REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún benefició comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás***

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

## ANÁLISIS DEL ARCO SECUNDARIO EN RECIERRES MONOPOLARES EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 kV

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**CARLOS ANDRÉS ROSERO ENRÍQUEZ**
carlos.rosero@mailfie.net

**DIRECTOR: Ing. LUIS EDMUNDO RUALES CORRALES**
luis.ruales@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR: Ing. LUIS MANUEL DUTÁN AMAY**
luis.dutan@celec.gob.ec

**Quito, Abril 2014**

# DECLARACIÓN

Yo, Carlos Andrés Rosero Enríquez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

_____

Carlos Andrés Rosero Enríquez

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Andrés Rosero Enríquez, bajo mi supervisión.

_____

Ing. Luis Ruales Corrales

_____

Ing. Luis Dután Amay

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por toda su confianza depositada en mí, por su amor y por su apoyo, gracias por sus consejos al guiarme por el camino adecuado, a mi hermana y a mis abuelitos por siempre estar pendientes de mí y formar parte de mi vida.

Agradezco a las personas quienes confiaron en mí, Ing. Luis Ruales e Ing. Luis Dután, quienes con sus conocimientos, consejos y sugerencias fueron de gran ayuda para el desarrollo de este proyecto, a CELEC EP – Unidad de Negocio TRANSELECTRIC por la colaboración brindada con la información del Plan de Expansión de Transmisión del Ecuador, la cual fue la base fundamental que hizo posible el proyecto.

De manera muy especial agradezco a mis tíos Germán e Isabel, a mis primos y primas quienes me acogieron en su hogar durante todo mi etapa de estudio superior, que siempre estuvieron pendientes de mí e hicieron todo lo posible para que nunca me sienta solo. Eternamente Gracias por su ayuda.

# DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado a mi padre Wilson Rosero Aguilar y a mi madre Sonia Enríquez Imbaquingo, que pese a la distancia siempre tuve el apoyo y sus constantes preocupaciones.

A mi hermanita Marilyn que espero haber sido un ejemplo a seguir y que nunca se dé por vencida ya que es más capaz que mí.

A mis abuelitos Víctor Enríquez y María Imbaquingo que también a la distancia nunca se cansaron de darme siempre sus consejos.

A todos mis lectores.

# CONTENIDO


**DECLARACIÓN** i
**CERTIFICACIÓN** ii
**AGRADECIMIENTO** iii
**DEDICATORIA** iv
**CONTENIDO** v
**GLOSARIO DE TÉRMINOS** viii
**RESUMEN** ix
**PRESENTACIÓN** x
**CAPITULO 1** 1
**ANTECEDENTES** 1
1.1 INTRODUCCION 1
1.2 OBJETIVOS 1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL 1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 2
1.3 ALCANCE 2
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 3
**CAPÍTULO 2** 4
**MARCO TEORICO** 4
2.1 TERRITORIO 4
2.2 SITUACIÓN ELÉCTRICA 4
2.3 EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN 4
2.4 TRANSMISIÓN 5
2.5 EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN 6
2.5.1 SISTEMA DE 500 kV 6
2.5.2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE 500 kV 6
2.6 SISTEMAS ELECTRICOS 8
2.6.1 PROBABILIDAD DE FALLA EN ELEMENTOS 10
2.7 RECIERRE 10
2.7.1 APLICACIÓN DE RECIERRES 11
2.7.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL RECIERRE 11
2.7.3 CLASIFICACIÓN DE RECIERRES 11
2.7.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN RECIERRE TRIPOLAR 12
2.7.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN RECIERRE MONOPOLAR 12

