctica ha demostrado que en las versiones estándar de Limitadores de Corriente de Falla (sin otros criterios de disparo), el valor de disparo debe ser mayor o igual al doble de la corriente de operación. Esto evita que los Limitadores de Corriente de Falla disparen en fallas en las que no deberían disparar.

### **3.5.7 Cálculo de los valores de configuración de un Limitador de Corriente de Falla como dispositivo de medición y disparo.**

El valor de disparo  $I_T$ , calculado previamente, representa al valor eficaz de la corriente de corto circuito cuando el Limitador de Corriente de Falla dispara en el primer incremento de corriente. Con el fin de determinar si el disparo es necesario, inmediatamente después de que un cortocircuito se ha producido, el Limitador de Corriente de Falla, como dispositivo de medición y disparo, monitorea constantemente el valor instantáneo ( $i$ ) y la tasa de aumento ( $di/dt$ ) de la corriente que pasa a través del Limitador de Corriente de Falla. El Limitador de Corriente de Falla dispara cuando la tasa de aumento ( $di / dt$ ) alcanza o supera un nivel determinado  $(di / dt)_T$ , mientras que la corriente que fluye a través del Limitador de Corriente de Falla tiene valores instantáneos que varían entre  $i_2$  (el límite inferior de medición) e  $i_1$  (límite superior del rango de medición). El límite de la tasa de aumento  $(di / dt)_T$  y los límites del rango de medición  $i_1$  e  $i_2$  y se llaman los valores de ajuste, ellos representan los **valores instantáneos**.

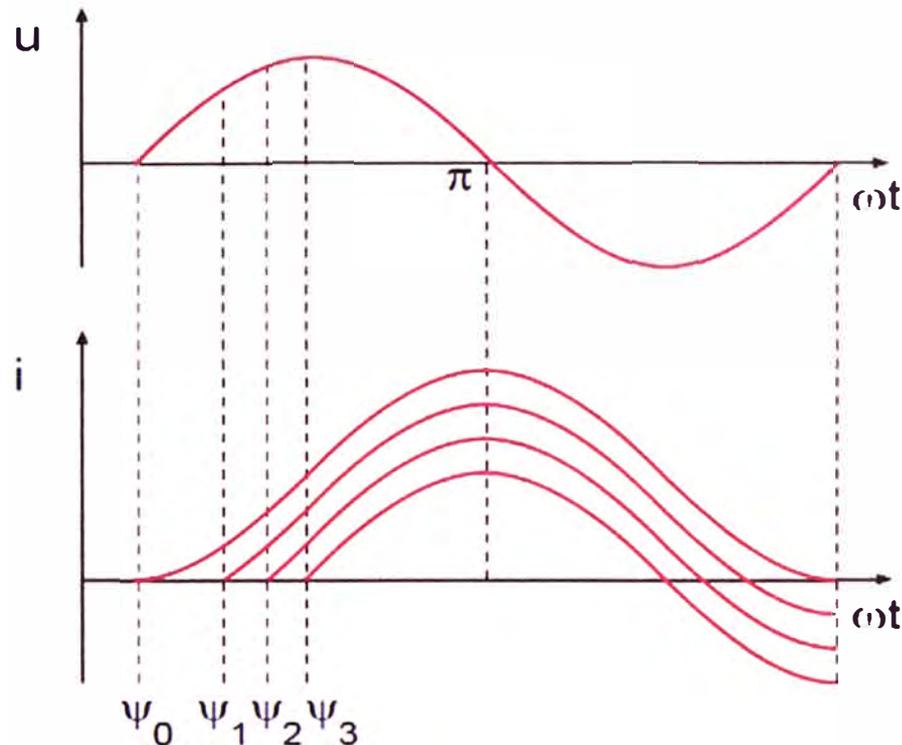
#### **a. Selección de los límites del rango de medición $i_1$ e $i_2$**

Los valores de  $i_1$  e  $i_2$  están determinados por el lugar donde se instala el Limitador de Corriente de Falla (por ejemplo, corriente de operación, corriente máxima de cortocircuito, valor de disparo) y el tipo de Limitador de Corriente de Falla. El límite inferior de medición  $i_2$  es seleccionado, por ejemplo, como aprox. 1000 a 3000 amperios por encima del valor pico de la corriente de operación. El intervalo de medición ( $i_1-i_2$ ) varía en general entre 1000 A y 4000 A.

#### **b. Cálculo de la tasa de aumento de la corriente**

Cuando se conoce el valor de disparo  $I_T$  (valor eficaz) y los límites del rango de medición de  $i_1$  e  $i_2$  (valores instantáneos), entonces, la tasa de aumento de corriente dentro del intervalo de medición ( $i_2$  a  $i_1$ ) se calcula para todos los períodos de cortocircuito.

La figura 3.15 muestra el desarrollo de la corriente, cuando se conecta a un circuito óhmico-inductivo ( $\cos \varphi = 0.15$ ), que es típico de los cortocircuitos en sistemas de media tensión, con diversos ángulos de conmutación  $\psi$ ; como referencia, también se muestra la curva de tensión.



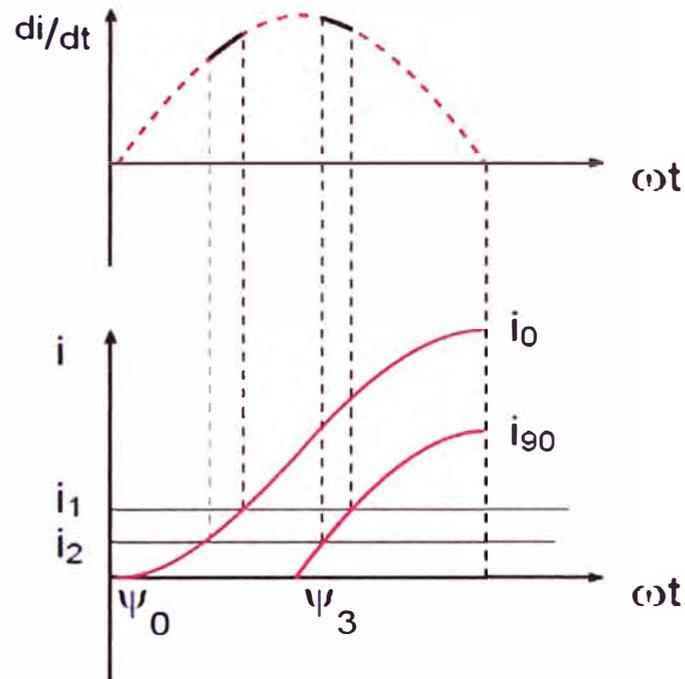
**Fig 3.15** Desarrollo de la corriente en circuito ohmico

Los valores extremos de la tasa de aumento de corriente que ocurren dentro del rango de medición, se producen en los dos casos límite (la corriente de cortocircuito con plena y sin ningún tipo de componente de CC); por lo tanto, sólo estos dos casos se muestran en la figura 3.16

Por encima de las curvas de las corrientes, la curva de la tasa de aumento de ambas corrientes se muestra en líneas punteadas, y sólo aquellas partes de la curva que indican la velocidad de aumento dentro del rango de medición se dibujan en un estilo continuo.

Con el fin de determinar la tasa de aumento de corriente para ser utilizada como un valor de ajuste, para cada uno de las dos curvas (con y sin componente DC), el valor máximo de la tasa de aumento de corriente tiene que ser calculada mientras el valor instantáneo de la corriente esté dentro del rango de medición.

En general, tal como aparece en la figura 3.16, estos son la tasa de aumento en el límite superior del rango de medición ( $i_1$ ) para la corriente  $i_0$  y, la tasa de aumento de corriente en el límite inferior del rango de medición ( $i_2$ ) para la corriente  $i_{90}$ . El más pequeño de estos dos valores, da entonces la tasa de ajuste de aumento de corriente  $(di/dt)_T$ .



**Fig 3.16** Casos para la determinación de las Tasas de aumento de corriente

La tasa de aumento de las dos curvas de corriente (con y sin componente DC) dentro del rango de medición ( $i_2$  a  $i_1$ ) se calcula con las ecuaciones (3.5) y (3.6).

**Recorrido de la Corriente en forma general:**

$$i = \hat{i} [\text{sen}(\omega t + \psi + \varphi) e^{-R/X \cdot \omega t} \cdot \text{sen}(\psi - \varphi)] \quad (3.5)$$

Donde:

$\hat{i}$  = Valor pico del valor de disparo

$$(\hat{i} = I_T \cdot \sqrt{2})$$

$\Phi$  = Ángulo de fase entre la tensión y corriente de cortocircuito

$$(\varphi \text{ puede ser calculada a partir de } \text{tg } \varphi = X / R)$$

$\Psi$  = ángulo de conmutación en el que el cortocircuito se produce, en relación con el voltaje de la fuente ( $\Psi = 0$ , entonces cortocircuito ocurre con voltaje cero).

$i_0$  = Corriente debida a componente DC (cortocircuito ocurre cuando en voltaje es cero,  $\Psi = 0^\circ$ )

$i_{90}$  = Corriente sin componente DC (cortocircuito ocurre casi al máximo voltaje, cuando  $|\Psi - \varphi| = 0^\circ$ )

#### Tasa de aumento de la Corriente en forma general

$$di/dt = \hat{i} \cdot \omega [\cos(\omega t + \Psi - \varphi) + (R/X) \cdot e^{-R/X \cdot \omega t} \cdot \sin(\Psi - \varphi)] \quad (3.6)$$

Con un programa computacional, los valores de  $\omega t$ , en los límites del rango de medición, pueden ser calculados mediante la ecuación (5), ( $i_2 \rightarrow \omega t_2$ ,  $i_1 \rightarrow \omega t_1$ ). Entonces, para la ecuación (3.6), el valor máximo de la tasa de aumento tiene que ser determinada, mientras el valor instantáneo de la corriente esté dentro del rango de medición, es decir,

$$\omega t_2 \leq \omega t \leq \omega t_1$$

Este cálculo debe ser hecho para los dos recorridos de corriente (con y sin componente DC). El menor de estos dos valores así obtenidos de la tasa de aumento nos conduce a la tasa de aumento de corriente  $(di / dt)_T$

Deberemos encontrar el valor crítico de disparo que se utilizará en el Limitador de Corriente de Falla. Si excedemos este valor, habremos encontrado el valor de disparo del limitador de corriente de falla. Este valor límite se llama "valor de disparo", el cual siempre se expresa como valor eficaz en amperios.

#### 3.5.8 Aplicación de los Limitadores de Corriente de Falla en Sistemas Eléctricos de Potencia

Una primera aplicación [3] consiste en utilizar los FCL's para proteger aquellos órganos de protección que por alguna razón han quedado subdimensionados, es decir, cuya capacidad de cortocircuito ha sido superada. Un ejemplo de esto, podría ser algún sistema eléctrico que ha crecido y las contribuciones de cortocircuito han superado el límite de diseño de uno o varios equipos de protección. Normalmente estos equipos de protección son los interruptores de potencia cuya capacidad de soportar los transitorios debidos al cortocircuito (máxima corriente asimétrica de falla del primer ciclo ó *Closing and Latching Capability*) o la capacidad interruptiva quedan abajo del valor real de las contribuciones de cortocircuito. Las características de alta conducción nominal de corriente y apertura de valores altos de corrientes de cortocircuito en menos de  $1/4$  de ciclo hace que los FCL's puedan liberar la falla antes de que esta alcance el valor máximo para el cual fue diseñado el interruptor de potencia. Adicionalmente, debido a que el tiempo nominal de separación de contactos (*Contact Parting Time*) de un interruptor no es menor a 2 ciclos, el FCL actuará antes de la apertura. Con este mismo concepto, también se puede aplicar un FCL para poder escoger interruptores de potencia con una capacidad interruptiva más baja que la requerida por el sistema eléctrico con el fin de ahorrar en el precio del interruptor. Entre más capacidad interruptiva tiene un interruptor de potencia, el precio es mayor.

### a. Aplicación del FCL en la interconexión de Sistemas.

La aplicación, que posiblemente es la más importante y la cual es el objeto del presente trabajo, está basada en el mismo concepto de la aplicación anterior. Esta consiste en usar el FCL para proteger sistemas eléctricos que se interconectan y que aumentan las contribuciones de cortocircuito en los distintos puntos de la red. Al aumentar las contribuciones de cortocircuito (debido a la interconexión de dos o más sistemas que no fueron diseñados para operar en paralelo) muchos de los equipos de protección quedan subdimensionados en el sistema interconectado. Esto coloca a dichos equipos en una situación de riesgo al momento de que ocurra una falla pues no serían capaces de liberarla apropiadamente. Al colocar un FCL entre cada interconexión, estos protegen a los sistemas individuales ya que el valor de disparo se escoge de tal forma de que cuando las contribuciones superen el límite establecido por la red individual (que normalmente será el límite de los equipos de protección) este actuará abriendo la interconexión y evitando que las contribuciones de los otros sistemas contribuyan al cortocircuito. Al igual que en la aplicación anterior, estos equipos de protección normalmente son los interruptores de potencia.

En la figura 3.17 se puede apreciar la interconexión de 2 sistemas, donde una corriente de cortocircuito de 50 kA puede fluir a través de cada transformador.

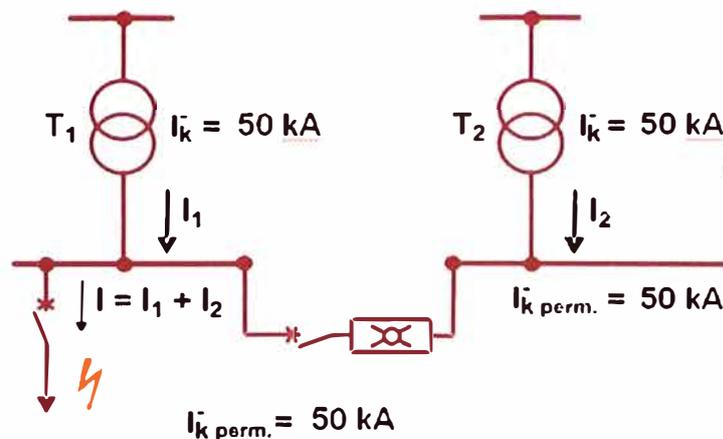


Fig 3.17 Caso Interconexión de 2 sistemas

Esto daría lugar a un total de corriente de cortocircuito de 100 kA, que es el doble que la capacidad del interruptor.

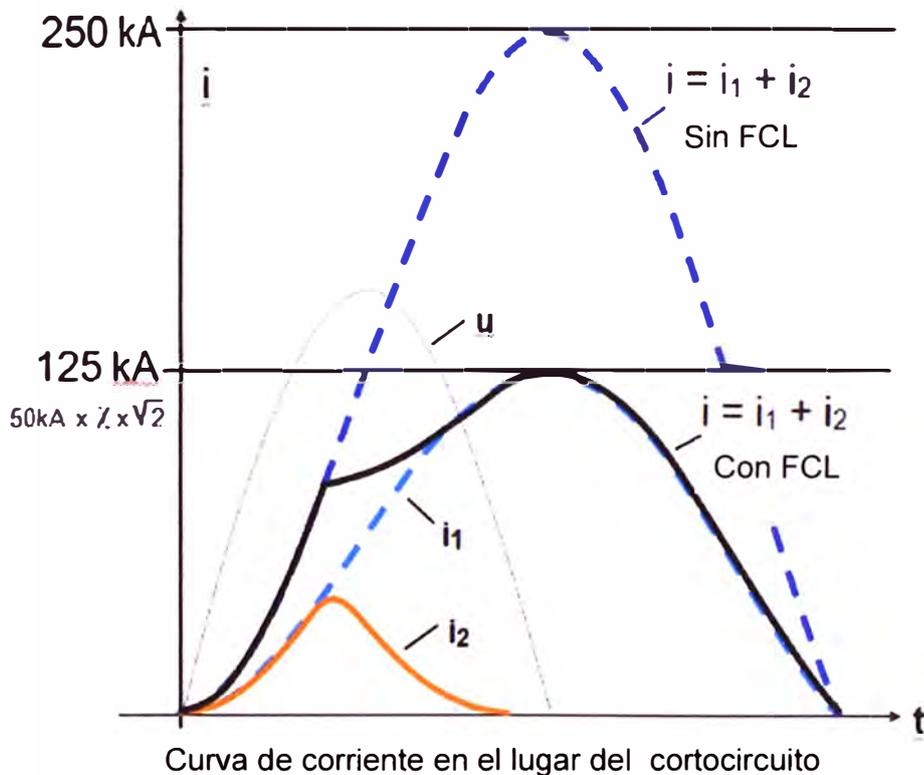
En tal caso, el curso de la corriente a través del FCL se muestra como la corriente  $I_2$ . Se puede observar que el FCL funciona tan rápidamente, que no existe una contribución a través del transformador  $T_2$  para el total del pico corriente de cortocircuito

$(I_1 + I_2)$ . Por lo tanto, un interruptor con una capacidad de 50 kA sería adecuado para esta aplicación

**b. Aplicación del FCL como un enlace entre redes públicas y redes de consumidores privados.**

La descentralización de las fuentes de alimentación ha dado lugar a sistemas con sus propias instalaciones eléctricas de generación, que están interconectadas con las redes de suministro público.

La corriente adicional de cortocircuito originada por estos generadores, conduce a que los niveles admisibles de corriente de cortocircuito en la red de suministro público sean excedidos. La solución técnica más adecuada – quizás la única - sea la aplicación de los FCLs en la interconexión con la red de suministro público. (Figura 3.19).



**Fig 3.18.** Limitación de la corriente de cortocircuito por medio de un FCL

Si es necesario, el FCL puede estar provisto de un criterio de disparo direccional. Esto requiere contar con tres transformadores de corriente adicionales en las conexiones neutras de los generadores. El FCL sólo disparará para cortocircuitos en la red de suministro público, sólo si el generador está en operación.

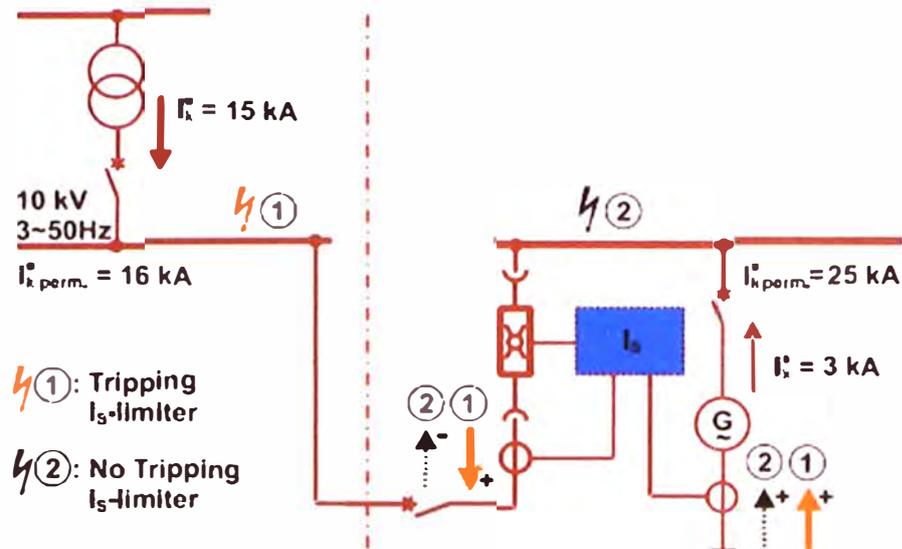


Fig 3.19 Aplicación del FCL como un enlace entre red pública y red de consumidores privados.

c. Aplicación del FCL en paralelo con un reactor.

El FCL también [3] se puede conectar en paralelo con un reactor (Figura 3.20). Si un corto-circuito detrás del reactor, el FCL dispara y la corriente conmuta en el primer aumento de corriente al reactor en paralelo, lo que limita la corriente de cortocircuito al nivel permisible.

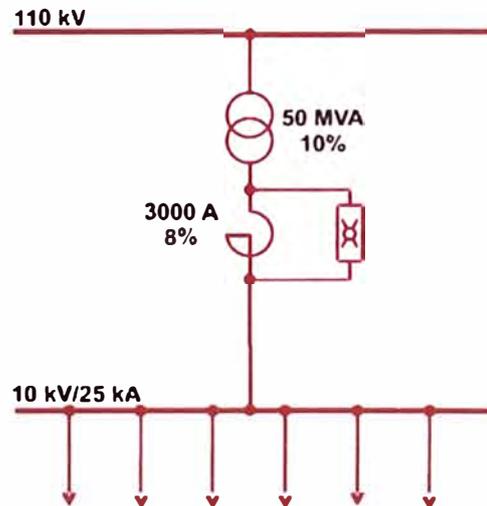


Fig. 3.20 Aplicación del FCL en paralelo con un reactor

Esto evita:

- Corriente dependiente de las pérdidas en el Cu y los costos asociados al reactor.