2.7.6 OPERACIÓN DE UN RECIERRE PARA FALLA TRANSITORIA 13
2.8 TIEMPO DE DESPEJE DE FALLAS 14
2.9 ARCO PRIMARIO Y SECUNDARIO 14
2.10 NEUTRALIZACIÓN DEL ARCO SECUNDARIO 16
2.10.1 ELEMENTOS PARA LA EXTINCIÓN DEL ARCO SECUNDARIO 16
2.10.2 METODOS PARA LA NEUTRALIZACIÓN DEL ARCO SECUNDARIO 16
**CAPITULO 3 21**
**INTERRUPTORES 21**
3.1 DEFINICIONES 21
3.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN 22
3.3 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE INTERRUPTORES DE POTENCIA 23
3.3.1 SEGÚN EL DISEÑO EXTERNO 23
3.3.2 SEGÚN EL MEDIO DE INTERRUPCIÓN 24
3.3.2.1. Interruptores de aire comprimido 24
3.3.2.2 Interruptor en SF6 25
3.4 NORMAS TECNICAS 26
3.5 ESPECIFICACIONES TECNICAS DE UN INTERRUPTOR 26
**CAPITULO 4 27**
**MODELACIÓN DEL SISTEMA 27**
4.1 SOFTWARE COMPUTACIONAL DIGSILENT POWER FACTORY 27
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A MODELAR 28
4.3 SNI A NIVELES DE 230 Y 500 kV 29
4.3.1 METODOLOGÍA APLICADA 29
4.4 SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA 29
4.4.1 SNI DEMANDA MAXIMA LLUVIOSO 30
4.4.2 SNI DEMANDA MAXIMA ESTIAJE 30
4.4.3 SNI DEMANDA MINIMA LLUVIOSO 30
4.4.4 SNI DEMANDA MINIMA ESTIAJE 30
4.4.5 RESULTADOS EN BARRAS DEL SISTEMA DE 500 kV 35
**CAPITULO 5 36**
**ANALISIS DEL ARCO SECUNDARIO 36**
5.1 SOFTWARE COMPUTACIONAL ATP 36
5.2 MODELACIÓN DEL SISTEMA EN ATP 36
5.3 ESTUDIO DEL ARCO SECUNDARIO 38

5.4 DETERMINACIÓN DE REACTORES DE NEUTRO 38
5.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA 38
5.4.2 COMPORTAMIENTO ANTE UNA FALLA MONOFÁSICA A TIERRA. 43
5.5 L/T INGA – TISALEO 45
5.5.1 PORCENTAJE DE COMPENSACIÓN L/T INGA – TISALEO 46
5.5.2 REACTORES DE NEUTRO L/T INGA - TISALEO 46
5.6 L/T TISALEO – CHORRILLOS 47
5.6.1 PORCENTAJE DE COMPENSACIÓN L/T TISALEO - CHORRILLOS 47
5.6.2 REACTORES DE NEUTRO L/T TISALEO - CHORRILLOS 47
5.7 CURVA EXPERIMENTAL CESI 48
5.8 CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO 48
5.9 ANÁLISIS PARA L/T INGA – TISALEO 50
5.9.1 ANÁLISIS EN MÁXIMA LLUVIOSO 50
5.9.2 ANÁLISIS EN MÁXIMA ESTIAJE 58
5.9.3 ANÁLISIS EN MÍNIMA LLUVIOSO 66
5.9.4 ANÁLISIS EN MÍNIMA ESTIAJE 73
5.10 ANÁLISIS PARA L/T TISALEO - CHORRILLOS 81
5.10.1 ANÁLISIS EN MÁXIMA LLUVIOSO 81
5.10.2 ANÁLISIS EN MÁXIMA ESTIAJE 89
5.10.3 ANÁLISIS EN MÍNIMA LLUVIOSO 97
5.10.4 ANÁLISIS EN MÍNIMA ESTIAJE 105
5.11 RESULTADOS OBTENIDOS 113
**CAPITULO 6** **115**
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** **115**
6.1 CONCLUSIONES 115
6.2 RECOMENDACIONES 118
**BIBLIOGRAFÍA** **119**
**ANEXOS** **122**
ANEXO A. 123
ANEXO B. 127
ANEXO C. 128
ANEXO D. 129
ANEXO E. 132

# GLOSARIO DE TÉRMINOS

| | |
|---|---|
| **ACAR** | Aluminium Conductors Alloy Reinforced |
| **ACSR** | Aluminium Conductors Steel Reinforced |
| **ANSI** | American National Standards Institute |
| **ATP** | Alternative Transient Program |
| **CCS** | Coca Codo Sinclair |
| **CESI** | Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano |
| **CELEC EP** | Corporación Eléctrica del Ecuador |
| **CONELEC** | Consejo Nacional de Electricidad |
| **DIgSILENT** | Digital Simulation and Electrical Network |
| **IEC** | International Electrotechnical Commission |
| **IEEE** | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| **kA** | kilo amperio |
| **kV** | kilo voltio |
| **L/T** | Línea de transmisión |
| **MEER** | Ministerio de Electricidad y Energía Renovable |
| **PET** | Plan de Expansión de Transmisión |
| **S/E** | Subestación |
| **SF6** | Hexafluoruro de Azufre Gaseoso |
| **SNI** | Sistema Nacional Interconectado |
| **SNT** | Sistema Nacional de Transmisión |
| **uS** | Micro Siemens. |

# RESUMEN

En este proyecto se presenta el análisis del comportamiento del arco secundario, el cual, es el resultado de la aplicación de maniobras de apertura monopolar de los interruptores de línea a causa del aparecimiento de una falla del tipo fase a tierra; para el estudio se tomará como referencia, a las líneas de transmisión a nivel de 500 kV El Inga – Tisaleo y Tisaleo – Chorrillos, las cuales formarán parte del Sistema Nacional de Transmisión, SNT, ecuatoriano y se espera su entrada en operación para el año de 2016.

Con la ayuda del programa computacional DIgSILENT PowerFactory, se procede a reducir el sistema mediante el uso de equivalentes de cortocircuito en los escenarios de demanda máxima y mínima de operación del sistema.

Después, para el estudio del arco secundario, el sistema equivalente es modelado en el programa ATP para proceder a realizar fallas fase a tierra en diferentes distancias a lo largo de las líneas en estudio y los valores obtenidos de arco secundario se los compara con una curva tensión de recuperación - corriente de arco secundario.

Finalmente se procede a la utilización de reactores de neutro sintonizados conjuntamente con los reactores de compensación de las líneas, para realizar una comparación con los resultados previamente obtenidos de arco secundario y así concluir que tan importante es la utilización de reactores de neutro para la neutralización del reencendido del arco secundario.

# PRESENTACIÓN

Este proyecto tiene por objeto el estudio del arco secundario que se puede presentar, al efectuarse una apertura monopolar en las líneas de transmisión El Inga – Tisaleo y Tisaleo – Chorrillos, las cuales, formarán parte del sistema de extra alta tensión a nivel de 500 kV del SNI y que se estima su entrada de operación para el año de 2016.

El capítulo I presenta la introducción, alcances y los objetivos a desarrollarse en el presente proyecto.

El capítulo II contiene una breve descripción del sistema eléctrico ecuatoriano y su expansión a futuro además, contiene el tipo de fallas que se pueden presentar en líneas de transmisión y un fundamento teórico referente al arco secundario.

El capítulo III muestra los principales tipos de interruptores que se utilizan en sistemas eléctricos y las principales normas sobre estos.

El capítulo IV se presenta en el programa computacional DIgSILENT PowerFactory la modelación para demanda máxima y mínima del SNI a nivel de transmisión de 230 y 500 kV, en donde se muestra las condiciones del sistema para el año de 2016.

El capítulo V contiene, con ayuda del programa computacional ATP, el análisis del arco secundario para las líneas de transmisión a nivel de 500 kV El Inga – Tisaleo y Tisaleo – Chorrillos y además se describe un método para la determinación de reactores de neutro.

El capítulo VI presenta las conclusiones que se obtienen del proyecto y algunas recomendaciones del mismo.

# CAPITULO 1

# ANTECEDENTES

## 1.1 INTRODUCCION

Con la necesidad de expandir el sistema eléctrico ecuatoriano, en el que se tiene previsto la incorporación de un sistema de extra alta tensión a nivel de 500 kV, el presente proyecto realiza el análisis de un fenómeno denominado arco secundario, el cual, se manifiesta al producirse el recierre monopolar de los interruptores en líneas de transmisión, especialmente en su etapa de apertura, al intentar despejar una falla únicamente en la fase fallada; para ello, se recurre a la ayuda de programas computacionales como el Alternative Transients Program ATP, que nos permite tener una idea del comportamiento de estos fenómenos transitorios presentes en los sistemas eléctricos.

Para el análisis propuesto se ha tomado como referencia a las líneas actualmente en diseño El Inga – Tisaleo y Tisaleo – Chorrillos a nivel de 500 kV, las mismas que serán incorporadas en el SNI y que servirán para transportar la potencia producida por las centrales de generación que están siendo construidas en el sistema eléctrico ecuatoriano.