- Corriente dependiente de la caída de tensión en el reactor, lo que generalmente produce muchas dificultades en el arranque de grandes motores.
- Problemas de control con el generador.

**CAPÍTULO IV**  
**EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIONES PARA LIMITAR EL NIVEL DE CORTOCIRCUITOS EN LA SUBESTACIÓN PRINCIPAL TOROMOCHO 220 / 23 kV**

**4.1 Aumento de la Impedancia de Transformadores de Potencia 220 / 23KV**

**4.1.1 Impedancia del Transformador**

Se aumentarán las impedancias de los transformadores de distribución suministrados por ABB y, los correspondientes ratios X/R típicos serán generados por el programa ETAP.

Se ha considerado una tolerancia en la impedancia de 10%, para tener en cuenta las posibles diferencias entre los valores de impedancias presentes y futuras.

Se puede notar que las impedancias de los Transformadores Principales 220/ 23kV se ha incrementado de 8 % a 12 %, el resto de impedancias se mantienen, tal como indica la Tabla N°. 4.1.

**Tabla N° 4.1** Impedancias y Ratio X/R de Transformadores de Proyecto Toromocho

Tensión	Ratio MVA	Tipo de Enfriamiento	% Z Impedancia	Ratio X/R
220/23 kV	75/110	ONAN/ONAF	12.0	34.1
23/7.2 kV	7.5/8.4	ONAN 55/65°C	8.35	14.23
23/4.16 kV	15/20	ONAN/ONAF	8.00	18.6
23/4.16 kV	7.5/10	ONAN/ONAF	6.5	14.23
23/4.16 kV	5/5.6	ONAN 55/65°C	6.5	12.14
23/4.16 kV	0.75/0.84	ONAN 55/65°C	6.5	3.96
23/0.4 kV	1.5/1.68	ONAN 55/65°C	5.75	7.10
23/0.4 kV	0.75/0.84	ONAN 55/65°C	5.75	3.96
23/0.4 kV	0.5/0.56	ONAN 55/65°C	5.75	3.09
23/0.4 kV	0.3/0.336	ONAN 55/65°C	4.0	3.09
23/0.4 kV	0.25/0.28	ONAN 55/65°C	6.75	3.09
23/0.4 kV	0.075/0.084	ONAN 55/65°C	4.0	2.47
23/0.4 kV	0.05/0.056	ONAN 55/65°C	6.75	2.47

4.16/0.4 kV	2.5/3	ONAN/ONAF	6.5	10.67
4.16/0.4 kV	2.5/2.8	ONAN 55/65°C	6.5	10.67
4.16/0.4 kV	1.5/1.68	ONAN 55/65°C	5.75	7.10
4.16/0.4 kV	0.75/0.84	ONAN 55/65°C	5.75	3.96
4.16/0.4 kV	0.5/0.56	ONAN 55/65°C	4.0	3.09
4.16/0.4 kV	0.3/0.336	ONAN 55/65°C	4.0	3.09
4.16/0.4 kV	0.075/0.084	ONAN 55/65°C	2.6	1.92

#### 4.1.2 Transformadores Principales de Potencia 220 / 23 kV e Interruptores de Subestación Principal en 23kV

Uno de los siguientes escenarios de operación será considerados, dependiendo del estudio del caso que se realice:

- T1,T2,T3 (B1 NC, B2 NC, B3 NC), B4 NC, B5 NC
- T1,T2,T3 (B1 NC, B2 NC, B3 NC), B4 NA, B5 NA
- T1,T3 (B1 NC, B2 NA, B3 NC), B4 NC, B5 NC
- T1,T2 (B1 NC, B2 NC, B3 NA), B4 NC, B5 NC

#### 4.1.3 Transformadores de Distribución e Interruptores Acopladores

Todos los interruptores de distribución operacional y los interruptores de acoplamiento de barras en media y baja tensión abiertos, tal como se aprecia en la figura 4.1.

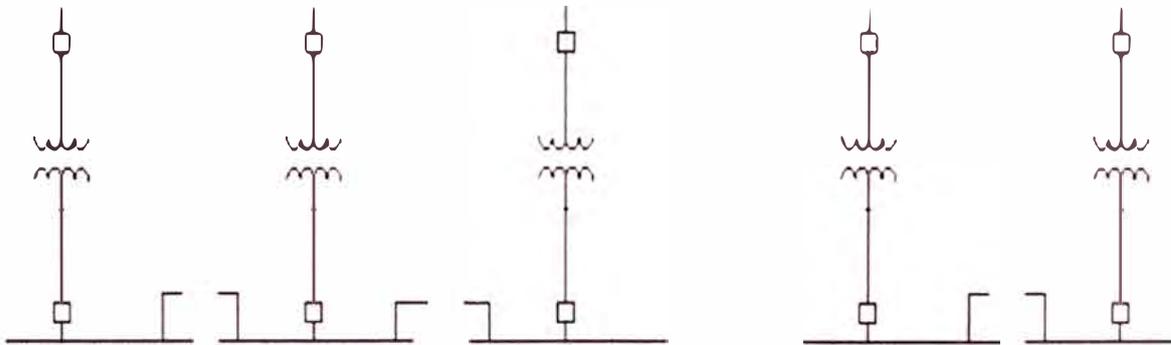


Fig. 4.1 Diagrama acoplamiento Transformadores de Distribución

#### 4.1.4 Escenario de Operación de la Planta

- Planta Completa en Operación (10 bombas PD )
- Fase II en Funcionamiento

#### 4.1.5 Impedancias de los Cables y Líneas Aéreas

El tamaño, número y tipo de los cables alimentadores fueron determinados en los estudios correspondientes del Proyecto.

La determinación del calibre de los cables para los motores de media tensión estuvo basada en los amperios a plena carga, y en los siguientes factores:

- Nivel de Aislamiento de 133% y pantalla de 5kV para sistemas en 4.16kV.
- Cables con conductor simple.
- Menos de 2% de caída de tensión.

Usando la información descrita, ETAP genera las impedancias de las líneas y los cables, por fase y por conductor respectivamente.

#### 4.1.6 Contribución de los Motores y Cargas

Los motores contribuyen a las Corrientes de cortocircuito de acuerdo a su reactancia.

Los motores que trabajan con Variadores de Velocidad, no tienen ninguna contribución a las corrientes de cortocircuito.

Los parámetros de los motores (LRC, torque mínimo y máximo, factor de potencia, eficiencia, etc.) para los motores de media tensión están de acuerdo a las hojas de datos proporcionadas por WEG o las proporcionadas por los manuales de los fabricantes de los equipos.

Los parámetros de impedancia fueron estimados usando la función Estimación de Parámetros en ETAP.

Los motores en baja tensión fueron agrupados por MCC como una carga grupal.

La contribución de cortocircuito son consideradas en los cálculos de  $I''_k$  (corriente de cortocircuito simétrica inicial) e  $i_p$  (corriente de cortocircuito pico) de acuerdo a IEC60909.

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito se considera que la reactancia de estos transformadores es de un valor de:

$$X = 12\%$$

La figura 4.2 muestra el esquema simplificado unifilar del "Proyecto Toromocho, para esta consideración.

Donde:

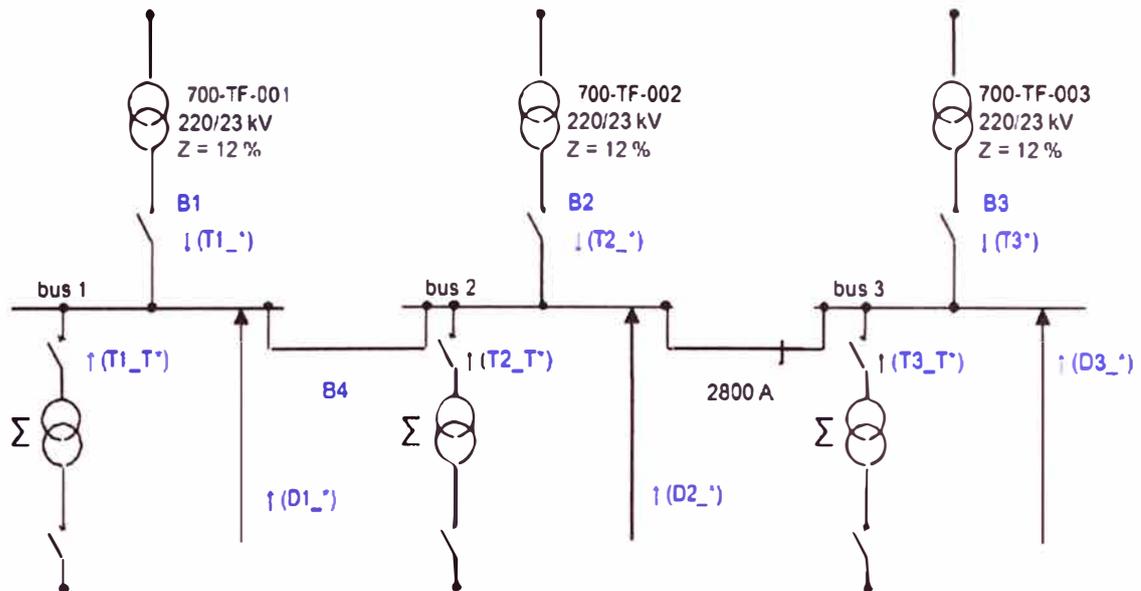
$Tx_*$  = Corriente de Falla contribuida por el transformador 700-TF-00x

$Tx_T*$  = Sumatoria de Corrientes de Falla contribuidas a través de los transformadores conectados aguas abajo del sistema

$Dx_*$  = Sumatoria de Corrientes de Falla contribuidas por todas las cargas ubicadas aguas abajo del sistema

$Bx$  = Interruptor de llegada o de acoplamiento

Las diferentes condiciones de falla y por lo tanto la contribución de cada parte del sistema se toman del Estudio de Corto Circuito del Proyecto Toromocho, que figura en el Anexo B del presente documento.



**Fig.4.2** Diagrama Unifilar Simplificado del Proyecto Toromocho, para Transformadores con  $Z=12\%$

Debajo la Tabla N°. 4.2. representa los diferentes casos con los valores respectivos derivados de la misma.

**Máxima Corriente de Cortocircuito Simétrica:**

Donde observamos que los niveles de cortocircuito son altos, sólo para el Caso 1 que es de 44.064 kA. Sin embargo, para los Casos 3 y 4 es de 35.164 que es un valor aceptable y manejable, es decir:

$$44.064 \text{ kA} > 40 \text{ kA} \text{ (Caso 1)}$$

Valor que supera los 40kA que es la máxima corriente de interrupción que pueden manejar los interruptores de potencia.

Los análisis de cortocircuito muestran que, a pesar de que se han disminuido los niveles de cortocircuito en la Barra de 23 kV de la Subestación Toromocho, aún hay valores elevados que superan los valores de la capacidad de ruptura o poder de corte de los interruptores en 23 kV .

Si la corriente de cortocircuito se establece a un valor superior al poder de corte de un interruptor, éste no podrá interrumpirla, y se destruirá.

En tal sentido, se deben investigar la opción de instalar un Fusible Limitador de Corriente (FCL) para disminuir los valores de cortocircuito en la Subestación Toromocho a valores que no superen los 40 kA en la barra de 23 kV., que son los valores máximos de ruptura que pueden manejar los interruptores en 23 kV.

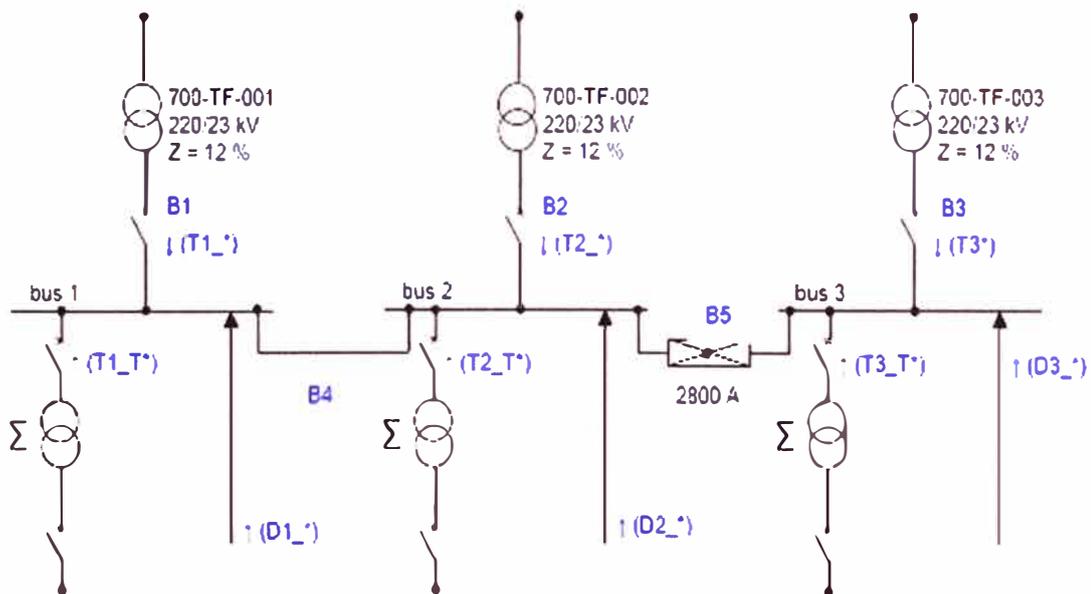
**Tabla N° 4.2** Corriente de Cortocircuito para los casos estudiados

CASO	DESCRIPCION	T1_ [kA]	T1_T [kA]	D1_ [kA]	T2_ [kA]	T2_T [kA]	D2_ [kA]	T3_ [kA]	T3_T [kA]	D3_ [kA]	Bus Max [kA]
1	B1,B2,B3,B4,B5= cerrados	11.86	1.231	1.707	11.85	0.347	1.543	11.85	0.645	3.031	<b>44.064</b>
2	B1,B2,B3 = cerrados B4,B5 = abiertos	15.32	1.231	1.707	15.33	0.347	1.543	15.31	0.645	3.031	18.986
3	B1,B3,B4,B5 = cerrados B2 = abierto	13.33	1.231	1.707	-	0.347	1.543	13.33	0.645	3.031	35.164
4	B1,B2,B4,B5 = cerrados B3 = abierto	13.33	1.232	1.707	13.33	0.347	1.543	-	0.645	3.031	35.164

## 4.2 Uso de Limitadores de Corriente de Falla en Barra 23 kV

### 4.2.1 General

Para evitar que la corriente de cortocircuito exceda los 40kA, que es el máximo de la capacidad máxima de ruptura disponible en los interruptores de la subestación principal, se instalará un Limitador de Corriente de Falla (FLC) entre las barras 2 y 3 de la Subestación principal. Este estudio proporciona las bases para el diseño de este FLC.



**Fig. 4.3** Diagrama Unifilar Simplificado del Proyecto Toromocho con la Aplicación del Limitador de Corriente de Falla FCL

### 4.2.2 Nivel de Cortocircuito (Subestación Pomacocha ) y Líneas Aéreas 220kV

Máxima corriente de cortocircuito disponible en la doble terna de la Línea de Transmisión 220kV Pomacocha-Toromocho (totalmente operativa).

### 4.2.3 Transformadores Principales de Potencia 220 / 23 kV e Interruptores de Subestación Principal en 23kV

- T1,T2,T3 (B1 NC, B2 NC, B3 NC), B4 NC, B5 NC
- T1,T2,T3 (B1 NC, B2 NC, B3 NC), B4 NA, B5 NA
- T1,T3 (B1 NC, B2 NA, B3 NC), B4 NC, B5 NC
- T1,T2 (B1 NC, B2 NC, B3 NA), B4 NC, B5 NC
- Limitador de Corriente de falla FLC entre barras 2 y 3 NA

Donde:

$Tx_{*}$  = Corriente de Falla contribuida por el transformador 700-TF-00x

$Tx_{T*}$  = Sumatoria de Corrientes de Falla contribuidas a través de los transformadores conectados aguas abajo del sistema.

$Dx_{*}$  = Sumatoria de Corrientes de Falla contribuidas por todos las cargas ubicadas aguas abajo del sistema.

$Bx$  = Interruptor de llegada o de acoplamiento.

### 4.2.4 Transformadores de Distribución e Interruptores Acopladores

Todos los interruptores de distribución operacional y los interruptores de acoplamiento de barras en media y baja tensión abiertos.

### 4.2.5 Escenario de Operación de la Planta

- Planta Completa en Operación (10 bombas PD)
- Fase II en Funcionamiento

### 4.2.6 Casos de Estudio

Se desarrollaron estudios de Cortocircuito para el Limitador de Corriente de Falla (FCL) para los siguientes modos de operación:

**Tabla N° 4.3** Modos de Operación para los estudios de cortocircuito

Caso	Corto Circuito Disponible	Líneas 220 kV	Operación de Transformadores de Potencia	Operación de la Planta	Cargas
1	Máximo	2 Líneas	T1,T2,T3 (B1 NC, B2 NC, B3 NC), B4 NC, B5 NC	Planta Completa (10 Bombas PD)	Fase II Operando
2	Máximo	2 Líneas	T1,T2,T3 (B1 NC, B2 NC, B3 NC), B4 NA, B5 NA	Planta Completa (10 Bombas PD)	Fase II Operando
3	Máximo	2 Líneas	T1,T3 (B1 NC, B2 NA, B3 NC), B4 NC, B5 NC	Planta Completa (10 Bombas PD)	Fase II Operando
4	Máximo	2 Líneas	T1,T2 (B1 NC, B2 NC, B3 NA), B4 NC, B5 NC	Planta Completa (10 Bombas PD)	Fase II Operando

#### 4.2.7 Resultados del Estudio de Cortocircuito con el FCL

En la Tabla N° 4.4 se presentan los resultados de los estudios de cortocircuito con el Limitador de Corriente de Falla en la subestación principal, 700-SG-001, para las condiciones de operación indicadas:

**Tabla N° 4.4 Resultados de Estudios cortocircuito con FCL**

		700-SG-001 Barra 1			700-SG-001 Barra 2			700-SG-001 Barra 3		
Caso	Operación de Transformadores de Potencia	I''k (kA)	I <sub>p</sub> (kA)	I <sub>k</sub> (kA)	I''k (kA)	I <sub>p</sub> (kA)	I <sub>k</sub> (kA)	I''k (kA)	I <sub>p</sub> (kA)	I <sub>k</sub> (kA)
1	T1,T2,T3, B4 NC, B5	44.0	112.0	35.6	44.0	112.0	35.6	44.0	112.0	35.6
2	T1,T2,T3, B4 NA, B5	18.2	47.5	15.2	17.2	45.0	15.2	18.9	49.0	15.2
3	T1,T3, B4 NC, B5 NC	35.1	89.3	26.7	35.1	89.3	26.7	35.1	89.3	26.7
4	T1,T2, B4 NC, B5 NC	35.1	89.3	26.7	35.1	89.3	26.7	35.1	89.3	26.7

Los resultados del cálculo de corriente de cortocircuito para la corriente inicial simétrica, utilizando ETAP son mostrados en el Anexo B.

#### 4.3 Estudio de la Corriente Mínima de Corto Circuito.

Los Valores de corriente mínima de cortocircuito diferencian un cortocircuito y una sobrecarga y, se utilizan para definir la configuración de un dispositivo de protección la cual puede ser, por ejemplo para selección de fusibles o para fijar la coordinación de los dispositivos de protección

La corriente mínima de cortocircuito se calcula en la base a la mínima corriente de cortocircuito disponible de la empresa proveedora de energía eléctrica, los valores mínimos para el factor C y los valores mínimos de impedancia (tolerancia de impedancia cero porciento).

Las condiciones de funcionamiento más desventajosas han sido consideradas en el estudio de la mínima corriente de cortocircuito.

##### 4.3.1 Nivel de Cortocircuito (Subestación Pomacocha) y Línea de Transmisión en 220 kV

- **Mínimo** nivel de cortocircuito disponible y **una sola terna** de la línea de transmisión Pomacocha - Toromocho 220 kV. (Sólo un circuito operativo).

### 4.3.2 Transformadores Principales de Potencia 220 / 23 kV e Interruptores de Subestación Principal en 23kV

- 2 Transformadores Principales 220-23kV operativos y los interruptores principales cerrados.
- T1, T3 (B1 NC, B2 NA, B3 NC), B4 NC, B5 NA
- Limitador de Corriente de Falla FLC (entre barras 2 y 3 de la Subestación Principal).NC

### 4.3.3 Transformadores de Distribución e Interruptores Acopladores

Todos los interruptores de distribución operacional y los interruptores de acoplamiento de barras en media y baja tensión abiertos.