Con el análisis se sugiere la implementación de un método, que consiste en la utilización de reactores de neutro para la neutralización del arco secundario y así disminuir su probabilidad de reencendido.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- En base al análisis del arco secundario en el recierre monopolar de las líneas Inga – Tisaleo y Tisaleo – Chorrillos a 500 kV, observar la necesidad de la implementación de reactores de neutro conjuntamente con los reactores en derivación de línea, para posibilitar la neutralización del arco secundario.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar la modelación del sistema a nivel de 500 kV a instalarse en el SNI, considerando la topología de la red considerada por CELEC EP Unidad de Negocio TRANSELECTRIC en su Plan de Expansión de la Transmisión 2014 - 2023.
- Realizar el estudio del arco secundario en condiciones de demanda máxima y mínima para la apertura monopolar de las líneas de transmisión El Inga – Tisaleo y Tisaleo – Chorrillos.
- Detallar las características y tipos de los principales interruptores utilizados en sistemas eléctricos.
- Describir los principales métodos que se pueden aplicar para la posibilidad de neutralización del arco secundario.
- Aplicar un método para la determinación de reactores de neutro.
- Comparar los resultados de arco secundario con una curva en general para la posibilidad de neutralización del arco secundario.

## 1.3 ALCANCE

- Se presentará el análisis del arco secundario considerando solo la etapa de apertura de los interruptores de las líneas de transmisión en estudio.
- Se modelará el SNI reducido, en el programa computacional ATP y se realizará en el mismo el análisis del arco secundario para las líneas en estudio.
- Se aplicará una falla monofásica a 1 km de distancia de los terminales en ambos lados de las líneas en estudio.
- Se realizará la apertura monopolar de las líneas en estudio, con el objeto de verificar la existencia de valores críticos de arco secundario.
- Se presentará tiempos de despeja de falla y se aplicará a las líneas en estudio con el fin de observar si ese tiempo, es adecuado para la neutralización del arco secundario.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Actualmente el país se encuentra desarrollando grandes proyectos de generación hidroeléctrica siendo el más destacado, Coca Codo Sinclair con 1500 MW de potencia instalada; para transportar gran cantidad de potencia se requiere de un sistema de transmisión de gran capacidad en extra alta tensión a nivel de 500 kV.

Al estar ese sistema conformado por líneas aéreas, estas se encontrarán expuestas a varios tipos de fallas, especialmente a fallas tipo monofásica a tierra, las cuales son la de mayor probabilidad de ocurrencia; por lo tanto el recierre monopolar aplicado solo en la fase fallada dependerá de la posibilidad de neutralización del arco secundario y del tiempo con el que es despejada la falla.

Por lo tanto en este proyecto se determinará la necesidad de instalar rectores de neutro entre el neutro de los reactores de línea y tierra para la neutralización del fenómeno del arco secundario.

# CAPÍTULO 2

# MARCO TEORICO

## 2.1 TERRITORIO

El Ecuador posee un territorio de 283.561 $km^2$, con una población de más de catorce millones de habitantes, se encuentra atravesado por la cordillera de los Andes que da lugar a la formación de tres regiones geográficas: Costa o Litoral, Sierra y la Amazonia.

El potencial hídrico estimado, a nivel de cuencas hidrográficas está en el orden de 15.000 $m^3/s$ [1] y se distribuye en dos vertientes: Amazónica, al este y del Pacífico, al oeste. La vertiente del Amazonas dispone de un potencial teórico de 54.259 MW y la vertiente del Pacífico tiene un potencial teórico de 19.130 MW.

Es por esa razón, que el gran potencial hídrico, que posee el país, debe ser aprovechado para reducir la utilización de combustibles fósiles derivados de petróleo en la generación de energía eléctrica y así contribuir al cuidado del medio ambiente.

## 2.2 SITUACIÓN ELÉCTRICA

Actualmente, para cubrir la demanda de energía el sistema eléctrico está conformado por: generación hidroeléctrica que representa aproximadamente el 43% del sistema, generación térmica con 51%, la incorporación de centrales a biomasa representada en 1% de la generación y la interconexión con países vecinos representa el 5% restante del sistema en periodo de estiaje [1].

## 2.3 EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN

El país cuenta con un plan de expansión de generación de energía eléctrica, cuya ejecución garantizará el abastecimiento de la demanda con condiciones de seguridad y economía del sistema.

La tabla 2.1, muestra los principales proyectos de generación que se encuentran en construcción [1]:

Tabla 2.1. Principales Proyectos de Generación

| Proyecto | Tipo | Capacidad MW | Ingreso de Operación |
|---|---|---|---|
| Coca Codo Sinclair | Hidroeléctrico | 1500 | 2016 |
| Paute-Sopladora | Hidroeléctrico | 487 | 2015 |
| Minas-San Francisco | Hidroeléctrico | 276 | 2016 |
| Toachi-Pilatón | Hidroeléctrico | 253 | 2015 |
| Delsi-Tanisagua | Hidroeléctrico | 120 | 2015 |
| Manduriacu | Hidroeléctrico | 60 | 2015 |
| Quijos | Hidroeléctrico | 50 | 2015 |
| Mazar-Dudas | Hidroeléctrico | 21 | 2014 |

## 2.4 TRANSMISIÓN

El SNT está constituido por aproximadamente 3.126 km de longitud de circuito a nivel de 230 kV, 2.343 km longitud de circuito a nivel de 138 kV; y con una capacidad estimada de transformación en las subestaciones de 8.521 MVA.

Tabla 2.2. Longitud Total de L/T del SNT

| Nivel de Voltaje kV | Simple Circuito km | Doble Circuito km [1] |
|---|---|---|
| 230 | 556 | 1.258 |
| 138 | 1.093 | 625 |

La mayor parte de las líneas de 230 kV y las de 138 kV, han sido construidas en torres de acero galvanizado y conductores ACSR.

El SNT está conformado por un anillo troncal a nivel de 230 kV con líneas a doble circuito, las mismas que unen los dos grandes centros de consumo como lo son las ciudades de Quito y Guayaquil. Estas líneas de transmisión, a su vez, se encuentran enlazadas al principal centro de generación del país como lo es la central hidroeléctrica Paute y también están uniendo las principales subestaciones

[1] En líneas de doble circuito, la longitud de circuito es la longitud de línea por 2.

del SNT como: Molino, Zhoray, Milagro, Pascuales (Guayaquil), Quevedo, Santo Domingo, Santa Rosa (Quito) y Totoras (Ambato).

Adicionalmente se dispone de dos líneas de 230 kV a doble circuito, las cuales conectan el sistema eléctrico ecuatoriano con el sistema eléctrico colombiano permitiendo una transferencia de hasta 500 MW; de igual manera, se dispone de una línea de simple circuito de 230 kV que interconecta el SNI con el sistema eléctrico del Perú con una capacidad de transferencia de hasta 100 MW.

Del anillo de transmisión de 230 kV, se derivan líneas radiales a niveles de tensión de 138 kV y 69 kV, las cuales permiten enlazar los centros de generación y de consumo del país.

## 2.5 EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN

CELEC EP Unidad de Negocio TRANSELECTRIC es la compañía encargada de realizar la expansión de transmisión con estándares de calidad, seguridad y confiabilidad para atender la demanda en el SNT.

### 2.5.1 SISTEMA DE 500 kV

Para evacuar la potencia producida por los grandes proyectos de generación en ejecución hacia los centros de consumo, es necesario disponer de un sistema de transmisión de gran capacidad que comprenderá, la implementación de un sistema en extra alta tensión a 500 kV que unirá los centros de carga de Quito (El Inga) y Guayaquil (Chorrillos) y una subestación intermedia ubicada cerca de la ciudad de Ambato (Tisaleo). La Central Coca Codo se conectará con la subestación El Inga, mediante dos líneas de 500 kV de 125 km de longitud; el sistema de 500 kV se lo puede observar en la figura 2.1.

### 2.5.2 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE 500 kV

El equipamiento requerido que viabilice la implementación del sistema de transmisión a nivel de 500 kV contemplaría los siguientes aspectos [2]:

- S/E El Inga, 500/230 kV, 3 x 600 MVA
- S/E Tisaleo, 500/230 kV, 1 x 450 MVA

- S/E Chorrillos, 500/230 kV, 2 x 450 MVA
- L/T Coca Codo Sinclair – S/E San Rafael, 500 kV, 7 km, 2 circuitos independientes.
- L/T San Rafael – S/E Inga, 500 kV, 118 km, 2 circuitos independientes.
- L/T S/E Inga-S/E Tisaleo, 500 kV, 150 km, circuito simple.
- L/T S/E Tisaleo-S/E Chorrillos, 500 kV, 200 km, circuito simple.