### 4.3.4 Escenario de Operación de la Planta

- Planta Completa en Operación (10 bombas PD)
- Fase II en Funcionamiento

### 4.3.5 Resultados de Corriente Mínima de Cortocircuito

En la Tabla N° 4.5 se detallan los resultados de la corriente mínima de cortocircuito, para los diferentes niveles de tensión del sistema.

Como se puede observar de los resultados, todas las clasificaciones de servicio de equipamiento del equipo de maniobra y centros de control de motores tienen la clasificación adecuada para soportar adecuadamente las fuerzas generadas a partir de las corrientes de falla. Las corrientes de falla simétrica inicial no exceda los valores nominales de interrupción simétricas y las corrientes máximas de cortocircuito no superen la capacidad de ruptura pico:

**Tabla N° 4.5** Resultados de Corriente Mínima de Cortocircuito

		Capacidad del equipo		I <sub>cc</sub> Min Trifásica (kA)			I <sub>cc</sub> Min Falla a Tierra (kA)		
Barra con Falla	kV nom	Capacidad ruptura simétr. (kA)	Capacidades ruptura pico (kA)	I'' <sub>k</sub>	ip	Ik	I'' <sub>k</sub>	ip	Ik
<b>Nivel de Tensión 23kV</b>									
700-SG-001 Barra1	23	40	104	22.8	58.0	17.2	0.4	1.0	0.4
700-SG-001	23	40	104	22.8	58.0	17.2	0.4	1.0	0.4
700-SG-001	23	40	104	22.0	56.2	17.2	0.4	1.0	0.4
<b>Nivel de Tensión 7.2kV</b>									
110-SG-001	7.2	25	65	5.1	11.6	5.0	0.0	0.1	0.0
110-SG-002	7.2	25	65	4.7	10.6	4.6	0.0	0.1	0.0
110-SG-003	7.2	25	65	5.0	11.3	4.9	0.0	0.1	0.0

<b>Nivel de Tensión 4.16kV</b>									
200-MV-001	4.16	40	104	9.6	22.5	7.3	0.2	0.5	0.2
200-MV-002	4.16	40	104	10.0	23.2	7.5	0.2	0.5	0.2
200-MV-003	4.16	40	104	13.7	33.0	11.3	0.2	0.5	0.2
205-MV-001	4.16	40	104	13.3	32.2	9.4	0.2	0.5	0.2
210-SG-001	4.16	40	104	14.8	37.3	13.4	0.2	0.5	0.2
210-SG-001	4.16	40	104	15.9	39.7	13.4	0.2	0.5	0.2
210-SG-001	4.16	40	104	14.7	37.1	13.4	0.2	0.5	0.2
220-MV-001	4.16	40	104	27.1	67.4	19.3	0.2	0.5	0.2
220-MV-002	4.16	40	104	27.2	67.6	19.4	0.2	0.5	0.2
220-MV-003	4.16	40	104	27.4	68.1	19.4	0.2	0.5	0.2
220-MV-004	4.16	40	104	27.4	68.1	19.4	0.2	0.5	0.2
220-SG-001	4.16	40	104	28.4	72.6	20.1	0.2	0.5	0.2
220-SG-001	4.16	40	104	28.6	73.2	20.1	0.2	0.5	0.2
230-MV-001	4.16	40	104	27.2	66.4	18.8	0.2	0.5	0.2
230-MV-001	4.16	40	104	25.6	63.0	18.8	0.2	0.5	0.2
255-MV-001	4.16	40	104	21.1	54.7	19.9	0.2	0.5	0.2
255-MV-001	4.16	40	104	21.1	54.7	19.9	0.2	0.5	0.2
255-MV-001	4.16	40	104	21.3	54.9	19.9	0.2	0.5	0.2
255-MV-002	4.16	40	104	1.8	3.7	1.5	1.7	3.6	1.7
280-MV-001	4.16	40	104	15.4	37.8	12.7	0.2	0.5	0.2
280-MV-001	4.16	40	104	15.6	38.3	12.7	0.2	0.5	0.2
800-MV-001	4.16	40	104	8.6	20.0	6.3	0.2	0.5	0.2
800-MV-002	4.16	40	104	7.9	17.9	5.0	0.2	0.5	0.2
<b>Nivel de Tensión 0.4kV</b>									
140-LV-001	0.4	65	169	29.9	64.7	27.2	27.9	60.4	27.9
140-MC-001	0.4	65	169	20.9	42.2	19.6	17.3	34.9	17.3
140-MC-002	0.4	65	169	21.3	43.1	19.6	17.5	35.3	17.5
140-MC-003	0.4	65	169	21.6	43.6	19.6	17.6	35.5	17.6
200-LV-001	0.4	65	169	30.3	65.3	22.0	28.1	60.5	28.1
200-MC-001	0.4	65	169	22.9	46.2	16.7	18.2	36.5	18.2
200-MC-002	0.4	65	169	23.3	46.8	16.7	18.3	36.8	18.3
200-MC-003	0.4	65	169	14.9	30.1	12.6	13.5	27.3	13.5
200-MC-004	0.4	65	169	16.8	33.7	13.4	14.5	29.0	14.5
205-LV-001	0.4	65	169	53.0	122.7	35.4	54.4	126.0	54.4
205-MC-001	0.4	65	169	35.4	71.8	23.6	27.1	55.0	27.1
205-MC-002	0.4	65	169	34.8	70.7	23.6	26.9	54.5	26.9
205-MC-003	0.4	65	169	31.3	63.6	23.6	25.4	51.6	25.4
210-LV-001	0.4	65	169	51.7	122.4	40.0	53.6	126.9	53.6
210-LV-001	0.4	65	169	51.3	121.9	40.0	53.3	126.6	53.3
210-LV-001	0.4	65	169	49.6	118.5	40.1	52.1	124.4	52.1
210-MC-001	0.4	65	169	32.8	67.3	25.6	26.1	53.5	26.1
210-MC-002	0.4	65	169	31.6	65.0	25.6	25.6	52.6	25.6
210-MC-003	0.4	65	169	35.5	72.9	25.6	27.2	55.8	27.2
210-MC-004	0.4	65	169	35.6	73.0	25.6	27.2	55.8	27.2

210-MC-005	0.4	65	169	34.9	72.0	25.6	26.9	55.6	26.9
210-MC-006	0.4	65	169	29.3	60.7	25.6	24.6	50.9	24.6
210-MC-007	0.4	65	169	30.1	62.3	25.6	24.9	51.6	24.9
220-LV-001	0.4	65	169	55.6	133.8	44.5	56.4	135.8	56.4
220-LV-001	0.4	65	169	54.3	131.5	44.5	55.5	134.3	55.5
220-LV-001	0.4	65	169	52.1	127.2	44.5	53.9	131.7	53.9
220-MC-001	0.4	65	169	39.9	83.1	29.2	30.7	63.8	30.7
220-MC-002	0.4	65	169	38.0	79.5	29.2	29.9	62.5	29.9
220-MC-003	0.4	65	169	33.4	70.4	29.2	27.9	58.9	27.9
220-MC-004	0.4	65	169	32.9	69.8	28.9	27.7	58.6	27.7
220-MC-005	0.4	65	169	37.5	78.2	28.9	29.6	61.9	29.6
220-MC-006	0.4	65	169	34.3	72.3	29.2	28.3	59.7	28.3
220-MC-007	0.4	65	169	29.3	61.3	27.1	24.6	51.3	24.6
220-MC-008	0.4	65	169	21.4	42.0	19.6	16.2	31.8	16.2
230-LV-001	0.4	65	169	52.2	126.2	43.8	53.9	130.2	53.9
230-LV-001	0.4	65	169	56.5	133.8	43.2	56.9	134.7	56.9
230-LV-002	0.4	65	169	53.5	128.6	43.8	54.8	131.7	54.8
230-LV-002	0.4	65	169	49.5	121.0	43.8	52.0	126.9	52.0
230-MC-001	0.4	65	169	32.0	66.1	27.1	25.7	53.2	25.7
230-MC-002	0.4	65	169	31.6	65.4	27.1	25.6	52.9	25.6
230-MC-003	0.4	65	169	30.0	62.2	27.1	24.9	51.5	24.9
230-MC-004	0.4	65	169	43.8	91.6	30.3	33.9	70.9	33.9
245-MC-001	0.4	65	169	29.6	61.7	25.3	24.7	51.4	24.7
245-MC-002	0.4	65	169	30.2	62.8	25.3	25.0	51.9	25.0
251-MC-001	0.4	65	169	24.2	49.6	18.5	22.3	45.7	22.3
251-MC-002	0.4	65	169	38.9	88.2	33.5	39.0	88.3	39.0
255-LV-001	0.4	65	169	46.1	114.7	44.4	49.4	123.0	49.4
255-LV-001	0.4	65	169	46.1	114.8	44.4	49.5	123.1	49.5
255-LV-001	0.4	65	169	49.2	120.5	44.4	51.8	126.9	51.8
255-MC-001	0.4	65	169	28.7	60.8	27.3	24.3	51.5	24.3
255-MC-002	0.4	65	169	27.9	59.1	27.3	23.9	50.7	23.9
255-MC-003	0.4	65	169	28.8	60.9	27.3	24.3	51.5	24.3
255-MC-004	0.4	65	169	30.1	63.1	27.3	24.9	52.2	24.9
255-MC-005	0.4	65	169	30.9	64.7	27.3	25.3	52.9	25.3
260-LV-001	0.4	65	169	53.9	130.6	44.5	55.2	133.8	55.2
260-MC-001	0.4	65	169	32.3	66.8	27.3	25.9	53.5	25.9
260-MC-002	0.4	65	169	32.5	67.1	27.3	26.0	53.7	26.0
260-MC-003	0.4	65	169	22.4	43.9	19.6	16.6	32.5	16.6
280-LV-001	0.4	65	169	46.9	112.8	39.3	50.0	120.5	50.0
280-LV-001	0.4	65	169	47.4	113.9	39.3	50.4	121.2	50.4
280-LV-002	0.4	65	169	46.5	112.3	39.3	49.8	120.1	49.8
280-LV-002	0.4	65	169	47.8	114.8	39.3	50.7	121.8	50.7
280-MC-001	0.4	65	169	47.8	114.8	39.3	50.7	121.8	50.7
280-MC-002	0.4	65	169	32.2	66.9	25.3	25.9	53.7	25.9
280-MC-003	0.4	65	169	28.6	59.8	25.3	24.2	50.6	24.2

280-MC-004	0.4	65	169	29.3	61.0	25.3	24.5	51.1	24.5
280-MC-005	0.4	65	169	31.2	65.1	25.3	25.4	53.0	25.4
280-MC-006	0.4	65	169	29.3	61.2	25.3	24.6	51.2	24.6
280-MC-007	0.4	65	169	30.9	64.4	25.3	25.3	52.7	25.3
400-MC-001	0.4	65	169	41.7	94.8	34.9	40.7	92.7	40.7
800-US-003	0.4	65	169	19.7	39.6	15.2	18.0	36.3	18.0

#### 4.4 Estudio de la Corriente Máxima de Corto Circuito.

Los valores máximos de corriente de cortocircuito se utilizan para especificar la capacidad de resistir de los equipos eléctricos (barras, centros de control de motores, interruptores, etc.), y para definir las capacidades de interrupción de los dispositivos de protección.

El cortocircuito máximo se calcula basándose en la máxima corriente de cortocircuito de la empresa proveedora de energía eléctrica, valores máximos para el factor C y la impedancia máxima (tolerancia máxima de impedancia).

Se han considerado las condiciones más adversas de operación para el estudio de cortocircuito máximo:

##### 4.4.1 Nivel de Cortocircuito (Subestación Pomacocha) y Línea de Transmisión en 220 kV.

- Máximo nivel de cortocircuito disponible y **doble terna** de la línea de transmisión Pomacocha - Toromocho 220 kV. (Totalmente operativa).

##### 4.4.2 Transformadores Principales de Potencia 220 / 23 kV e Interruptores de Subestación Principal en 23kV

- 3 Transformadores Principales 220-23kV operativos y los interruptores principales cerrados.
- T1, T2, T3 (B1 NC, B2 NC, B3 NC), B4 NC, B5 NA.
- Limitador de Corriente de Falla FLC (entre barras 2 y 3 de la Subestación Principal) NC.

##### 4.4.3 Transformadores de Distribución e Interruptores Acopladores

Todos los interruptores de distribución operacional y los interruptores de acoplamiento de barras en media y baja tensión abiertos.

##### 4.4.4 Escenario de Operación de la Planta

- Planta Completa en Operación (10 bombas PD )
- Fase II en Funcionamiento

##### 4.4.5 Resultados de Corriente Máxima de Corto Circuito.

En la Tabla No.4.6 se detallan los resultados de la corriente mínima de cortocircuito, para los diferentes niveles de tensión del sistema.

Como se puede observar de los resultados, todas las clasificaciones de servicio de equipamiento del equipo de maniobra y centros de control de motores tienen la clasificación adecuada para soportar adecuadamente las fuerzas generadas a partir de las corrientes de falla. Las corrientes de falla simétrica inicial no exceda los valores nominales de interrupción simétricas y las corrientes máximas de cortocircuito no superen la capacidad de ruptura pico.

**Tabla N° 4.6** Resultados de Corriente Máxima de Cortocircuito

		Capacidad del equipo		I <sub>CC</sub> Max Trifásica (kA)			I <sub>CC</sub> Max Falla a Tierra (kA)		
Barra con Falla	kV nom	Capacidad de ruptura simétrica (kA)	Capacidad ruptura Pico (kA)	I''k	I <sub>p</sub>	I <sub>k</sub>	I''k	i <sub>p</sub>	I <sub>k</sub>
<b>23kV Voltage Level</b>									
700-SG-001	23	40	104	36.1	92.7	30.3	0.6	1.5	0.6
700-SG-001	23	40	104	36.1	92.7	30.3	0.6	1.5	0.6
700-SG-001	23	40	104	25.3	65.3	21.0	0.6	1.5	0.6
<b>7.2kV Voltage Level</b>									
110-SG-001	7.2	25	65	5.5	12.5	5.5	0.0	0.1	0.0
110-SG-002	7.2	25	65	5.1	11.3	5.0	0.0	0.1	0.0
110-SG-003	7.2	25	65	5.5	12.3	5.4	0.0	0.1	0.0
<b>4.16kV Voltage Level</b>									
200-MV-001	4.16	40	104	10.5	24.5	8.2	0.2	0.5	0.2
200-MV-002	4.16	40	104	10.9	25.2	8.5	0.2	0.5	0.2
200-MV-003	4.16	40	104	15.2	36.4	12.9	0.2	0.5	0.2
205-MV-001	4.16	40	104	14.6	35.4	10.8	0.2	0.5	0.2
210-SG-001	4.16	40	104	16.9	42.5	15.7	0.2	0.5	0.2
210-SG-001	4.16	40	104	17.9	44.9	15.7	0.2	0.5	0.2
210-SG-001	4.16	40	104	16.2	41.1	15.1	0.2	0.5	0.2
220-MV-001	4.16	40	104	30.4	75.5	23.1	0.2	0.5	0.2
220-MV-002	4.16	40	104	30.5	75.7	23.2	0.2	0.5	0.2
220-MV-003	4.16	40	104	29.6	73.5	21.8	0.2	0.5	0.2
220-MV-004	4.16	40	104	29.6	73.5	21.8	0.2	0.5	0.2
220-SG-001	4.16	40	104	32.1	82.2	24.2	0.2	0.5	0.2
220-SG-001	4.16	40	104	31.1	79.5	22.7	0.2	0.5	0.2
230-MV-001	4.16	40	104	30.4	74.5	22.4	0.2	0.5	0.2
230-MV-001	4.16	40	104	27.8	68.4	21.1	0.2	0.5	0.2
255-MV-001	4.16	40	104	24.6	63.9	23.9	0.2	0.5	0.2
255-MV-001	4.16	40	104	24.6	63.9	23.9	0.2	0.5	0.2
255-MV-001	4.16	40	104	23.6	61.1	22.4	0.2	0.5	0.2
255-MV-002	4.16	40	104	1.9	4.0	1.7	1.9	3.9	1.9
280-MV-001	4.16	40	104	17.3	42.4	14.7	0.2	0.5	0.2
280-MV-001	4.16	40	104	17.0	41.8	14.2	0.2	0.5	0.2

800-MV-001	4.16	40	104	9.1	21.2	6.8	0.2	0.5	0.2
800-MV-002	4.16	40	104	8.2	18.7	5.4	0.2	0.5	0.2
<b>0.4kV Voltage Level</b>									
140-LV-001	0.4	65	169	32.3	69.5	29.7	30.0	64.6	30.0
140-MC-001	0.4	65	169	22.0	44.2	20.8	18.0	36.2	18.0
140-MC-002	0.4	65	169	22.5	45.1	20.8	18.2	36.6	18.2
140-MC-003	0.4	65	169	22.7	45.6	20.8	18.3	36.8	18.3
200-LV-001	0.4	65	169	32.4	69.5	24.1	30.0	64.4	30.0
200-MC-001	0.4	65	169	24.0	48.0	17.9	18.9	37.8	18.9
200-MC-002	0.4	65	169	24.3	48.7	17.9	19.0	38.1	19.0
200-MC-003	0.4	65	169	16.0	32.2	13.8	14.4	29.1	14.4
200-MC-004	0.4	65	169	18.0	35.9	14.6	15.4	30.8	15.4
205-LV-001	0.4	65	169	57.1	132.9	39.7	59.1	137.6	59.1
205-MC-001	0.4	65	169	36.8	74.5	25.5	28.1	56.8	28.1
205-MC-002	0.4	65	169	36.2	73.3	25.5	27.8	56.3	27.8
205-MC-003	0.4	65	169	32.6	66.0	25.5	26.3	53.3	26.3
210-LV-001 Barra 1	0.4	65	169	56.4	134.2	45.0	58.8	139.8	58.8
210-LV-001 Barra 2	0.4	65	169	56.0	133.6	45.0	58.4	139.4	58.4
210-LV-001 Barra 3	0.4	65	169	53.9	129.3	44.5	56.9	136.5	56.9
210-MC-001	0.4	65	169	34.4	70.3	27.5	27.1	55.4	27.1
210-MC-002	0.4	65	169	33.2	67.9	27.5	26.6	54.5	26.6
210-MC-003	0.4	65	169	37.2	76.0	27.5	28.2	57.7	28.2
210-MC-004	0.4	65	169	37.3	76.2	27.5	28.3	57.7	28.3
210-MC-005	0.4	65	169	36.5	75.0	27.3	28.0	57.5	28.0
210-MC-006	0.4	65	169	30.8	63.4	27.3	25.6	52.7	25.6
210-MC-007	0.4	65	169	31.5	65.0	27.3	25.9	53.4	25.9
220-LV-001 Barra 1	0.4	65	169	60.9	146.9	50.1	62.0	149.5	62.0
220-LV-001 Barra 2	0.4	65	169	59.2	143.6	49.4	60.8	147.5	60.8
220-LV-001 Barra 3	0.4	65	169	57.3	140.2	50.1	59.5	145.5	59.5
220-MC-001	0.4	65	169	42.0	86.9	31.5	32.0	66.2	32.0
220-MC-002	0.4	65	169	39.9	83.0	31.3	31.2	64.8	31.2
220-MC-003	0.4	65	169	35.3	74.1	31.5	29.2	61.3	29.2
220-MC-004	0.4	65	169	34.8	73.2	30.9	29.0	60.9	29.0
220-MC-005	0.4	65	169	39.5	81.9	31.2	31.0	64.3	31.0
220-MC-006	0.4	65	169	36.3	76.0	31.5	29.6	62.1	29.6
220-MC-007	0.4	65	169	30.9	64.1	28.8	25.6	53.2	25.6
220-MC-008	0.4	65	169	22.1	43.1	20.5	16.6	32.4	16.6
230-LV-001	0.4	65	169	57.3	138.9	49.3	59.3	143.7	59.3
230-LV-001	0.4	65	169	61.1	145.4	48.0	62.0	147.4	62.0
230-LV-002 Barra 1	0.4	65	169	58.6	141.3	49.3	60.2	145.2	60.2
230-LV-002	0.4	65	169	54.3	132.8	48.6	57.1	139.7	57.1
230-MC-001	0.4	65	169	33.6	69.1	29.0	26.8	55.1	26.8