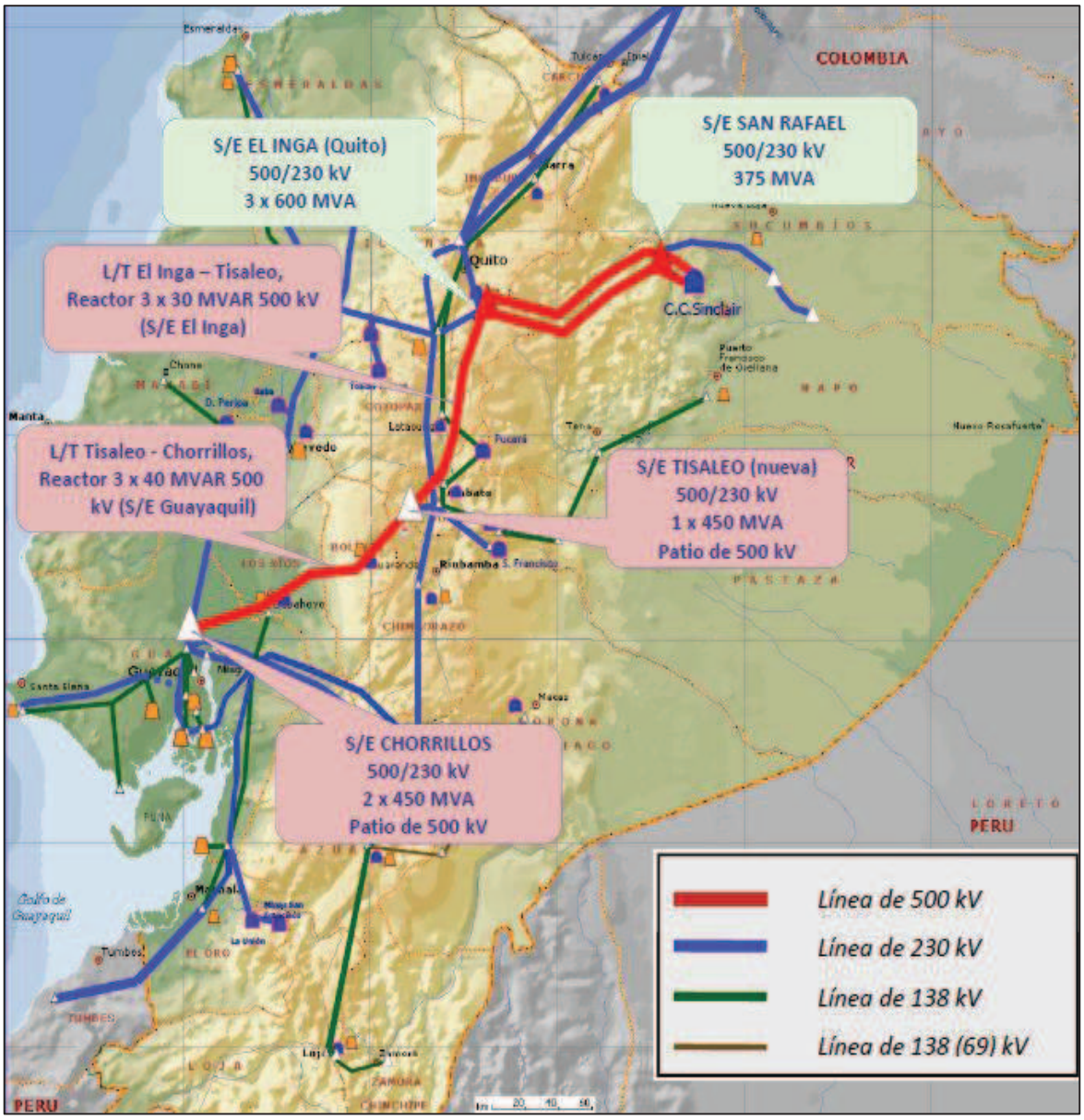



Figura 2.1. Sistema de Transmisión de 500 kV

## 2.6 SISTEMAS ELECTRICOS

Las fallas en sistemas eléctricos deben ser despejadas de la manera más rápida posible ya que son peligrosas tanto para los equipos como para las personas [3].

Existen fallas de carácter permanente y transitorio:

- Las fallas permanentes, son aquellas en donde es posible la reconexión a pesar de que la falla persista; entre sus principales causas se encuentran líneas que caen a tierra, rotura de conductor y daños permanentes a las torres.
- Las fallas de carácter transitorio son aquellas en donde existe una operación de desconexión y conexión por parte del equipo de maniobra y la falla desaparece.

Las fallas transitorias, a su vez, se clasifican en fallas simétricas y fallas asimétricas.

- Las fallas simétricas son aquellas en donde la falla ocurre en las tres fases; estas tienen una probabilidad de ocurrencia de aproximadamente un 5% de las fallas y se les conoce como fallas trifásicas:

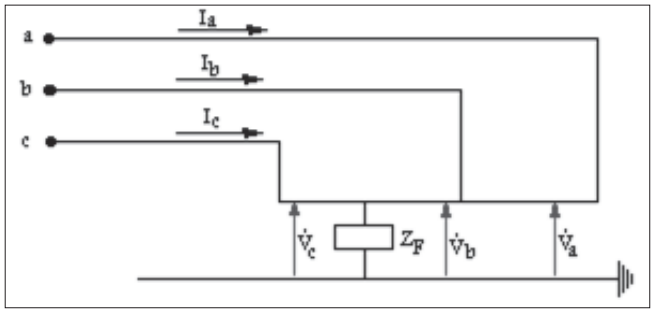



Figura 2.2. Modelo de Falla Trifásica.

Las fallas asimétricas son aquellas que originan un desbalance entre las fases y se dividen en:

- Falla bifásica o línea a línea

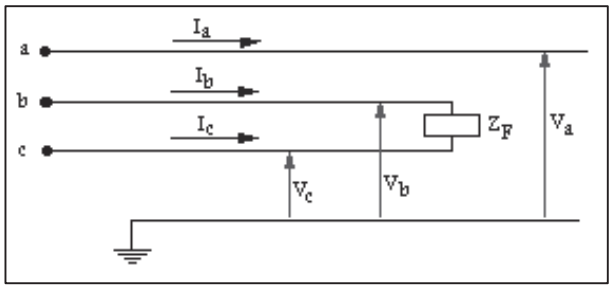



Figura 2.3. Modelo de Falla Bifásica.

- Falla bifásica a tierra o doble línea a tierra.

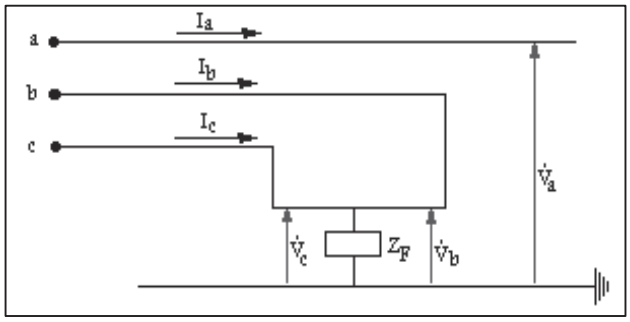



Figura 2.4. Modelo de Falla Bifásica a Tierra.

- Fallas monofásica a tierra o línea a tierra

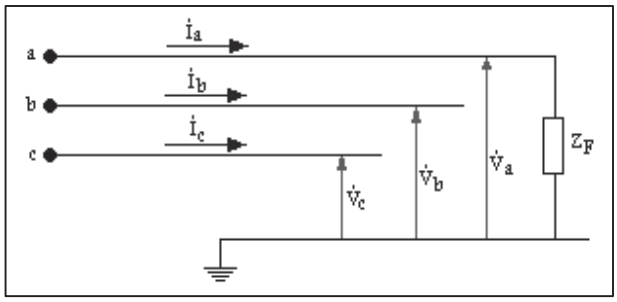



Figura 2.5. Modelo de Falla Monofásica.

La trayectoria de una corriente de falla de línea a línea o de línea a tierra puede o no contener impedancia de falla (Zf).

Debido a que la mayoría de las fallas en líneas de transmisión son originadas por las descargas atmosféricas, se ha estimado que entre el 70 y 80% de las fallas en líneas de transmisión son fallas del tipo monofásica a tierra. Las fallas bifásicas a tierra tienen una probabilidad de ocurrencia de un 10% aproximadamente, y las bifásicas línea a línea son de menos ocurrencia con un 5% [3].