230-MC-002	0.4	65	169	33.3	68.4	29.0	26.7	54.8	26.7
230-MC-003	0.4	65	169	31.6	65.1	29.0	25.9	53.4	25.9
230-MC-004	0.4	65	169	45.9	95.7	32.6	35.4	73.7	35.4
245-MC-001	0.4	65	169	31.1	64.5	27.0	25.7	53.3	25.7
245-MC-002	0.4	65	169	31.7	65.6	27.0	26.0	53.8	26.0
251-MC-001	0.4	65	169	26.2	53.8	20.5	24.4	50.0	24.4
251-MC-002	0.4	65	169	42.3	95.9	37.0	42.6	96.6	42.6
255-LV-001	0.4	65	169	51.4	128.0	50.0	55.0	137.0	55.0
255-LV-001	0.4	65	169	51.5	128.1	50.0	55.0	137.0	55.0
255-LV-001	0.4	65	169	54.0	132.6	49.3	57.0	139.9	57.0
255-MC-001	0.4	65	169	30.6	64.2	29.3	25.5	53.5	25.5
255-MC-002	0.4	65	169	29.8	62.5	29.3	25.1	52.7	25.1
255-MC-003	0.4	65	169	30.7	64.3	29.3	25.5	53.5	25.5
255-MC-004	0.4	65	169	31.8	66.0	29.1	26.0	54.1	26.0
255-MC-005	0.4	65	169	32.6	67.7	29.1	26.4	54.8	26.4
260-LV-001	0.4	65	169	58.7	142.8	49.4	60.5	147.0	60.5
260-MC-001	0.4	65	169	33.9	69.6	29.1	26.9	55.3	26.9
260-MC-002	0.4	65	169	34.0	69.9	29.1	27.0	55.5	27.0
260-MC-003	0.4	65	169	23.1	45.1	20.5	17.0	33.1	17.0
280-LV-001	0.4	65	169	51.4	124.2	44.2	55.0	132.9	55.0
280-LV-001	0.4	65	169	51.6	124.4	43.6	55.2	133.0	55.2
280-LV-002	0.4	65	169	51.1	123.6	44.2	54.8	132.5	54.8
280-LV-002	0.4	65	169	52.0	125.3	43.6	55.5	133.6	55.5
280-MC-001	0.4	65	169	33.8	69.8	27.0	26.9	55.5	26.9
280-MC-002	0.4	65	169	30.3	62.8	27.2	25.3	52.6	25.3
280-MC-003	0.4	65	169	30.8	63.7	27.0	25.6	52.9	25.6
280-MC-004	0.4	65	169	32.9	68.2	27.2	26.5	54.9	26.5
280-MC-005	0.4	65	169	31.0	64.2	27.2	25.7	53.2	25.7
280-MC-006	0.4	65	169	32.6	67.5	27.2	26.4	54.6	26.4
280-MC-007	0.4	65	169	44.8	101.8	38.2	43.7	99.3	43.7
400-MC-001	0.4	65	169	21.2	42.6	16.8	19.5	39.2	19.5
800-US-003	0.4	65	169	21.0	40.8	19.3	20.0	38.9	20.0

#### 4.5 Corriente Máxima de Corto Circuito Trifásica por Nivel de Tensión.

A continuación en la Tabla 4.7 se indican los valores de corriente máxima de cortocircuito trifásica por nivel de tensión:

**Tabla N° 4.7** Valores de Corriente Máxima de Cortocircuito

kV nominal	Barra	I''k max (kA)	ip max (kA)	Ik max (kA)
23	700-SG-001 Barras1/2	36.1	92.7	30.3
7.2	110-SG-001	5.5	12.5	5.5
4.16	220-SG-001 Barra1	32.1	82.2	24.2
0.4	230-LV-001 Barra1	60.9	146.9	50.1

Donde,

$I''_k$  : Corriente Simétrica de Corto Circuito Inicial

$I_p$  : Corriente Pico de Corto Circuito

$I_k$  : Corriente de Cortocircuito de Estado Estable

Donde observamos que los niveles de cortocircuito más altos son de 36.1 kA que es un valor aceptable y manejable, es decir:

$$36.1 < 40 \text{ kA}$$

Valor que esta por debajo de los 40kA que es la máxima corriente de interrupción que pueden manejar los interruptores de potencia.

Los análisis de cortocircuito muestran que, luego de haber instalado el Limitador de Corriente de Falla (FCL) se han disminuido los niveles de cortocircuito en la Barra de 23 kV de la Subestación Toromocho, a valores manejables dentro la capacidad de ruptura o poder de corte de los interruptores en 23 kV.

En tal sentido, se ha comprobado que la opción de instalar un Fusible Limitador de Corriente (FCL) ayuda a disminuir los valores de cortocircuito en la Subestación Toromocho a valores que no superen los 40 kA en la barra de 23 kV.

#### **4.6 Características del Limitador de Corriente de Falla: Descripción y Cálculos.**

##### **4.6.1 Datos Técnicos del Limitador de Corriente de Falla**

Información Técnica del Sistema: 23 kV, 60 Hz, 40 kA, 2800 A

Instalación a 4600 msnm, T ambiente es 20 °C.

##### **4.6.2 Contribuciones a la corriente de falla y posibles escenarios.**

Las diferentes condiciones de falla y por lo tanto, la contribución a la corriente de falla se toman de los estudios de cortocircuito para el Proyecto Toromocho.

Las consideraciones para la Mínima Corriente de Corto Circuito pueden ser despreciadas, debido a que sus valores están por debajo del nivel nominal de la barra de 40 kA.

Basado en estos casos, solo se considera el análisis para la Máxima Corriente de Corto Circuito, y como vimos en la Tabla No.4.2, sólo el caso 1 necesita analizarse en detalle, ya que se ha superado la capacidad máxima del equipo.

##### **4.6.3 Cálculo del Valor de Disparo**

Se debe encontrar el valor límite crítico para la corriente a través del FCL, utilizada como criterio de disparo. Si este valor se excede, el disparo del FCL se debe realizar.

Este valor límite es llamado "valor de disparo", y siempre es representado en términos de amperios r.m.s.

Para la determinación del valor de disparo, se debe asumir que la planta está en condiciones de operación y la ubicación de la falla debe ser asumida de tal manera de

que la corriente en lugar de la falla alcance el valor permisible del sistema tal como 40 kA rms /104 kA pico o ligeramente superior, mientras que la corriente usada como criterio de disparo debe ser la más baja posible. Entonces, este valor es el valor de disparo.

El cálculo del valor de disparo se realice de acuerdo al método básico y ecuaciones mostradas en el acápite 3.5.6 "Cálculo de los Valores de Disparo del Limitador de Corriente de Falla".

El valor de disparo depende en gran medida de la condición de servicio y de la contribución de los motores.

Para el cálculo inicial asumiremos de que en sistema todos los motores y transformadores están en servicio.

El cortocircuito tiene lugar en las Barra 1 / Barra 2.

Bajo estas circunstancias el valor de disparo del limitado de corriente de falla FCL es calculado de la siguiente manera:

$$I_T = \frac{(11,85 + 0,645 + 3.031) \text{ kA}}{(11,85 + 0,645 + 3,031 + 11,86 + 1,231 + 1,707 + 11,85 + 0,347 + 1,543) \text{ kA}} * 40 \text{ kA}$$

$$I_T = 14,15 \text{ kA}$$

Para el siguiente cálculo, asumimos de que en la barra 3, solo el transformador de llegada está en servicio. (Es decir, no hay contribución de motores y no hay contribución de los equipos ubicados aguas abajo), que daría como resultado un nivel de cortocircuito en la barra justo por encima del valor permitido de 40kA.

El cortocircuito tiene lugar en las Barra 1 / Barra 2.

Bajo estas circunstancias el valor de disparo del limitado de corriente de falla FCL es calculado de la siguiente manera:

$$I_T = \frac{(11,85) \text{ kA}}{(11,85 + 11,86 + 1,231 + 1,707 + 11,85 + 0,347 + 1,543) \text{ kA}} * 40 \text{ kA}$$

$$I_T = 11,18 \text{ kA}$$

Se debe calcular el valor de la corriente que origine el disparo del FCL , para todas las posibles condiciones de servicio y para todas las posibles localizaciones de los cortocircuitos .

El valor más pequeño de corriente se convierte en el valor de disparo del FCL.

Repitiendo el cálculo para un cortocircuito en la Barra 3, se obtiene tal como se indica la Tabla N° 4.8 . Así, el valor más pequeño es 11,18 kA. Considerando un factor de 0.9, para permitir ciertos cambios en los parámetros en la red, para esta aplicación el valor de disparo escogido es

$$I_T = 10,50 \text{ kA RMS.}$$

=====

**Tabla N° 4.8** Valores de Corriente Cortocircuito en Barra 3

Cortocircuito en	Min [kA]	Max [kA]
Barra 3	24.17	25.81

#### 4.6.4 Valor de Configuración o Ajuste

Los valores de disparo calculados, tal como se ha mencionado anteriormente, son valores r.m.s. de las corrientes (es decir, los valores de corriente simétrica). Con el fin de decidir inmediatamente después de iniciado un cortocircuito, si el disparo debe ser efectuado o no, el dispositivo de disparo debe monitorear continuamente el valor instantáneo de la corriente, así como la tasa de aumento de la corriente que fluye a través del Limitador de Corriente de Falla FCL para detectar condiciones que puede exceder el valor de disparo.

El Limitador de Corriente de Falla se ajustará y disparará siempre que la tasa de aumento de la corriente alcance o supere los valores predeterminados correspondientes a los valores de disparo, siempre que la corriente momentánea a través del FCL este entre  $i_1$  e  $i_2$ . Estos valores límite de la tasa de incremento de la corriente y los valores límite de  $i_1$  e  $i_2$  son llamados valores de ajuste.

Los valores de  $i_1$  e  $i_2$  son dependientes de las condiciones del sitio (por ejemplo, corriente de servicio, máx. velocidad de incremento de la corriente de cortocircuito, valor de disparo, etc. y del tipo de Limitador de Corriente de Falla FCL. Ambos valores fueron determinados por ABB AG / Alemania, de tal manera de que se garantice una adecuada operación del Limitador de Corriente de Falla FCL. Luego de que se han determinado  $i_1$  e  $i_2$ , el ajuste o configuración de  $di/dt$  se puede calcular con un programa en ordenador, basándose en lo indicado en la sección 3.5.7 "Cálculo de los valores de configuración de un Limitador de Corriente de Falla como dispositivo de medición y disparo". El ajuste ( $di/dt$ ) depende de los valores  $i_1$  e  $i_2$  y el valor de disparo (calculado en la Sección 4.6.3).

El resultado de estos cálculos en el Anexo 1, donde se muestra la hoja de datos del Limitador de Corriente de Falla FCL o IS-LIMITER, donde se tabulan los valores de ajuste del FCL.

#### 4.6.5 Máxima corriente de cortocircuito en el Limitador de Corriente de Falla

La máxima corriente de cortocircuito que puede ser limitada por el Limitador de Corriente de Falla FCL es:

$$I_k''_{\max} = 40 \text{ kARMS}$$

#### 4.6.6 Capacitores y Filtros Armónicos.

El Limitador de Corriente de Falla no operará en este caso, basado en que las corrientes de carga y descarga de los bancos de condensador, que fluyen a través del FCL, y que además de la corriente de funcionamiento a través del FCL, no alcanzan a los valores de ajuste del FCL, mencionados anteriormente.

Basados en que no se espera influencia del filtro diseñado en el diseño del. En el caso de que señales adicionales o lógicas se requieran para inhibir un disparo involuntario del limitador es, éstas se aconseja que se añadirán durante la instalación y puesta en servicio.

#### 4.6.7 Bloqueo del Limitador de Corriente de Falla

Siempre que el valor permisible de  $I_k'' = 40\text{kA}$  no se supere, el Limitador FCL deberá estar bloqueado.

Basados en la condiciones de falla discutidas anteriormente, siempre que al menos uno de los transformadores de llegada 700-TF-001, 700-TF-002 o 700-003-TF, este fuera de servicio o no conectados a la barra a través del interruptor de llegada, entonces el Limitador FCL deberá estar bloqueado.. Lo mismo se aplica en caso de que el interruptor de acoplamiento o uno de los dos interruptor de salida para el limitador FCL se encuentra en condición abierta.

El bloqueo del limitador FCL o IS-limiter será realizado por la activación del relé de bloqueo

a través de señales cableadas. ("1" = bloqueado).

#### 4.6.8 Corriente de Inserción (Inrush)

En general, el limitador FCL no operará por las corrientes de irrupción de los transformadores conectados aguas abajo, siempre y cuando la contribución de esta corriente de irrupción, que está fluyendo a través de la Limitador no llegue a los valores de ajuste de Limitador FCL. Basado en el principio de bloqueo que se indica en la sección 4.6.7, y en base a los siguientes escenarios:

##### **Molino Bolas 1 / Molino Bolas 2**

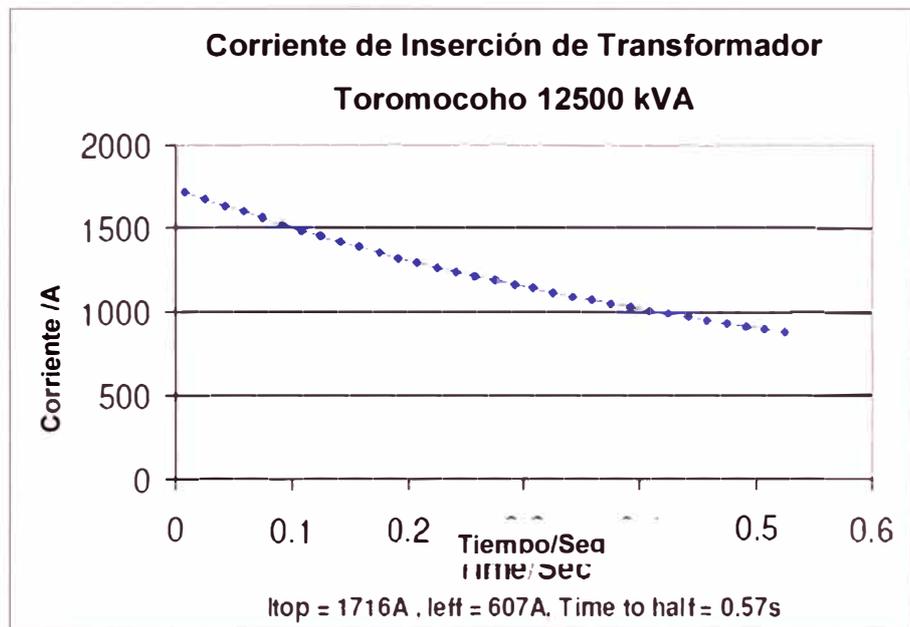
Cada transformador de 12.500 kVA tiene una corriente de irrupción

$$\hat{I}_{\text{inrush Ball}} = 1716 \text{ A (confirmado por el fabricante de los transformadores).}$$

Tres de estos transformadores de 12.500 kVA están conectados al mismo alimentador de salida y serán energizados al mismo tiempo, por lo tanto la corriente de irrupción será

$$\hat{I}_{\text{total inrush Ball}} = 5148 \text{ A ( 3x 1716A) y tiene que ser tomada en cuenta.}$$

En el caso de que los tres transformadores de llegada (700-TF-001, 700-TF-002 and 700-TF-003) estén en servicio, entonces un máximo de 66,6% de la corriente de irrupción fluirá a través del Limitador FCL. Para esta condición de servicio la corriente de irrupción no producirá el disparo del Limitador FCL.



**Fig. 4.4** Diagrama Corriente de Inserción de Transformador Toromococho 12500 kVA

En el caso de que un transformador (por ejemplo 700-TF-003) esté fuera de servicio, entonces el 100% de la corriente de irrupción fluirá a través del Limitador FCL. Sin embargo, para esta condición de servicio el Limitador FCL estará bloqueado (véase la sección el capítulo 4.6.7. " Bloqueo del Limitador de Limitador de Corriente de Falla" ), y no podrá operar en base a la mencionada corriente de irrupción.

#### **Molino SAG**

La máxima corriente de irrupción de estos transformadores es

$$\hat{I}_{\text{total inrush SAG}} = 5598 \text{ A (3 x 1866A)}.$$

En consideración de las necesidades de bloqueo también esta corriente de entrada no causará el disparo del Limitador FCL

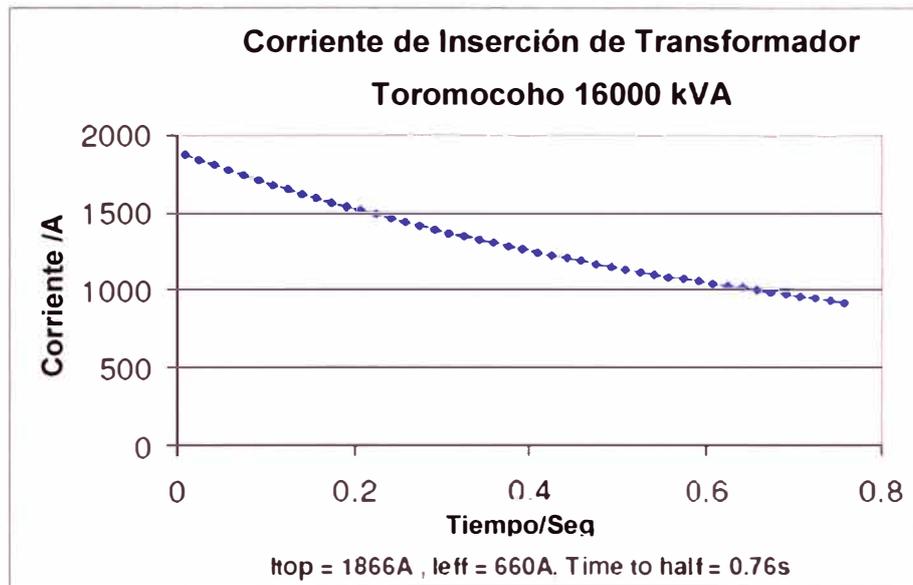
#### **4.6.9 Corriente de Arranque**

El Limitador FCL no operará por efecto de la corriente de arranque de motores, siempre y cuando la contribución de esta corriente de arranque, que está fluyendo a través del Limitador FCL no alcance a los valores de ajuste del Limitador FCL.

Debido a que los motores no están conectados directamente a la 23kV, sino en el sistema de 4,16 kV, la influencia de corrientes de arranque puede ser despreciado.

#### 4.2.1 Criterio de Operación del Limitador FCL basado en la dirección

No es posible la detección de fallas direccionales con la utilización del Limitador FCL



**Fig. 4.5** Diagrama Corriente de Inserción de Transformador Toromococho 16000 kVA

Sin embargo, el Limitador FCL no requiere de un criterio de operación direccional, ya que el valor de disparo es suficiente para determinar las fallas en el barra 1/2 y / o 3. Además, debido a los criterios de bloqueo mencionados anteriormente, el Limitador FCL será bloqueado si un transformador está fuera de servicio, por lo que un criterio de dirección, no es necesario.

## CONCLUSIONES

1. Cuando se planea realizar expansiones en los sistemas de distribución eléctrica o interconexión de dichos sistemas en las industrias, es necesario realizar estudios de cortocircuito para determinar cuanto se incrementan las contribuciones de corriente al cortocircuito. Esto sirve para determinar si existen elementos de protección que, bajo condiciones normales operen sin problema, pero, bajo condiciones de falla presenten sub-dimensionamiento debido al incremento de los niveles de las corrientes de cortocircuito.
2. Debido a que la demanda de energía se encuentra en constante crecimiento tanto en nivel mundial y nacional, los sistemas eléctricos se hacen más complejos y las corrientes de cortocircuito tienden a incrementarse a la par.
3. El incremento de los niveles de cortocircuito hacen que uno o varios elementos de protección (como por ejemplo los interruptores de potencia) sean superados en sus límites máximos por las corrientes de cortocircuito, entonces es necesario tomar una decisión para evitar riesgos de explosión de dichos órganos en caso de falla. Una decisión podría ser no interconectar, lo cual no es conveniente para la industria. Otra decisión podría ser la de cambiar aquellos elementos de protección que están sub dimensionados, sin embargo, esta es una decisión muy costosa y posiblemente el espacio actual no lo permita, o sea simplemente no se posible, porque no existen en el mercado dispositivos con dichas características.
4. Este incremento de los niveles de cortocircuito han dado lugar a que se realicen investigaciones para encontrar soluciones para resolver este problema. Estas soluciones incluyen la modificación de la topología con la partición de las redes en puntos estratégicos, la división de barras, la introducción de mayores niveles de tensión, el uso de transformadores con mayor impedancia de cortocircuito, instalando reactores limitadores de corriente de falla y el uso de fusibles limitadores o Limitadores de Corriente de Fallas.

5. Para el caso del Proyecto de Toromocho, los estudios iniciales de cortocircuito los niveles de cortocircuito en la Barra de 23 kV de la Subestación Toromocho son muy elevados, llegando hasta valores de 55.334 kA, que superan los 40kA que es la máxima corriente de interrupción que pueden manejar los interruptores de potencia en 23 kV. Si la corriente de cortocircuito se establece a un valor superior al poder de corte de un interruptor, éste no podrá interrumpirla, y se destruirá
6. En tal sentido, se investigaron opciones para disminuir los valores de cortocircuito en la Subestación Toromocho a valores que no superen los 40 kA en la barra de 23 kV. En primer lugar, se optó por cambiar las características de los Transformadores de Potencia de 220/23 kV con potencia 75/110MVA, aumentando la impedancia de 8% a 12% (característica solicitada al fabricante ABB), con lo que redujo la corriente de cortocircuito a 44.064 kA, nivel que aún supera los 40 KA.
7. Como complemento final se aplica el uso de un Limitador de Corriente de Falla, también denominado FCL o Is-Limiter entre las barras 2 y 3 de la Subestación Principal. Con ello se obtiene en barras de 23 kV una corriente de cortocircuito de 36.1 kA, valor que esta por debajo de los 40kA que es la máxima corriente de interrupción, es decir se ha disminuido la corriente de cortocircuito a valores manejables dentro la capacidad de ruptura o poder de corte de los interruptores en 23 kV.
8. Finalmente, la aplicación del actual Limitador de Corriente de Fala también será de utilidad cuando se haga la expansión del Proyecto Toromocho, y se instale un cuarto transformador de potencia 220/23 kV, ya que por su principio de operación y al estar instalado en la barra de interconexión, la limitación de la corriente de cortocircuito será igual con uno o dos transformadores, por lo que los valores de cortocircuito no superarán la capacidad de ruptura de los Interruptores de Potencia en 23 KV.

**ANEXO A**  
**HOJAS DE DATOS DEL LIMITADOR DE CORRIENTE FCL O IS LIMITER**

ABB AG

Oberhausener Str. 33, 40472 Ratingen

DA240461904

**DATA SHEET FOR I<sub>s</sub>-LIMITER**

Date: 22.07.2010

Order no.: 10 / 240461904

**Customer** : ABB Industrie / Switzerland  
**Final customer** : Minera Chinalco Peru S.A.  
**Place of installation:** Toromocho / Peru  
**Application** : interbus connection

**Scope of supply:**

- 1 Release equipment type: QR3S-033 D-S
- 3 Insert holder type: QU31 3628-F
- 6 Inserts type: QS2 3628B230
- 3 Special CT type: ASS 36-03
- 1 Test equipment type: QT2d
- / Test plug type:
- 1 Test insert type: QE2a-32

Scheduled delivery date: 11/2010

Diagram: 1VB22296 21

Rated current : 2800 A at 20 °C  
 Rated voltage : 36000 V  
 Frequency : 60 Hz

**Remarks:** Installation 4600 m above sea-level  
 room temperature: max. 20 °C

**Installation characteristics:**

Service current I = 2800 A at 20 °C  
 Service voltage U = 23000 V  
 Max. short-circuit current I<sub>k-3s</sub> = 40.0 kA  
 Max. rate of rise (di/dt)<sub>-3s</sub> = 17,772 kA/ms

**Protection purpose:**

Limitation to: 40 kA

Toromocho Project			
Equipment Tag	Location	Responsible for	Responsible for

**Notes:**  
 1. Reviewed and accepted as the certified. Manufacturer may proceed.  
 2. Reviewed and accepted as valid. Submitter should check. Manufacturer may proceed.  
 3. Reviewed and accepted. Review and submit. Manufacturer should not proceed.  
 4. Review not required. For information only.

**Remarks** (service conditions, special conditions, etc.):

Tripping value (single)			Tripping values (summation)			Setting values		
I <sub>T</sub>	10,50	kA	I <sub>ST</sub>	—	kA	i1	10,00	kA
S <sub>T</sub>	418,29	MVA	S <sub>ST</sub>	—	MVA	i2	8,00	kA
I <sub>Tmin</sub>	8,85	kA	I <sub>STmin</sub>	—	kA	(di/dt) <sub>-</sub>	3,930	kA/ms
S <sub>Tmin</sub>	352,40	MVA	S <sub>STmin</sub>	—	MVA	(di/dt) <sub>ST</sub>	—	kA/ms

**Fuses** Type: Siba 36 kV/100 A  
 Ident.no.: 1VB  
 U<sub>n</sub> = 36 kV I<sub>n</sub> = 100 A  
 I<sub>l</sub> = 40 kA e = 537 mm  
 Number of fuses in parallel per insert: 2  
 t<sub>s,min</sub> = 0,603 ms t<sub>s,-3s</sub> = 1,302 ms



**ANEXO B**

**REPORTE DE CÁLCULOS DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MÍNIMO  
CON ETAP**

**REPORTE DE CÁLCULOS DE CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO MÁXIMO  
CON ETAP**

Contract: C-560  
 Engineer: Lena Coopamah  
 Filename: Toromocho~Detail

SN: JOHNBROWN2  
 Revision: Base  
 Config.: Min.SC

Short-Circuit Summary Report

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	3-Phase Fault				Line-to-Ground Fault				Line-to-Line				*Line-to-Line-to-Ground			
	kV	I" k	ip	Ik	I" k	ip	Ib	Ik	I" k	Ip	Ib	Ik	I" k	ip	Ib	Ik
110-SG-001	7.200	5.104	11.609	4.996	0.025	0.057	0.025	0.025	4.420	10.054	4.420	4.420	4.426	10.068	4.426	4.426
110-SG-002	7.200	4.685	10.564	4.593	0.025	0.056	0.025	0.025	4.057	9.149	4.057	4.057	4.063	9.163	4.063	4.063
110-SG-003	7.200	4.972	11.274	4.856	0.025	0.057	0.025	0.025	4.307	9.765	4.307	4.307	4.313	9.779	4.313	4.313
140-LV-001	0.400	29.906	64.742	27.242	27.918	60.437	27.918	27.918	25.920	56.112	25.920	25.920	29.652	64.190	29.652	29.652
140-MC-001	0.400	20.899	42.206	19.579	17.286	34.910	17.286	17.286	18.109	36.571	18.109	18.109	20.209	40.813	20.209	20.209
140-MC-002	0.400	21.342	43.107	19.579	17.486	35.318	17.486	17.486	18.493	37.351	18.493	18.493	20.589	41.586	20.589	20.589
140-MC-003	0.400	21.568	43.564	19.579	17.587	35.523	17.587	17.587	18.688	37.748	18.688	18.688	20.782	41.978	20.782	20.782
200-LV-001	0.400	30.339	65.287	21.960	28.120	60.512	28.120	28.120	26.234	56.453	26.234	26.234	29.864	64.264	29.864	29.864
200-MC-001	0.400	22.931	46.164	16.717	18.151	36.542	18.151	18.151	19.838	39.937	19.838	19.838	21.871	44.031	21.871	21.871
200-MC-002	0.400	23.253	46.816	16.717	18.285	36.814	18.285	18.285	20.117	40.502	20.117	20.117	22.147	44.589	22.147	22.147
200-MC-003	0.400	14.934	30.128	12.635	13.536	27.307	13.536	13.536	12.988	26.203	12.988	12.988	14.669	29.593	14.669	14.669
200-MC-004	0.400	16.807	33.656	13.378	14.492	29.020	14.492	14.492	14.592	29.220	14.592	14.592	16.227	32.495	16.227	16.227
200-MV-001	4.160	9.637	22.541	7.285	0.199	0.466	0.199	0.199	8.285	19.381	8.285	8.285	8.335	19.497	8.335	8.335
200-MV-002	4.160	10.045	23.181	7.550	0.199	0.460	0.199	0.199	9.039	20.858	9.039	9.039	9.086	20.967	9.086	9.086
200-MV-003	4.160	13.710	33.005	11.269	0.200	0.481	0.200	0.200	12.255	29.502	12.255	12.255	12.303	29.618	12.303	12.303
205-LV-001	0.400	53.002	122.703	35.395	54.428	126.006	54.428	54.428	45.739	105.891	45.739	45.739	55.092	127.542	55.092	55.092
205-MC-001	0.400	35.416	71.841	23.628	27.110	54.993	27.110	27.110	30.614	62.101	30.614	30.614	33.451	67.854	33.451	33.451
205-MC-002	0.400	34.820	70.650	23.628	26.875	54.530	26.875	26.875	30.098	61.071	30.098	30.098	32.944	66.845	32.944	32.944
205-MC-003	0.400	31.276	63.557	23.628	25.393	51.602	25.393	25.393	27.033	54.936	27.033	27.033	29.936	60.836	29.936	29.936
205-MV-001	4.160	13.341	32.193	9.360	0.200	0.482	0.200	0.200	11.400	27.510	11.400	11.400	11.450	27.631	11.450	11.450
210-LV-001	0.400	51.692	122.364	40.007	53.611	126.906	53.611	53.611	44.769	105.977	44.769	44.769	53.703	127.124	53.703	53.703
210-LV-001	0.400	51.258	121.856	40.007	53.262	126.620	53.262	53.262	44.354	105.444	44.354	44.354	53.223	126.527	53.223	53.223
210-LV-001	0.400	49.585	118.472	40.053	52.071	124.413	52.071	52.071	42.941	102.600	42.941	42.941	51.738	123.617	51.738	51.738
210-MC-001	0.400	32.769	67.301	25.587	26.073	53.548	26.073	26.073	28.380	58.287	28.380	28.380	31.339	64.364	31.339	31.339
210-MC-002	0.400	31.574	65.029	25.587	25.557	52.637	25.557	25.557	27.331	56.291	27.331	27.331	30.346	62.500	30.346	30.346
210-MC-003	0.400	35.453	72.851	25.587	27.159	55.806	27.159	27.159	30.690	63.063	30.690	30.690	33.646	69.138	33.646	33.646
210-MC-004	0.400	35.625	73.047	25.587	27.228	55.830	27.228	27.228	30.853	63.262	30.853	30.853	33.768	69.239	33.768	33.768
210-MC-005	0.400	34.863	71.968	25.607	26.936	55.606	26.936	26.936	30.192	62.326	30.192	30.192	33.191	68.517	33.191	33.191
210-MC-006	0.400	29.321	60.736	25.607	24.551	50.855	24.551	24.551	25.393	52.599	25.393	25.393	28.471	58.975	28.471	28.471
210-MC-007	0.400	30.073	62.265	25.607	24.898	51.551	24.898	24.898	26.044	53.923	26.044	26.044	29.112	60.275	29.112	29.112
210-SG-001	4.160	14.847	37.292	13.397	0.200	0.502	0.200	0.200	12.861	32.304	12.861	12.861	12.911	32.429	12.911	12.911
210-SG-001	4.160	15.877	39.681	13.397	0.200	0.499	0.200	0.200	13.702	34.247	13.702	13.702	13.752	34.371	13.752	13.752
210-SG-001	4.160	14.685	37.051	13.448	0.200	0.504	0.200	0.200	12.718	32.087	12.718	12.718	12.767	32.212	12.767	12.767
220-LV-001	0.400	55.629	133.846	44.486	56.428	135.769	56.428	56.428	48.273	116.146	48.273	48.273	56.768	136.587	56.768	56.768
220-LV-001	0.400	54.334	131.453	44.486	55.523	134.332	55.523	55.523	47.139	114.047	47.139	47.139	55.555	134.408	55.555	55.555
220-LV-001	0.400	52.080	127.157	44.486	53.943	131.705	53.943	53.943	45.197	110.352	45.197	45.197	53.472	130.556	53.472	53.472
220-MC-001	0.400	39.923	83.081	29.240	30.672	63.830	30.672	30.672	34.613	72.032	34.613	34.613	37.908	78.889	37.908	37.908

Project: Toromocho Project  
 Location: Peru  
 Contract: C-560  
 Engineer: Lena Coopamah  
 Filename: Toromocho-Detail

ETAP  
 5.5.6C

Page: 2  
 Date: 09-07-2010  
 SN: JOHNBROWN2  
 Revision: Base  
 Config.: Min.SC

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

ID	Bus	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground				
		k	I <sup>k</sup>	ip	Ik	I <sup>k</sup>	ip	Ib	Ik	I <sup>k</sup>	ip	Ib	Ik		
220-MC-002	0.4038.000	79.467	29.239	29.904	62.536	29.904	29.904	32.943	68.892	32.943	32.943	36.322	75.957	36.322	36.322
220-MC-003	0.4033.372	70.449	29.240	27.895	58.886	27.895	27.895	28.937	61.088	28.937	28.937	32.465	68.535	32.465	32.465
220-MC-004	0.4032.928	69.758	28.937	27.656	58.588	27.656	27.656	28.482	60.338	28.482	28.482	32.105	68.014	32.105	32.105
220-MC-005	0.4037.454	78.208	28.938	29.642	61.896	29.642	29.642	32.398	67.651	32.398	32.398	35.810	74.774	35.810	35.810
220-MC-006	0.4034.251	72.266	29.240	28.298	59.706	28.298	28.298	29.700	62.663	29.700	29.700	33.216	70.082	33.216	33.216
220-MC-007	0.4029.350	61.311	27.070	24.566	51.317	24.566	24.566	25.389	53.037	25.389	25.389	28.618	59.782	28.618	28.618
220-MC-008	0.4021.409	41.975	19.603	16.206	31.774	16.206	16.206	18.553	36.376	18.553	18.553	20.332	39.864	20.332	20.332
220-MV-001	4.1627.125	67.435	19.345	0.200	0.497	0.200	0.200	23.805	59.182	23.805	23.805	23.854	59.304	23.854	23.854
220-MV-002	4.1627.195	67.589	19.387	0.200	0.497	0.200	0.200	23.867	59.316	23.867	23.867	23.916	59.438	23.916	23.916
220-MV-003	4.1627.406	68.121	19.387	0.200	0.497	0.200	0.200	24.019	59.702	24.019	24.019	24.068	59.824	24.068	24.068
220-MV-004	4.1627.406	68.121	19.387	0.200	0.497	0.200	0.200	24.019	59.702	24.019	24.019	24.068	59.824	24.068	24.068
220-SG-001	4.1628.411	72.583	20.089	0.200	0.511	0.200	0.200	24.934	63.698	24.934	24.934	24.983	63.824	24.983	24.983
220-SG-001	4.1628.643	73.205	20.089	0.200	0.511	0.200	0.200	25.100	64.151	25.100	25.100	25.149	64.277	25.149	25.149
230-LV-001	0.4052.188	126.180	43.800	53.868	130.240	53.868	53.868	45.102	109.047	45.102	45.102	53.623	129.648	53.623	53.623
230-LV-001	0.4056.476	133.754	43.241	56.866	134.676	56.866	56.866	48.815	115.610	48.815	48.815	57.674	136.592	57.674	57.674
230-LV-002	0.4053.469	128.586	43.800	54.777	131.732	54.777	54.777	46.210	111.131	46.210	46.210	54.813	131.819	54.813	54.813
230-LV-002	0.4049.541	121.011	43.800	51.951	126.898	51.951	51.951	42.816	104.585	42.816	42.816	51.196	125.056	51.196	51.196
230-MC-001	0.4031.955	66.130	27.070	25.724	53.235	25.724	25.724	27.643	57.206	27.643	27.643	30.755	63.646	30.755	30.755
230-MC-002	0.4031.595	65.399	27.070	25.568	52.924	25.568	25.568	27.331	56.574	27.331	27.331	30.448	63.025	30.448	30.448
230-MC-003	0.4030.024	62.214	27.070	24.867	51.526	24.867	24.867	25.972	53.817	25.972	25.972	29.110	60.319	29.110	29.110
230-MC-004	0.4043.805	91.607	30.350	33.890	70.874	33.890	33.890	37.892	79.243	37.892	37.892	41.455	86.693	41.455	41.455
230-MV-001	4.1627.246	66.418	18.783	0.200	0.487	0.200	0.200	23.301	56.802	23.301	23.301	23.351	56.924	23.351	23.351
230-MV-001	4.1625.647	62.954	18.782	0.200	0.491	0.200	0.200	21.959	53.903	21.959	21.959	22.009	54.026	22.009	22.009
245-MC-001	0.4029.640	61.720	25.311	24.707	51.447	24.707	24.707	25.666	53.445	25.666	25.666	28.816	60.004	28.816	28.816
245-MC-002	0.4030.171	62.804	25.311	24.950	51.937	24.950	24.950	26.126	54.384	26.126	26.126	29.269	60.926	29.269	29.269
251-MC-001	0.4024.226	49.649	18.548	22.312	45.727	22.312	22.312	20.818	42.665	20.818	20.818	23.511	48.184	23.511	23.511
251-MC-002	0.4038.944	88.166	33.530	38.983	88.253	38.983	38.983	33.726	76.352	33.726	33.726	39.454	89.320	39.454	39.454
255-LV-001	0.4046.100	114.713	44.374	49.443	123.030	49.443	49.443	39.927	99.353	39.927	39.927	48.055	119.578	48.055	48.055
255-LV-001	0.4046.132	114.773	44.374	49.467	123.070	49.467	49.467	39.955	99.405	39.955	39.955	48.085	119.632	48.085	48.085
255-LV-001	0.4049.171	120.532	44.374	51.753	126.861	51.753	51.753	42.583	104.384	42.583	42.583	50.925	124.833	50.925	50.925
255-MC-001	0.4028.733	60.834	27.292	24.308	51.466	24.308	24.308	24.885	52.687	24.885	24.885	28.226	59.760	28.226	28.226
255-MC-002	0.4027.915	59.137	27.292	23.914	50.661	23.914	23.914	24.177	51.217	24.177	24.177	27.524	58.308	27.524	27.524
255-MC-003	0.4028.767	60.897	27.292	24.324	51.492	24.324	24.324	24.914	52.741	24.914	24.914	28.253	59.810	28.253	28.253
255-MC-004	0.4030.126	63.056	27.292	24.939	52.199	24.939	24.939	26.090	54.608	26.090	26.090	29.296	61.318	29.296	29.296
255-MC-005	0.4030.932	64.704	27.292	25.302	52.927	25.302	25.302	26.788	56.035	26.788	26.788	29.984	62.721	29.984	29.984
255-MV-001	4.1621.121	54.702	19.867	0.200	0.518	0.200	0.200	18.298	47.392	18.298	18.298	18.348	47.521	18.348	18.348
255-MV-001	4.1621.124	54.707	19.867	0.200	0.518	0.200	0.200	18.301	47.397	18.301	18.301	18.351	47.526	18.351	18.351
255-MV-001	4.1621.256	54.925	19.866	0.200	0.516	0.200	0.200	18.408	47.565	18.408	18.408	18.458	47.694	18.458	18.458
255-MV-002	4.161.764	3.702	1.542	1.692	3.552	1.692	1.692	1.514	3.178	1.514	1.514	1.732	3.636	1.732	1.732
260-LV-001	0.4053.883	130.613	44.486	55.209	133.827	55.209	55.209	46.749	113.319	46.749	46.749	55.134	133.644	55.134	55.134

**Project:** Toromocho Project  
**Location:** Peru  
**Contract:** C-560  
**Engineer:** Lena Coopamah  
**Filename:** Toromocho-Detail

**ETAP**  
**5.5.6C**

**Page:** 3  
**Date:** 09-07-2010  
**SN:** JOHNBROWN2  
**Revision:** Base  
**Config.:** Min.SC

**3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents**

Bus	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault					
		I <sup>3k</sup>	I <sup>1k</sup>	I <sup>0k</sup>	I <sup>3k</sup>	I <sup>1k</sup>	I <sup>0k</sup>	I <sup>3k</sup>	I <sup>1k</sup>	I <sup>0k</sup>	I <sup>3k</sup>	I <sup>1k</sup>	I <sup>0k</sup>	
260-MC-001	0.400	32.308	66.793	27.334	25.902	53.549	25.902	25.90	28.007	57.902	28.007	28.00	31.064	31.064
260-MC-002	0.400	32.464	67.108	27.334	25.969	53.681	25.969	25.96	28.143	58.175	28.143	28.14	31.197	31.197
260-MC-003	0.400	22.387	43.894	19.603	16.571	32.490	16.571	16.57	19.400	38.039	19.400	19.400	21.173	21.173
280-LV-001	0.400	46.858	112.850	39.343	50.026	120.479	50.026	50.02	40.579	97.728	40.579	40.57	49.226	49.226
280-LV-001	0.400	47.352	113.920	39.343	50.396	121.241	50.396	50.39	41.001	98.640	41.001	41.00	49.662	49.662
280-LV-002	0.400	46.548	112.265	39.343	49.789	120.081	49.789	49.78	40.311	97.221	40.311	40.31	48.937	48.937
280-LV-002	0.400	47.810	114.774	39.343	50.741	121.812	50.741	50.74	41.397	99.380	41.397	41.39	50.092	50.092
280-MC-001	0.400	32.229	66.898	25.311	25.856	53.670	25.856	25.85	27.908	57.929	27.908	27.90	31.006	31.006
280-MC-002	0.400	28.643	59.815	25.311	24.243	50.626	24.243	24.24	24.805	51.801	24.805	24.80	27.987	27.987
280-MC-003	0.400	29.281	60.986	25.311	24.540	51.112	24.540	24.54	25.355	52.810	25.355	25.35	28.509	28.509
280-MC-004	0.400	31.203	65.051	25.311	25.417	52.987	25.417	25.41	27.023	56.335	27.023	27.02	30.173	30.173
280-MC-005	0.400	29.346	61.192	25.311	24.573	51.238	24.573	24.57	25.414	52.993	25.414	25.41	28.577	28.577
280-MC-006	0.400	30.923	64.412	25.311	25.291	52.681	25.291	25.29	26.779	55.781	26.779	26.77	29.922	29.922
280-MC-007	0.400	41.673	94.814	34.862	40.726	92.659	40.726	40.72	36.085	82.099	36.085	36.08	42.032	42.032
280-MV-001	4.160	15.401	37.809	12.690	0.200	0.490	0.200	0.200	13.336	32.740	13.336	13.33	13.385	13.385
280-MV-001	4.160	15.567	38.292	12.690	0.200	0.491	0.200	0.200	13.472	33.139	13.472	13.47	13.522	13.522
400-MC-001	0.400	19.656	39.604	15.218	18.028	36.325	18.028	18.02	17.022	34.298	17.022	17.02	19.156	19.156
700-SG-001	23.000	22.816	57.999	17.183	0.399	1.015	0.399	0.399	19.804	50.344	19.804	19.80	19.903	19.903
700-SG-001	23.000	22.816	57.999	17.183	0.399	1.015	0.399	0.399	19.804	50.344	19.804	19.80	19.903	19.903
700-SG-001	23.000	21.957	56.184	17.181	0.399	1.022	0.399	0.399	19.013	48.652	19.013	19.01	19.113	19.113
800-MV-001	4.160	8.610	20.033	6.256	0.199	0.464	0.199	0.199	7.442	17.314	7.442	7.44	7.491	7.491
800-MV-002	4.160	7.874	17.947	5.046	0.199	0.454	0.199	0.199	6.699	15.270	6.699	6.69	6.749	6.749
800-US-003	0.400	19.111	37.180	17.410	18.226	35.458	18.226	18.22	16.551	32.200	16.551	16.55	18.832	18.832
Access Gate	0.400	1.385	2.564	1.105	1.280	2.370	1.280	1.280	1.200	2.221	1.200	1.200	1.340	1.340
Admin	0.400	37.041	82.077	28.280	35.796	79.319	35.796	35.79	63.101	71.132	32.101	32.10	37.176	37.176
Cons Camp 1	0.400	14.335	28.068	12.655	13.859	27.136	13.859	13.85	12.414	24.308	12.414	12.41	14.139	14.139
Cons Camp 2	0.400	14.287	27.978	12.606	13.829	27.081	13.829	13.82	12.373	24.229	12.373	12.37	14.098	14.098
Cons Camp 3	0.400	14.289	27.981	12.607	13.830	27.083	13.830	13.83	12.374	24.232	12.374	12.37	14.100	14.100
Construction	0.400	3.089	5.725	2.759	0.195	0.361	0.195	0.195	2.675	4.958	2.675	2.67	2.720	2.720
CONSTRUCT	0.400	19.937	39.049	16.710	19.426	38.047	19.426	19.42	17.255	33.795	17.255	17.25	19.733	19.733
LAB	0.400	19.527	37.788	16.380	19.166	37.089	19.166	19.16	16.901	32.706	16.901	16.90	19.465	19.465
POLYCLINIC	0.400	12.162	23.626	10.323	11.784	22.891	11.784	11.78	10.528	20.453	10.528	10.52	12.038	12.038
SHOP	0.400	12.290	24.062	10.447	11.863	23.226	11.863	11.86	10.639	20.830	10.639	10.63	12.115	12.115
Take-up	0.400	4.111	7.610	3.650	3.932	7.279	3.932	3.93	3.560	6.590	3.560	3.56	4.034	4.034
Water Well 1	0.400	14.686	28.951	14.370	14.751	29.079	14.751	14.75	12.718	25.072	12.718	12.71	14.727	14.727
Water Well 2	0.400	14.728	29.036	14.511	14.779	29.137	14.779	14.77	12.754	25.146	12.754	12.75	14.762	14.762
Water Well 3	0.400	11.046	21.760	10.855	11.064	21.795	11.064	11.06	9.566	18.845	9.566	9.56	11.059	11.059
Water Well 4	0.400	12.149	23.464	11.925	11.144	21.523	11.144	11.14	10.521	20.320	10.521	10.52	11.921	11.921

Project: Toromocho Project  
 Locatio Peru  
 Contrac C-560  
 Enginee Lena Coopamah  
 Filenam Toromocho~Detail

ET  
 5.5.6C

Page: 5  
 Date: 09-07-2010  
 SN: JOHNBROWN  
 Revision: Base  
 Config.: Min.SC

Sequence Impedance Summary Report

Bus		Positive Seq. Imp. (ohm)			Negative Seq. Imp. (ohm)			Zero Seq. Imp. (ohm)		
ID	KV	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance
110-SG-001	7.200.13716	0.80285	0.81448	0.13711	0.80287	0.81449	498.991100.85875	498.99190.00000	0.00000	0.00000
110-SG-002	7.200.15613	0.87351	0.88735	0.15608	0.87352	0.88736	498.991100.85875	498.99190.00000	0.00000	0.00000
110-SG-003	7.200.14317	0.82370	0.83605	0.14326	0.82341	0.83578	498.991100.85875	498.99190.00000	0.00000	0.00000
140-LV-001	0.400.00167	0.00754	0.00772	0.00167	0.00753	0.00771	0.00274	0.00899	0.00940	0.00000
140-MC-001	0.400.00313	0.01060	0.01105	0.00314	0.01058	0.01104	0.00735	0.01651	0.01808	0.00000
140-MC-002	0.400.00306	0.01038	0.01082	0.00307	0.01037	0.01081	0.00735	0.01651	0.01808	0.00000
140-MC-003	0.400.00303	0.01027	0.01071	0.00303	0.01026	0.01070	0.00735	0.01651	0.01808	0.00000
200-LV-001	0.400.00177	0.00740	0.00761	0.00177	0.00743	0.00764	0.00274	0.00899	0.00940	0.00000
200-MC-001	0.400.00295	0.00963	0.01007	0.00296	0.00965	0.01009	0.00735	0.01651	0.01808	0.00000
200-MC-002	0.400.00291	0.00950	0.00993	0.00291	0.00952	0.00995	0.00735	0.01651	0.01808	0.00000
200-MC-003	0.400.00442	0.01482	0.01546	0.00448	0.01466	0.01533	0.00750	0.01900	0.02043	0.00000
200-MC-004	0.400.00403	0.01314	0.01374	0.00404	0.01306	0.01367	0.00750	0.01900	0.02043	0.00000
200-MV-001	4.160.03711	0.24646	0.24924	0.03708	0.25012	0.25285	36.04876	0.23190	36.04950	0.00000
200-MV-002	4.160.03978	0.23576	0.23909	0.04807	0.21603	0.22131	36.04876	0.23190	36.04950	0.00000
200-MV-003	4.160.02150	0.17386	0.17519	0.02316	0.16265	0.16429	36.03841	0.15261	36.03873	0.00000
205-LV-001	0.400.00079	0.00429	0.00436	0.00079	0.00432	0.00439	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000
205-MC-001	0.400.00191	0.00624	0.00652	0.00191	0.00626	0.00654	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
205-MC-002	0.400.00194	0.00634	0.00663	0.00194	0.00637	0.00666	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
205-MC-003	0.400.00216	0.00706	0.00738	0.00216	0.00709	0.00741	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
205-MV-001	4.160.02274	0.17859	0.18003	0.02237	0.18352	0.18488	36.04758	0.22978	36.04831	0.00000
210-LV-001	0.400.00071	0.00441	0.00447	0.00071	0.00441	0.00447	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000
210-LV-001	0.400.00069	0.00445	0.00451	0.00069	0.00446	0.00451	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000
210-LV-001	0.400.00069	0.00461	0.00466	0.00069	0.00461	0.00466	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000
210-MC-001	0.400.00197	0.00677	0.00705	0.00197	0.00677	0.00705	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
210-MC-002	0.400.00201	0.00703	0.00731	0.00201	0.00704	0.00732	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
210-MC-003	0.400.00180	0.00626	0.00651	0.00179	0.00627	0.00652	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
210-MC-004	0.400.00181	0.00622	0.00648	0.00181	0.00622	0.00648	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
210-MC-005	0.400.00179	0.00638	0.00662	0.00179	0.00638	0.00662	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
210-MC-006	0.400.00213	0.00758	0.00788	0.00213	0.00758	0.00788	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
210-MC-007	0.400.00208	0.00739	0.00768	0.00208	0.00739	0.00768	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000
210-SG-001	4.160.01509	0.16107	0.16177	0.01511	0.16098	0.16169	36.03841	0.15261	36.03873	0.00000
210-SG-001	4.160.01462	0.15057	0.15128	0.01452	0.15163	0.15232	36.03841	0.15261	36.03873	0.00000
210-SG-001	4.160.01459	0.16290	0.16355	0.01457	0.16290	0.16355	36.03841	0.15261	36.03873	0.00000
220-LV-001	0.400.00058	0.00411	0.00415	0.00057	0.00409	0.00413	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000
220-LV-001	0.400.00056	0.00421	0.00425	0.00056	0.00420	0.00424	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000

Toromocho Project

ETAP

6

LocatPeru

5.5.6C

Date:

09-07-2010

C-560

SN:

JOHNBROWN2

Lena Coopamah

Revision: Base

Toromocho\_Detail

Config.:

Min\_SC

Bus Positive Seq. Imp. (ohm) Negative Seq. Imp. (ohm) Zero Seq. Imp. (ohm) Fault Zf (ohm)

ID	kV	Resistance	Resistan	Resistan	Resistance								
220-LV-001 Bus3	0.4000	0.0053	0.00440	0.00443	0.00053	0.00438	0.004420	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-001	0.4000	0.0151	0.00558	0.00578	0.00151	0.00557	0.005770	0.00421	0.01025	0.01108	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-002	0.4000	0.0155	0.00588	0.00608	0.00155	0.00586	0.006060	0.00421	0.01025	0.01108	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-003	0.4000	0.0169	0.00671	0.00692	0.00169	0.00669	0.006900	0.00421	0.01025	0.01108	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-004	0.4000	0.0167	0.00681	0.00701	0.00167	0.00683	0.007030	0.00421	0.01025	0.01108	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-005	0.4000	0.0158	0.00596	0.00617	0.00158	0.00598	0.006180	0.00421	0.01025	0.01108	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-006	0.4000	0.0165	0.00654	0.00674	0.00165	0.00652	0.006730	0.00421	0.01025	0.01108	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-007	0.4000	0.0199	0.00761	0.00787	0.00198	0.00763	0.007890	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-008	0.4000	0.0345	0.01022	0.01079	0.00345	0.01021	0.010770	0.00958	0.01902	0.02130	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-001	4.1600	0.0889	0.08810	0.08855	0.00877	0.08576	0.08621	36.0356	0.10318	36.03583	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-002	4.1600	0.0889	0.08787	0.08832	0.00877	0.08554	0.085983	36.0356	0.10250	36.03583	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-003	4.1600	0.0881	0.08719	0.08764	0.00867	0.08512	0.08556	36.0356	0.10250	36.03583	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-004	4.1600	0.0881	0.08719	0.08764	0.00867	0.08512	0.08556	36.0356	0.10250	36.03583	0.00000	0.00000	0.00000
220-SG-001 Bus1	4.1600	0.00670	0.08427	0.08454	0.00664	0.08204	0.08231	36.0316	0.09191	36.03172	0.00000	0.00000	0.00000
220-SG-001 Bus2	4.1600	0.00662	0.08359	0.08385	0.00654	0.08162	0.08188	36.0316	0.09191	36.03172	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-001 Bus1	0.4000	0.0057	0.00439	0.00443	0.00057	0.00441	0.004440	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-001 Bus2	0.4000	0.0064	0.00404	0.00409	0.00064	0.00406	0.004110	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-002 Bus1	0.4000	0.0059	0.00428	0.00432	0.00059	0.00430	0.004340	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-002 Bus2	0.4000	0.0054	0.00463	0.00466	0.00054	0.00465	0.004680	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-001	0.4000	0.0191	0.00697	0.00723	0.00190	0.00699	0.007240	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-002	0.4000	0.0193	0.00705	0.00731	0.00193	0.00707	0.007330	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-003	0.4000	0.0203	0.00742	0.00769	0.00202	0.00744	0.007710	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-004	0.4000	0.0136	0.00509	0.00527	0.00136	0.00511	0.005280	0.00360	0.00924	0.00992	0.00000	0.00000	0.00000
230-MV-001 Bus1	4.1600	0.1059	0.08751	0.08815	0.01025	0.08980	0.090383	36.0327	0.09403	36.03289	0.00000	0.00000	0.00000
230-MV-001 Bus2	4.1600	0.1066	0.09304	0.09365	0.01027	0.09524	0.095793	36.0327	0.09403	36.03289	0.00000	0.00000	0.00000
245-MC-001	0.4000	0.0203	0.00752	0.00779	0.00203	0.00752	0.007790	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
245-MC-002	0.4000	0.0199	0.00739	0.00765	0.00199	0.00739	0.007660	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
251-MC-001	0.4000	0.0259	0.00917	0.00953	0.00259	0.00933	0.009680	0.00290	0.01148	0.01184	0.00000	0.00000	0.00000
251-MC-002	0.4000	0.0109	0.00583	0.00593	0.00109	0.00583	0.005930	0.00083	0.00586	0.00592	0.00000	0.00000	0.00000
255-LV-001 Bus1	0.4000	0.0049	0.00499	0.00501	0.00049	0.00498	0.005010	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
255-LV-001 Bus2	0.4000	0.0049	0.00498	0.00501	0.00049	0.00498	0.005010	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
255-LV-001 Bus3	0.4000	0.0055	0.00466	0.00470	0.00055	0.00466	0.004700	0.0037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-001	0.4000	0.0189	0.00781	0.00804	0.00189	0.00781	0.008040	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-002	0.4000	0.0195	0.00804	0.00827	0.00195	0.00804	0.008270	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-003	0.4000	0.0189	0.00780	0.00803	0.00189	0.00780	0.008030	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-004	0.4000	0.0193	0.00742	0.00767	0.00193	0.00742	0.007670	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-005	0.4000	0.0188	0.00722	0.00747	0.00188	0.00722	0.007470	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000

Project: Toromocho Project  
 Location: Peru  
 Contract: C-560  
 Engineer: Lena Coopamah  
 Filename: Toromocho~Detail

ETAP  
 5.5.6C

Page: 7  
 Date: 09-07-2010  
 SN: JOHNBROWN2  
 Revision: Base  
 Config.: Min.SC

Bus Positive Seq. Imp. (ohm) Negative Seq. Imp. (ohm) Zero Seq. Imp. (ohm) Fault Zf (ohm)

I	kV	Resistance	Reactance	Resistance	Reactance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance			
255-MV-001	4.160	0.00739	0.11348	0.11372	0.00742	0.11338	0.1136	36.03160	0.09191	36.03172	0.00000	0.00000	0.00000
255-MV-001	4.160	0.00739	0.11346	0.11370	0.00742	0.11337	0.1136	36.03160	0.09191	36.03172	0.00000	0.00000	0.00000
255-MV-001	4.160	0.00770	0.11273	0.11299	0.00769	0.11274	0.1130	36.03160	0.09191	36.03172	0.00000	0.00000	0.00000
255-MV-	4.160	0.32927	1.32125	1.36166	0.33045	1.34602	1.3859	0.36976	1.46424	1.51020	0.00000	0.00000	0.00000
260-LV-001	0.400	0.00055	0.00425	0.00429	0.00055	0.00423	0.0042	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
260-MC-001	0.400	0.00190	0.00689	0.00715	0.00190	0.00688	0.0071	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
260-MC-	0.400	0.00189	0.00686	0.00711	0.00189	0.00684	0.0071	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
260-MC-	0.400	0.00329	0.00978	0.01032	0.00328	0.00976	0.0103	0.00958	0.01902	0.02130	0.00000	0.00000	0.00000
280-LV-001	0.400	0.00067	0.00488	0.00493	0.00067	0.00488	0.0049	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
280-LV-001	0.400	0.00067	0.00483	0.00488	0.00067	0.00483	0.0048	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
280-LV-002	0.400	0.00066	0.00492	0.00496	0.00066	0.00492	0.0049	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
280-LV-002	0.400	0.00067	0.00478	0.00483	0.00067	0.00479	0.0048	0.00037	0.00398	0.00399	0.00000	0.00000	0.00000
280-MC-001	0.400	0.00188	0.00691	0.00717	0.00188	0.00692	0.0071	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
280-MC-	0.400	0.00208	0.00779	0.00806	0.00208	0.00779	0.0080	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
280-MC-	0.400	0.00205	0.00762	0.00789	0.00205	0.00762	0.0078	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
280-MC-	0.400	0.00191	0.00715	0.00740	0.00191	0.00715	0.0074	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
280-MC-	0.400	0.00204	0.00760	0.00787	0.00204	0.00760	0.0078	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
280-MC-	0.400	0.00193	0.00721	0.00747	0.00193	0.00721	0.0074	0.00498	0.01150	0.01253	0.00000	0.00000	0.00000
280-MC-	0.400	0.00102	0.00545	0.00554	0.00102	0.00545	0.0055	0.00149	0.00575	0.00594	0.00000	0.00000	0.00000
280-MV-001	4.160	0.01782	0.15493	0.15595	0.01783	0.15496	0.1559	36.03841	0.15261	36.03873	0.00000	0.00000	0.00000
280-MV-001	4.160	0.01715	0.15333	0.15429	0.01712	0.15355	0.1545	36.03841	0.15261	36.03873	0.00000	0.00000	0.00000
400-MC-001	0.400	0.00340	0.01125	0.01175	0.00340	0.01125	0.0117	0.00487	0.01412	0.01494	0.00000	0.00000	0.00000
700-SG-001	23.000	0.04966	0.57989	0.58202	0.05054	0.57714	0.5793	99.62184	0.71276	99.62439	0.00000	0.00000	0.00000
700-SG-001	23.000	0.04966	0.57989	0.58202	0.05054	0.57714	0.5793	99.62184	0.71276	99.62439	0.00000	0.00000	0.00000
700-SG-001	23.000	0.04778	0.60289	0.60478	0.04729	0.60306	0.6049	99.62184	0.71276	99.62439	0.00000	0.00000	0.00000
800-MV-	4.160	0.04148	0.27584	0.27894	0.04153	0.27697	0.2800	36.04758	0.22978	36.04831	0.00000	0.00000	0.00000
800-MV-	4.160	0.05071	0.30078	0.30503	0.05099	0.31178	0.3159	36.04758	0.22978	36.04831	0.00000	0.00000	0.00000
.800-US-003	0.400	0.00388	0.01144	0.01208	0.00388	0.01144	0.0120	0.00476	0.01300	0.01385	0.00000	0.00000	0.00000
Access Gate	0.400	0.06288	0.15439	0.16670	0.06288	0.15438	0.1666	0.07793	0.19249	0.20766	0.00000	0.00000	0.00000
Admin	0.400	0.00130	0.00610	0.00623	0.00130	0.00609	0.0062	0.00096	0.00684	0.00691	0.00000	0.00000	0.00000
Cons Camp	0.400	0.00507	0.01529	0.01611	0.00507	0.01529	0.0161	0.00547	0.01691	0.01777	0.00000	0.00000	0.00000
Cons Camp	0.400	0.00508	0.01534	0.01616	0.00508	0.01534	0.0161	0.00547	0.01691	0.01777	0.00000	0.00000	0.00000
Cons Camp	0.400	0.00508	0.01534	0.01616	0.00508	0.01534	0.0161	0.00547	0.01691	0.01777	0.00000	0.00000	0.00000
Constructio	0.400	0.02809	0.06928	0.07476	0.02809	0.06928	0.0747	3.49535	0.07718	3.49620	0.00000	0.00000	0.00000
CONSTRU	0.400	0.00365	0.01099	0.01158	0.00365	0.01101	0.0116	0.00384	0.01188	0.01248	0.00000	0.00000	0.00000
LAB	0.400	0.00388	0.01117	0.01183	0.00388	0.01119	0.0118	0.00384	0.01188	0.01248	0.00000	0.00000	0.00000
POLYCLIN	0.400	0.00614	0.01797	0.01899	0.00614	0.01798	0.0190	0.00641	0.01979	0.02080	0.00000	0.00000	0.00000

Project: Toromocho Project  
 Location: Peru  
 Contract: C-560  
 Engineer: Lena Coopamah  
 Filename: Toromocho-Detail

ETAP  
 5.5.6C

Page: 8  
 Date: 09-07-2010  
 SN: JOHNBROWN2  
 Revision: Base  
 Config.: Min.SC

Bus Positive Seq. Imp. (ohm) Negative Seq. Imp. (ohm) Zero Seq. Imp. (ohm) Fault Zf (ohm)

ID	kV	Resistance Reactance		Resistance Reactance		Resistance Reactance			Resistance Reactance				
SHOP	0.4000	0.00593	0.01783	0.01879	0.00592	0.01785	0.01881	0.00641	0.01979	0.02080	0.00000	0.00000	0.00000
Take-up Winch	0.4000	0.02119	0.05203	0.05617	0.02119	0.05202	0.05617	0.02436	0.05901	0.06384	0.00000	0.00000	0.00000
Water Well 1	0.4000	0.00481	0.01497	0.01573	0.00481	0.01497	0.01573	0.00478	0.01476	0.01552	0.00000	0.00000	0.00000
Water Well 2	0.4000	0.00480	0.01493	0.01568	0.00480	0.01493	0.01568	0.00478	0.01476	0.01552	0.00000	0.00000	0.00000
Water Well 3	0.4000	0.00641	0.01990	0.02091	0.00641	0.01990	0.02091	0.00641	0.01979	0.02080	0.00000	0.00000	0.00000

Project: Toromocho Project  
 Location: Peru  
 Contract: C-560  
 Engineer: Lena Coopamah  
 Filename: Toromocho-Detail

ETAP  
 5.5.6C

Page:  
 Date: 09-07-2010  
 SN: JOHNBROWN2  
 Revision: Base  
 Config.: Max.SC

Short-Circuit Summary Report

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus ID	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault				Line-to-Line Fault *						
		I <sup>1</sup> k	ip	Ik	I <sup>1</sup> k	ip	Ib	Ik	I <sup>1</sup> k	ip	Ib	Ik	I <sup>1</sup> k		
110-SG-001	7.205.543	12.501	5.461	0.025	0.056	0.025	0.025	4.800	10.826	4.800	4.800	4.806	10.840	4.806	4.806
110-SG-002	7.205.065	11.330	4.996	0.025	0.056	0.025	0.025	4.387	9.812	4.387	4.387	4.393	9.826	4.393	4.393
110-SG-003	7.205.491	12.320	5.437	0.025	0.056	0.025	0.025	4.756	10.671	4.756	4.756	4.762	10.684	4.762	4.762
140-LV-001	0.4032.273	69.529	29.720	29.969	64.565	29.969	29.969	27.969	60.256	27.969	27.969	31.986	68.909	31.986	31.986
140-MC-001	0.4022.021	44.184	20.816	18.040	36.197	18.040	18.040	19.079	38.282	19.079	19.079	21.253	42.645	21.253	21.253
140-MC-002	0.4022.483	45.118	20.816	18.245	36.612	18.245	18.245	19.480	39.091	19.480	19.480	21.650	43.445	21.650	21.650
140-MC-003	0.4022.718	45.592	20.816	18.347	36.820	18.347	18.347	19.684	39.502	19.684	19.684	21.851	43.852	21.851	21.851
200-LV-001	0.4032.363	69.532	24.074	29.975	64.400	29.975	29.975	27.987	60.129	27.987	27.987	31.933	68.607	31.933	31.933
200-MC-001	0.4023.954	48.031	17.906	18.852	37.800	18.852	18.852	20.725	41.556	20.725	20.725	22.849	45.815	22.849	22.849
200-MC-002	0.4024.288	48.703	17.906	18.989	38.077	18.989	18.989	21.014	42.138	21.014	21.014	23.135	46.390	23.135	23.135
200-MC-003	0.4016.018	32.245	13.754	14.444	29.076	14.444	14.444	13.926	28.034	13.926	13.926	15.730	31.666	15.730	15.730
200-MC-004	0.4017.957	35.885	14.566	15.425	30.825	15.425	15.425	15.587	31.148	15.587	15.587	17.345	34.661	17.345	17.345
200-MV-001	4.1610.470	24.451	8.181	0.199	0.466	0.199	0.199	9.006	21.032	9.006	9.006	9.055	21.148	9.055	9.055
200-MV-002	4.1610.907	25.159	8.489	0.199	0.460	0.199	0.199	9.784	22.569	9.784	9.784	9.832	22.679	9.832	9.832
200-MV-003	4.1615.172	36.424	12.911	0.200	0.479	0.200	0.200	13.522	32.463	13.522	13.522	13.570	32.579	13.570	13.570
205-LV-001	0.4057.094	132.885	39.725	59.131	137.628	59.131	59.131	49.283	114.705	49.283	49.283	59.534	138.564	59.534	59.534
205-MC-001	0.4036.849	74.518	25.464	28.079	56.781	28.079	28.079	31.859	64.427	31.859	31.859	34.840	70.454	34.840	34.840
205-MC-002	0.4036.236	73.299	25.464	27.839	56.314	27.839	27.839	31.329	63.373	31.329	31.329	34.319	69.421	34.319	34.319
205-MC-003	0.4032.590	66.035	25.464	26.329	53.349	26.329	26.329	28.175	57.089	28.175	28.175	31.221	63.261	31.221	31.221
205-MV-001	4.1614.645	35.439	10.763	0.200	0.483	0.200	0.200	12.528	30.317	12.528	12.528	12.579	30.439	12.579	12.579
210-LV-001	0.4056.433	134.196	44.992	58.772	139.758	58.772	58.772	48.874	116.221	48.874	48.874	58.678	139.535	58.678	58.678
210-LV-001	0.4055.965	133.607	44.992	58.397	139.413	58.397	58.397	48.431	115.620	48.431	48.431	58.169	138.869	58.169	58.169
210-LV-001	0.4053.930	129.340	44.491	56.929	136.533	56.929	56.929	46.704	112.011	46.704	46.704	56.378	135.211	56.378	56.378
210-MC-001	0.4034.383	70.274	27.517	27.126	55.441	27.126	27.126	29.777	60.860	29.777	29.777	32.869	67.179	32.869	32.869
210-MC-002	0.4033.152	67.935	27.517	26.604	54.518	26.604	26.604	28.699	58.810	28.699	28.699	31.844	65.254	31.844	31.844
210-MC-003	0.4037.164	75.971	27.517	28.232	57.712	28.232	28.232	32.172	65.768	32.172	32.172	35.258	72.075	35.258	35.258
210-MC-004	0.4037.335	76.175	27.517	28.300	57.740	28.300	28.300	32.334	65.971	32.334	32.334	35.381	72.188	35.381	35.381
210-MC-005	0.4036.495	74.953	27.332	27.983	57.471	27.983	27.983	31.606	64.911	31.606	31.606	34.736	71.341	34.736	34.736
210-MC-006	0.4030.766	63.414	27.332	25.556	52.676	25.556	25.556	26.644	54.918	26.644	26.644	29.855	61.536	29.855	29.855
210-MC-007	0.4031.544	64.987	27.332	25.909	53.378	25.909	25.909	27.318	56.280	27.318	27.318	30.518	62.873	30.518	30.518
210-SG-001	4.1616.891	42.507	15.679	0.200	0.503	0.200	0.200	14.629	36.817	14.629	14.629	14.679	36.942	14.679	14.679
210-SG-001	4.1617.923	44.905	15.679	0.200	0.501	0.200	0.200	15.473	38.766	15.473	15.473	15.523	38.891	15.523	15.523
210-SG-001	4.1616.246	41.052	15.091	0.200	0.505	0.200	0.200	14.069	35.551	14.069	14.069	14.119	35.676	14.119	14.119
220-LV-001	0.4060.851	146.894	50.122	61.951	149.549	61.951	61.951	52.791	127.438	52.791	52.791	62.144	150.016	62.144	62.144
220-LV-001	0.4059.197	143.603	49.428	60.794	147.478	60.794	60.794	51.353	124.576	51.353	51.353	60.634	147.091	60.634	60.634
220-LV-001	0.4057.304	140.202	50.122	59.453	145.461	59.453	59.453	49.718	121.642	49.718	49.718	58.848	143.980	58.848	58.848

**Project:** Toromocho Project **ETAP** **Page:** 2  
**Location:** Peru **5.5.6C** **Date:** 09-07-2010  
**Contract:** C-560 **SN:** JOHNBROWN2  
**Engineer:** Lena Coopamah **Revision:** Base  
**Filename:** Toromocho-Detail **Config.:** Max.SC

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus ID	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground						
	k	I <sup>3k</sup>	ip	Ik	I <sup>3k</sup>	ip	Ib	Ik	I <sup>3k</sup>	ip	Ib	Ik	I <sup>3k</sup>	ip	Ib	Ik
220-MC-002	0.4039.916	82.987	31.276	31.186	64.837	31.186	31.186	34.602	71.937	34.602	34.602	38.141	79.296	38.141	38.141	38.141
220-MC-003	0.4035.338	74.079	31.548	29.232	61.279	29.232	29.232	30.637	64.223	30.637	30.637	34.318	71.939	34.318	34.318	34.318
220-MC-004	0.4034.815	73.244	30.941	28.965	60.936	28.965	28.965	30.117	63.362	30.117	30.117	33.891	71.301	33.891	33.891	33.891
220-MC-005	0.4039.478	81.939	31.207	30.975	64.289	30.975	30.975	34.154	70.889	34.154	34.154	37.721	78.292	37.721	37.721	37.721
220-MC-006	0.4036.256	75.959	31.548	29.644	62.107	29.644	29.644	31.432	65.852	31.432	31.432	35.101	73.539	35.101	35.101	35.101
220-MC-007	0.4030.921	64.142	28.811	25.628	53.161	25.628	25.628	26.751	55.491	26.751	26.751	30.094	62.425	30.094	30.094	30.094
220-MC-008	0.4022.105	43.111	20.485	16.608	32.391	16.608	16.608	19.155	37.358	19.155	19.155	20.969	40.894	20.969	20.969	20.969
220-MV-001	4.1630.407	75.541	23.136	0.200	0.497	0.200	0.200	26.645	66.196	26.645	26.645	26.695	66.318	26.695	26.695	26.695
220-MV-002	4.1630.498	75.737	23.196	0.200	0.496	0.200	0.200	26.725	66.367	26.725	26.725	26.774	66.489	26.774	26.774	26.774
220-MV-003	4.1629.593	73.506	21.796	0.200	0.496	0.200	0.200	25.912	64.362	25.912	25.912	25.961	64.484	25.961	25.961	25.961
220-MV-004	4.1629.593	73.506	21.796	0.200	0.496	0.200	0.200	25.912	64.362	25.912	25.912	25.961	64.484	25.961	25.961	25.961
220-SG-001	4.1632.062	82.198	24.210	0.200	0.513	0.200	0.200	28.095	72.027	28.095	28.095	28.144	72.153	28.144	28.144	28.144
220-SG-001	4.1631.058	79.545	22.688	0.200	0.512	0.200	0.200	27.192	69.642	27.192	27.192	27.241	69.769	27.241	27.241	27.241
230-LV-001	0.4057.286	138.850	49.279	59.290	143.709	59.290	59.290	49.517	120.021	49.517	49.517	58.900	142.764	58.900	58.900	58.900
230-LV-001	0.4061.149	145.366	47.993	62.015	147.425	62.015	62.015	52.859	125.658	52.859	52.859	62.604	148.824	62.604	62.604	62.604
230-LV-002	0.4058.565	141.258	49.279	60.204	145.209	60.204	60.204	50.625	122.105	50.625	50.625	60.091	144.936	60.091	60.091	60.091
230-LV-002	0.4054.291	132.792	48.608	57.107	139.681	57.107	57.107	46.927	114.780	46.927	46.927	56.184	137.422	56.184	56.184	56.184
230-MC-001	0.4033.631	69.143	29.041	26.810	55.119	26.810	26.810	29.097	59.821	29.097	29.097	32.323	66.455	32.323	32.323	32.323
230-MC-002	0.4033.257	68.391	29.041	26.651	54.806	26.651	26.651	28.773	59.170	28.773	28.773	32.005	65.816	32.005	32.005	32.005
230-MC-003	0.4031.628	65.112	29.041	25.938	53.398	25.938	25.938	27.363	56.333	27.363	27.363	30.617	63.031	30.617	30.617	30.617
230-MC-004	0.4045.950	95.680	32.599	35.392	73.697	35.392	35.392	39.752	82.774	39.752	39.752	43.528	90.638	43.528	43.528	43.528
230-MV-001	4.1630.439	74.513	22.389	0.200	0.489	0.200	0.200	26.061	63.797	26.061	26.061	26.111	63.919	26.111	26.111	26.111
230-MV-001	4.1627.785	68.376	21.082	0.200	0.492	0.200	0.200	23.811	58.596	23.811	23.811	23.861	58.719	23.861	23.861	23.861
245-MC-001	0.4031.141	64.475	27.005	25.734	53.282	25.734	25.734	26.966	55.832	26.966	26.966	30.242	62.614	30.242	30.242	30.242
245-MC-002	0.4031.691	65.590	27.005	25.982	53.776	25.982	25.982	27.443	56.798	27.443	27.443	30.712	63.563	30.712	30.712	30.712
251-MC-001	0.4026.197	53.781	20.535	24.355	50.000	24.355	24.355	22.525	46.242	22.525	22.525	25.505	52.361	25.505	25.505	25.505
251-MC-002	0.4042.328	95.937	36.968	42.632	96.627	42.632	42.632	36.656	83.081	36.656	36.656	42.994	97.446	42.994	42.994	42.994
255-LV-001	0.4051.419	127.992	49.987	55.026	136.970	55.026	55.026	44.532	110.849	44.532	44.532	53.510	133.197	53.510	53.510	53.510
255-LV-001	0.4051.450	128.052	49.987	55.050	137.010	55.050	55.050	44.559	110.900	44.559	44.559	53.540	133.251	53.540	53.540	53.540
255-LV-001	0.4053.988	132.581	49.297	56.960	139.880	56.960	56.960	46.754	114.817	46.754	46.754	55.959	137.421	55.959	55.959	55.959
255-MC-001	0.4030.617	64.216	29.290	25.518	53.521	25.518	25.518	26.516	55.614	26.516	26.516	29.956	62.829	29.956	29.956	29.956
255-MC-002	0.4029.759	62.454	29.290	25.117	52.712	25.117	25.117	25.773	54.088	25.773	25.773	29.220	61.324	29.220	29.220	29.220
255-MC-003	0.4030.651	64.279	29.290	25.534	53.547	25.534	25.534	26.545	55.668	26.545	26.545	29.984	62.879	29.984	29.984	29.984
255-MC-004	0.4031.766	66.015	29.057	26.024	54.083	26.024	26.024	27.510	57.170	27.510	27.510	30.832	64.073	30.832	30.832	30.832
255-MC-005	0.4032.603	67.713	29.057	26.393	54.815	26.393	26.393	28.235	58.641	28.235	28.235	31.546	65.517	31.546	31.546	31.546
255-MV-001	4.1624.606	63.873	23.903	0.200	0.519	0.200	0.200	21.314	55.326	21.314	21.314	21.363	55.456	21.363	21.363	21.363
255-MV-001	4.1624.609	63.879	23.903	0.200	0.519	0.200	0.200	21.316	55.331	21.316	21.316	21.366	55.461	21.366	21.366	21.366
255-MV-001	4.1623.610	61.097	22.419	0.200	0.517	0.200	0.200	20.446	52.909	20.446	20.446	20.496	53.038	20.496	20.496	20.496
255-MV-002	4.161.929	4.048	1.708	1.859	3.903	1.859	1.859	1.657	3.477	1.657	1.657	1.898	3.984	1.898	1.898	1.898
260-LV-001	0.4058.747	142.764	49.428	60.477	146.968	60.477	60.477	50.964	123.849	50.964	50.964	60.213	146.327	60.213	60.213	60.213

Project: Toromocho Project  
 Location: Peru  
 Contract: C-560  
 Engineer: Lena Coopamah  
 File name: Toromocho-Detail

ETAP  
 5.5.6C

Page: 3  
 Date: 09-07-2010  
 SN: JOHNBROWN2  
 Revision: Base  
 Config.: Max.SC

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus	kV	3-Phase			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			*Line-to-Line-to-Ground					
		I <sup>3k</sup>	ip	Ik	I <sup>1k</sup>	ip	Ib	I <sup>1k</sup>	ip	Ib	I <sup>1k</sup>	ip	Ib	I <sup>1k</sup>		
260-MC-001	0.400	33.858	69.576	29.102	26.930	55.338	26.930	26.930	29.349	60.309	29.349	29.349	32.528	66.841	32.528	32.528
260-MC-002	0.400	34.020	69.899	29.102	26.997	55.471	26.997	26.997	29.488	60.589	29.488	29.488	32.665	67.116	32.665	32.665
260-MC-003	0.400	23.108	45.064	20.485	16.977	33.107	16.977	16.977	20.024	39.050	20.024	20.024	21.830	42.572	21.830	21.830
280-LV-001	0.400	51.431	124.191	44.182	55.040	132.905	55.040	55.040	44.538	107.547	44.538	44.538	54.062	130.544	54.062	54.062
280-LV-001	0.400	51.585	124.418	43.643	55.153	133.024	55.153	55.153	44.667	107.731	44.667	44.667	54.213	130.755	54.213	54.213
280-LV-002	0.400	51.121	123.605	44.182	54.802	132.505	54.802	54.802	44.270	107.040	44.270	44.270	53.772	130.015	53.772	53.772
280-LV-002	0.400	52.041	125.271	43.643	55.501	133.600	55.501	55.501	45.061	108.470	45.061	45.061	54.642	131.531	54.642	54.642
280-MC-001	0.400	33.803	69.772	27.005	26.897	55.516	26.897	26.897	29.272	60.419	29.272	29.272	32.497	67.075	32.497	32.497
280-MC-002	0.400	30.254	62.775	27.208	25.330	52.557	25.330	25.330	26.200	54.363	26.200	26.200	29.504	61.218	29.504	29.504
280-MC-003	0.400	30.768	63.720	27.005	25.564	52.943	25.564	25.564	26.644	55.178	26.644	26.644	29.924	61.971	29.924	29.924
280-MC-004	0.400	32.917	68.178	27.208	26.524	54.937	26.524	26.524	28.506	59.042	28.506	28.506	31.777	65.816	31.777	31.777
280-MC-005	0.400	30.973	64.176	27.208	25.660	53.168	25.660	25.660	26.822	55.577	26.822	26.822	30.107	62.382	30.107	30.107
280-MC-006	0.400	32.611	67.498	27.208	26.390	54.622	26.390	26.390	28.242	58.453	28.242	28.242	31.506	65.209	31.506	31.506
280-MC-007	0.400	44.818	101.773	38.191	43.709	99.254	43.709	43.709	38.808	88.125	38.808	38.808	45.292	102.849	45.292	45.292
280-MV-001	4.160	17.250	42.422	14.749	0.200	0.491	0.200	0.200	14.936	36.731	14.936	14.936	14.986	36.853	14.986	14.986
280-MV-001	4.160	16.975	41.814	14.171	0.200	0.492	0.200	0.200	14.692	36.188	14.692	14.692	14.741	36.310	14.741	14.741
400-MC-001	0.400	21.160	42.584	16.767	19.454	39.151	19.454	19.454	18.324	36.878	18.324	18.324	20.677	41.612	20.677	20.677
700-SG-001	23.000	36.114	92.696	30.328	0.599	1.538	0.599	0.599	31.322	80.396	31.322	31.322	31.471	80.779	31.471	31.471
700-SG-001	23.000	36.114	92.696	30.328	0.599	1.538	0.599	0.599	31.322	80.396	31.322	31.322	31.471	80.779	31.471	31.471
700-SG-001	23.000	25.328	65.269	21.037	0.599	1.543	0.599	0.599	21.928	56.507	21.928	21.928	22.077	56.892	22.077	22.077
800-MV-001	4.160	9.142	21.214	6.796	0.199	0.463	0.199	0.199	7.902	18.335	7.902	7.902	7.951	18.450	7.951	7.951
800-MV-002	4.160	8.245	18.741	5.428	0.199	0.453	0.199	0.199	7.021	15.958	7.021	7.021	7.071	16.072	7.071	7.071
800-US-003	0.400	21.004	40.812	19.344	20.016	38.892	20.016	20.016	18.190	35.345	18.190	18.190	20.705	40.231	20.705	20.705
Access Gate	0.400	1.504	2.784	1.224	1.400	2.592	1.400	1.400	1.302	2.411	1.302	1.302	1.459	2.700	1.459	1.459
Admin	0.400	40.013	88.821	31.364	38.998	86.570	38.998	38.998	34.675	76.973	34.675	34.675	40.278	89.411	40.278	40.278
Cons Camp 1	0.400	15.693	30.747	14.020	15.234	29.849	15.234	15.234	13.590	26.628	13.590	13.590	15.502	30.374	15.502	15.502
Cons Camp 2	0.400	15.636	30.640	13.962	15.199	29.783	15.199	15.199	13.541	26.535	13.541	13.541	15.454	30.284	15.454	15.454
Cons Camp 3	0.400	15.638	30.643	13.963	15.200	29.785	15.200	15.200	13.543	26.538	13.543	13.543	15.456	30.287	15.456	15.456
Construction	0.400	3.389	6.281	3.059	0.195	0.362	0.195	0.195	2.935	5.439	2.935	2.935	2.980	5.523	2.980	2.980
CONSTRUC	0.400	21.798	42.711	18.625	21.343	41.819	21.343	21.343	18.867	36.967	18.867	18.867	21.619	42.359	21.619	21.619
LAB	0.400	21.259	41.101	18.121	20.997	40.594	20.997	20.997	18.401	35.574	18.401	18.401	21.261	41.104	21.261	21.261
POLYCLINI	0.400	13.291	25.820	11.473	12.943	25.143	12.943	12.943	11.507	22.352	11.507	11.507	13.185	25.613	13.185	13.185
SHOP	0.400	13.444	26.338	11.623	13.039	25.545	13.039	13.039	11.639	22.801	11.639	11.639	13.277	26.010	13.277	13.277
Take-up	0.400	4.508	8.342	4.049	4.325	8.004	4.325	4.325	3.904	7.225	3.904	3.904	4.429	8.197	4.429	4.429
Water We(1	0.400	16.229	31.997	15.921	16.315	32.166	16.315	16.315	14.055	27.709	14.055	14.055	16.282	32.101	16.282	16.282
Water We(2	0.400	16.296	32.130	16.089	16.360	32.257	16.360	16.360	14.113	27.825	14.113	14.113	16.339	32.214	16.339	16.339
Water We(3	0.400	12.223	24.080	12.036	12.250	24.134	12.250	12.250	10.585	20.853	10.585	10.585	12.241	24.116	12.241	12.241
Water We(4	0.400	13.189	25.429	12.972	12.015	23.166	12.015	12.015	11.422	22.022	11.422	11.422	12.923	24.916	12.923	12.923

<b>Project:</b>	Toromocho Project	<b>ETAP</b>	<b>Page:</b>	5
<b>Location:</b>	Peru	<b>5.5.6C</b>	<b>Date:</b>	09-07-2010
<b>Contract:</b>	C-560		<b>SN:</b>	JOHNBROWN2
<b>Engineer:</b>	Lena Coopamah		<b>Revision:</b>	Base
<b>Filename:</b>	Toromocho-Detail		<b>Config.:</b>	Max.SC

Bus	Positive Seq. Imp. (ohm)		Negative Seq. Imp. (ohm)		Zero Seq. Imp. (ohm)		Fault Zf (ohm)	
	k	Resistance Reactance	Resistance Reactance	Resistance Reactance	Resistance Reactance	Resistance Reactance	Resistance Reactance	
110-SG-001	7.200.13183	0.73826 0.74994	0.13179 0.73829	0.74996 498.98730	0.80392 498.98730	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
110-SG-002	7.200.15023	0.80681 0.82068	0.15019 0.80685	0.82070 498.98730	0.80392 498.98730	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
110-SG-003	7.200.13638	0.74466 0.75704	0.13642 0.74454	0.75694 498.98730	0.80392 498.98730	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
140-LV-001	0.400.00158	0.00698 0.00716	0.00158 0.00697	0.00715 0.00266	0.00842 0.00884	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
140-MC-001	0.400.00304	0.01004 0.01049	0.00304 0.01003	0.01048 0.00727	0.01595 0.01752	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
140-MC-002	0.400.00297	0.00983 0.01027	0.00297 0.00982	0.01026 0.00727	0.01595 0.01752	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
140-MC-003	0.400.00294	0.00973 0.01017	0.00294 0.00972	0.01016 0.00727	0.01595 0.01752	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-LV-001	0.400.00166	0.00694 0.00714	0.00166 0.00696	0.00716 0.00266	0.00842 0.00884	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-MC-001	0.400.00286	0.00921 0.00964	0.00286 0.00923	0.00966 0.00727	0.01595 0.01752	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-MC-002	0.400.00282	0.00908 0.00951	0.00282 0.00910	0.00953 0.00727	0.01595 0.01752	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-MC-003	0.400.00415	0.01381 0.01442	0.00420 0.01367	0.01431 0.00722	0.01789 0.01929	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-MC-004	0.400.00380	0.01229 0.01286	0.00380 0.01222	0.01280 0.00722	0.01789 0.01929	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-MV-001	4.160.03434	0.22682 0.22941	0.03437 0.22997	0.23252 36.04696	0.21011 36.04757	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-MV-002	4.160.03647	0.21717 0.22021	0.04365 0.20039	0.20509 36.04696	0.21011 36.04757	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
200-MV-003	4.160.01970	0.15708 0.15831	0.02105 0.14786	0.14935 36.03738	0.13807 36.03765	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
205-LV-001	0.400.00071	0.00398 0.00404	0.00071 0.00401	0.00407 0.00034	0.00359 0.00361	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
205-MC-001	0.400.00184	0.00599 0.00627	0.00184 0.00601	0.00629 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
205-MC-002	0.400.00187	0.00609 0.00637	0.00188 0.00611	0.00639 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
205-MC-003	0.400.00208	0.00677 0.00709	0.00209 0.00680	0.00711 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
205-MV-001	4.160.02027	0.16274 0.16400	0.01994 0.16686	0.16804 36.04579	0.20799 36.04639	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-LV-001	0.400.00063	0.00404 0.00409	0.00063 0.00404	0.00409 0.00034	0.00359 0.00361	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-LV-001	0.400.00061	0.00408 0.00413	0.00061 0.00409	0.00413 0.00034	0.00359 0.00361	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-LV-001	0.400.00061	0.00424 0.00428	0.00061 0.00424	0.00428 0.00034	0.00359 0.00361	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-MC-001	0.400.00190	0.00644 0.00672	0.00190 0.00644	0.00672 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-MC-002	0.400.00194	0.00669 0.00697	0.00194 0.00670	0.00697 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-MC-003	0.400.00174	0.00597 0.00621	0.00174 0.00597	0.00622 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-MC-004	0.400.00175	0.00593 0.00619	0.00175 0.00593	0.00619 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-MC-005	0.400.00174	0.00609 0.00633	0.00174 0.00609	0.00633 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-MC-006	0.400.00205	0.00722 0.00751	0.00205 0.00722	0.00751 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-MC-007	0.400.00200	0.00704 0.00732	0.00200 0.00704	0.00732 0.00494	0.01112 0.01216	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-SG-001	4.160.01293	0.14161 0.14220	0.01294 0.14157	0.14216 36.03738	0.13807 36.03765	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-SG-001	4.160.01259	0.13341 0.13400	0.01250 0.13427	0.13485 36.03738	0.13807 36.03765	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
210-SG-001	4.160.01295	0.14727 0.14784	0.01293 0.14728	0.14785 36.03738	0.13807 36.03765	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
220-LV-001	0.400.00051	0.00376 0.00380	0.00051 0.00375	0.00378 0.00034	0.00359 0.00361	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	
220-LV-001	0.400.00050	0.00387 0.00390	0.00050 0.00386	0.00389 0.00034	0.00359 0.00361	0.00000 0.00000	0.00000 0.00000	

Project: Toromocho Project  
 Location: Peru  
 Contract: C-560  
 Engineer: Lena Coopamah  
 Filename: Toromocho-Detail

ETAP  
 5.5.6C

Page: 6  
 Date: 09-07-2010  
 SN: JOHNBROWN2  
 Revision: Base  
 Config.: Max.SC

Bus	kV	Positive Seq. Imp. (ohm)		Negative Seq. Imp. (ohm)		Zero Seq. Imp. (ohm)		Fault Zf (ohm)					
		Resistance	Reactance	Resistance	Reactance	Resistance	Reactance	Resistance	Reactance	Impedance			
220-LV-001	0.4000	0.0047	0.00400	0.00403	0.00047	0.00399	0.00402	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-001	0.4000	0.0146	0.00530	0.00550	0.00146	0.00529	0.00549	0.00417	0.00986	0.01071	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-002	0.4000	0.0150	0.00559	0.00579	0.00150	0.00558	0.00577	0.00417	0.00986	0.01071	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-003	0.4000	0.0163	0.00633	0.00654	0.00163	0.00631	0.00652	0.00417	0.00986	0.01071	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-004	0.4000	0.0162	0.00643	0.00663	0.00162	0.00645	0.00665	0.00417	0.00986	0.01071	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-005	0.4000	0.0153	0.00565	0.00585	0.00152	0.00566	0.00586	0.00417	0.00986	0.01071	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-006	0.4000	0.0159	0.00617	0.00637	0.00159	0.00615	0.00636	0.00417	0.00986	0.01071	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-007	0.4000	0.0193	0.00721	0.00747	0.00193	0.00723	0.00748	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
220-MC-008	0.4000	0.0339	0.00988	0.01045	0.00339	0.00987	0.01043	0.00955	0.01864	0.02094	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-001	4.1600	0.0790	0.07859	0.07899	0.00781	0.07674	0.07714	36.03521	0.09437	36.03533	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-002	4.1600	0.0791	0.07836	0.07875	0.00781	0.07651	0.07691	36.03521	0.09369	36.03533	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-003	4.1600	0.0817	0.08075	0.08116	0.00805	0.07897	0.07938	36.03521	0.09369	36.03533	0.00000	0.00000	0.00000
220-MV-004	4.1600	0.0817	0.08075	0.08116	0.00805	0.07897	0.07938	36.03521	0.09369	36.03533	0.00000	0.00000	0.00000
220-SG-001	4.1600	0.0567	0.07470	0.07491	0.00563	0.07294	0.07316	36.03112	0.08310	36.03122	0.00000	0.00000	0.00000
220-SG-001	4.1600	0.0595	0.07710	0.07733	0.00589	0.07543	0.07566	36.03112	0.08310	36.03122	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-001	0.4000	0.0051	0.00400	0.00403	0.00051	0.00401	0.00405	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-001	0.4000	0.0057	0.00373	0.00378	0.00057	0.00375	0.00379	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-002	0.4000	0.0052	0.00391	0.00394	0.00052	0.00392	0.00396	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
230-LV-002	0.4000	0.0049	0.00423	0.00425	0.00049	0.00424	0.00427	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-001	0.4000	0.0185	0.00661	0.00687	0.00185	0.00663	0.00688	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-002	0.4000	0.0187	0.00669	0.00694	0.00187	0.00670	0.00696	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-003	0.4000	0.0196	0.00703	0.00730	0.00196	0.00705	0.00732	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
230-MC-004	0.4000	0.0132	0.00485	0.00503	0.00131	0.00486	0.00504	0.00356	0.00886	0.00955	0.00000	0.00000	0.00000
230-MV-001	4.1600	0.0913	0.07837	0.07890	0.00884	0.08023	0.08072	36.03230	0.08522	36.03240	0.00000	0.00000	0.00000
230-MV-001	4.1600	0.0962	0.08590	0.08644	0.00928	0.08778	0.08827	36.03230	0.08522	36.03240	0.00000	0.00000	0.00000
245-MC-001	0.4000	0.0196	0.00715	0.00742	0.00196	0.00715	0.00742	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
245-MC-002	0.4000	0.0193	0.00703	0.00729	0.00193	0.00703	0.00729	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
251-MC-001	0.4000	0.0237	0.00849	0.00882	0.00238	0.00862	0.00894	0.00262	0.01037	0.01069	0.00000	0.00000	0.00000
251-MC-002	0.4000	0.0099	0.00537	0.00546	0.00099	0.00537	0.00546	0.00075	0.00529	0.00534	0.00000	0.00000	0.00000
255-LV-001	0.4000	0.0043	0.00447	0.00449	0.00043	0.00447	0.00449	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
255-LV-001	0.4000	0.0043	0.00447	0.00449	0.00043	0.00447	0.00449	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
255-LV-001	0.4000	0.0049	0.00425	0.00428	0.00049	0.00425	0.00428	0.00034	0.00359	0.00361	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-001	0.4000	0.0184	0.00731	0.00754	0.00184	0.00731	0.00754	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-002	0.4000	0.0189	0.00753	0.00776	0.00190	0.00753	0.00776	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-003	0.4000	0.0184	0.00731	0.00753	0.00184	0.00731	0.00753	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-004	0.4000	0.0188	0.00702	0.00727	0.00188	0.00702	0.00727	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000
255-MC-005	0.4000	0.0183	0.00684	0.00708	0.00183	0.00684	0.00708	0.00494	0.01112	0.01216	0.00000	0.00000	0.00000

<b>Toromocho Project</b>	<b>ETAP</b>	<b>Page:</b>	<b>7</b>
<b>Location: Peru</b>	<b>5.5.6C</b>	<b>Date:</b>	<b>09-07-2010</b>
<b>Contract: C-560</b>		<b>SN:</b>	<b>JOHNBROWN2</b>
<b>Engineer: Lena Coopamah</b>	<b>-IEC Study Case: Max.SC</b>	<b>Revision: Base</b>	
<b>Filename: Toromocho-Detail</b>		<b>Config.:</b>	<b>Max.SC</b>

ID	Bus			Positive Seq. Imp. (ohm)			Negative Seq. Imp. (ohm)			Zero Seq. Imp. (ohm)		
	kV	Resistance	Reactance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	Impedance	Resistance	Reactance	
255-MV-001	4.160	0.00610	0.09742	0.09761	0.00612	0.09738	0.09757	36.03112	0.08310	36.03120.00000	0.00000	0.00000
255-MV-001	4.160	0.00611	0.09741	0.09760	0.00612	0.09737	0.09756	36.03112	0.08310	36.03120.00000	0.00000	0.00000
255-MV-001	4.160	0.00679	0.10150	0.10172	0.00677	0.10151	0.10174	36.03112	0.08310	36.03120.00000	0.00000	0.00000
255-MV-002	4.160	0.30127	1.20823	1.24522	0.30226	1.22892	1.26554	0.33400	1.32263	1.364160.00000	0.00000	0.00000
260-LV-001	0.400	0.00050	0.00390	0.00393	0.00049	0.00389	0.00392	0.00034	0.00359	0.003610.00000	0.00000	0.00000
260-MC-001	0.400	0.00185	0.00657	0.00682	0.00185	0.00655	0.00681	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
260-MC-002	0.400	0.00184	0.00653	0.00679	0.00184	0.00652	0.00678	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
260-MC-003	0.400	0.00323	0.00946	0.00999	0.00323	0.00944	0.00998	0.00955	0.01864	0.020940.00000	0.00000	0.00000
280-LV-001 Bus1	0.400	0.00059	0.00445	0.00449	0.00059	0.00445	0.00449	0.00034	0.00359	0.003610.00000	0.00000	0.00000
280-LV-001 Bus2	0.400	0.00060	0.00444	0.00448	0.00060	0.00444	0.00448	0.00034	0.00359	0.003610.00000	0.00000	0.00000
280-LV-002 Bus1	0.400	0.00059	0.00448	0.00452	0.00059	0.00448	0.00452	0.00034	0.00359	0.003610.00000	0.00000	0.00000
280-LV-002 Bus2	0.400	0.00060	0.00440	0.00444	0.00060	0.00440	0.00444	0.00034	0.00359	0.003610.00000	0.00000	0.00000
280-MC-001	0.400	0.00183	0.00658	0.00683	0.00183	0.00658	0.00683	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
280-MC-002	0.400	0.00200	0.00737	0.00763	0.00200	0.00737	0.00763	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
280-MC-003	0.400	0.00199	0.00724	0.00751	0.00199	0.00724	0.00751	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
280-MC-004	0.400	0.00184	0.00677	0.00702	0.00184	0.00677	0.00702	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
280-MC-005	0.400	0.00197	0.00719	0.00746	0.00197	0.00719	0.00746	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
280-MC-006	0.400	0.00187	0.00683	0.00708	0.00187	0.00683	0.00708	0.00494	0.01112	0.012160.00000	0.00000	0.00000
280-MC-007	0.400	0.00095	0.00507	0.00515	0.00095	0.00507	0.00515	0.00145	0.00536	0.005560.00000	0.00000	0.00000
280-MV-001	4.160	0.01557	0.13836	0.13923	0.01557	0.13841	0.13929	36.03738	0.13807	36.03760.00000	0.00000	0.00000
280-MV-001	4.160	0.01550	0.14063	0.14149	0.01547	0.14082	0.14167	36.03738	0.13807	36.03760.00000	0.00000	0.00000
400-MC-001	0.400	0.00316	0.01045	0.01091	0.00316	0.01045	0.01091	0.00459	0.01301	0.013790.00000	0.00000	0.00000
700-SG-001 Bus1	23.000	0.02772	0.36665	0.36770	0.02812	0.36554	0.36662	66.41034	0.38281	66.41140.00000	0.00000	0.00000
700-SG-001 Bus2	23.000	0.02772	0.36665	0.36770	0.02812	0.36554	0.36662	66.41034	0.38281	66.41140.00000	0.00000	0.00000
700-SG-001 Bus3	23.000	0.03809	0.52291	0.52429	0.03763	0.52325	0.52461	66.43242	0.78210	66.43700.00000	0.00000	0.00000
800-MV-001	4.160	0.03965	0.25971	0.26271	0.03970	0.26075	0.26375	36.04579	0.20799	36.04630.00000	0.00000	0.00000
800-MV-002	4.160	0.04912	0.28713	0.29130	0.04943	0.29715	0.30123	36.04579	0.20799	36.04630.00000	0.00000	0.00000
800-US-003	0.400	0.00354	0.01041	0.01100	0.00354	0.01041	0.01099	0.00439	0.01184	0.012630.00000	0.00000	0.00000
Access Gate	0.400	0.05790	0.14225	0.15359	0.05791	0.14225	0.15358	0.07039	0.17387	0.187580.00000	0.00000	0.00000
Admin Building	0.400	0.00118	0.00565	0.00577	0.00118	0.00564	0.00576	0.00087	0.00618	0.006240.00000	0.00000	0.00000
Cons Camp 1	0.400	0.00462	0.01397	0.01472	0.00462	0.01397	0.01472	0.00494	0.01527	0.016040.00000	0.00000	0.00000
Cons Camp 2	0.400	0.00463	0.01402	0.01477	0.00463	0.01403	0.01477	0.00494	0.01527	0.016040.00000	0.00000	0.00000
Cons Camp 3	0.400	0.00463	0.01402	0.01477	0.00463	0.01402	0.01477	0.00494	0.01527	0.016040.00000	0.00000	0.00000
Construction	0.400	0.02560	0.06316	0.06815	0.02560	0.06316	0.06815	3.49229	0.06962	3.492980.00000	0.00000	0.00000
CONSTRUCTIO	0.400	0.00333	0.01006	0.01059	0.00333	0.01007	0.01061	0.00347	0.01071	0.011260.00000	0.00000	0.00000
LAB	0.400	0.00357	0.01026	0.01086	0.00357	0.01027	0.01088	0.00347	0.01071	0.011260.00000	0.00000	0.00000
POLYCLINIC	0.400	0.00562	0.01644	0.01738	0.00562	0.01646	0.01739	0.00578	0.01785	0.018770.00000	0.00000	0.00000

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Leung, "Surge Protection for Power Grids"IEEE Spectrum, July 1997, pp 26-30
- [2] Andrew J. Power, "An Overview of Transmission Fault Current Limiters",  
A Study the National Grid Company PLC, UK.
- [3] ABB AG , " Is – Limiter : The world fastest limiting and switching device", 13-10-2011.
- [4] S.C. Mukhopadhyay, " A lecture on Current Limiter",  
School of Engineering and Advanced technology Massey University, Private bag 11  
222, New Zealand .
- [5] Omar H. Abdalla, " Limiting Short-Circuit Currents in Oman Transmission  
System", GCC-Cigre Power 2010, Doha, Qatar, Paper No. B302, pp. 332-341, 18-  
19 October 2010.
- [6] Mahmoud Gilany, and Wael Al-Hasawi, "Reducing the Short Circuit Levels in Kuwait  
Transmission Network (A Case Study)", World Academy of Science, Engineering  
and Technology 53 2009.
- [7] Masoud Bazragan, Liangzhong Yao, Frank Mumford, "Fault Current Limiters and  
Protection Challenge", ALSTOM Grid Technology Centre, Stafford, UK.