### 2.6.1 PROBABILIDAD DE FALLA EN ELEMENTOS

Ya que las líneas de transmisión son una parte fundamental en un sistema eléctrico de potencia, estás se encuentran expuestas a la mayor ocurrencia de las fallas con respecto a otros elementos del sistema eléctrico debido a su gran longitud y exposición a la intemperie.

En la figura 2.6 se observa la probabilidad de ocurrencia de falla en los elementos de un sistema eléctrico.

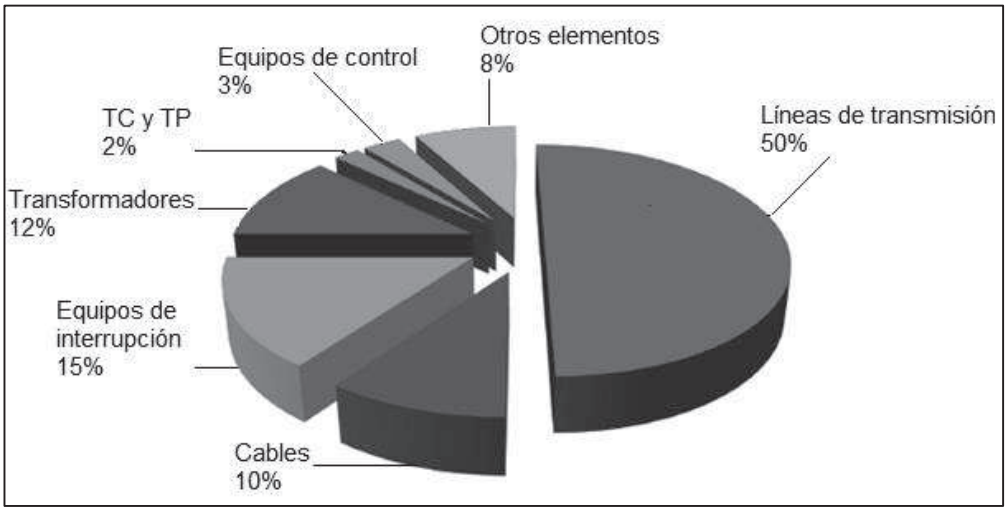



Figura 2.6. Probabilidad de Falla en Elementos.

## 2.7 RECIERRE

En el momento de ocurrir una falla, el interruptor, recibe la orden del sistema de protección asociado de realizar la apertura de sus contactos, posteriormente, luego de un tiempo de retardo establecido, automáticamente el interruptor se encargará de cerrar esos contactos, a esto se lo denomina recierre. Este recierre es utilizado en sistemas de transmisión, principalmente por las siguientes razones [4]:

- Mínima interrupción del suministro de energía al consumidor.
- Mejora la confiabilidad del sistema eléctrico.
- Mantiene el sincronismo y la estabilidad del sistema.
- El tiempo de retardo establecido permite la eliminación total de la falla.

### 2.7.1 APLICACIÓN DE RECIERRES

El número de recierres viene determinado por el sistema de transmisión, principalmente por su configuración y el nivel de tensión en donde ocurrirá una contingencia; es así que para sistemas a niveles de tensión inferior a 230 kV y cuya configuración en su mayoría es a doble circuito, se puede aplicar de 2 a 3 recierres al circuito que este presentando una contingencia, ya que al disponer de otro circuito este servirá para no perder el sincronismo del sistema. En cambio para sistemas de transmisión a niveles de tensión superior a 500 kV y de configuración de simple circuito es necesario aplicar un solo recierre y de preferencia monopolar.

### 2.7.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL RECIERRE

Para la aplicación de un recierre es necesario tener la configuración adoptada por el sistema y otros factores tales como [4]:

- Elección del tiempo requerido para la desionización del arco eléctrico.
- Características del interruptor.
- Numero de intentos de recierre.
- Coordinación del sistema de protección.

### 2.7.3 CLASIFICACIÓN DE RECIERRES

Los recierres se clasifican de dos tipos, recierre tripolar y recierre monopolar.

- Recierre Tripolar: Se caracteriza por la apertura y cierre simultáneo de los tres polos de los interruptores asociados a las tres fases respectivas después de haber ocurrido cualquier tipo falla.
- Recierre Monopolar: En este tipo de recierre la apertura y cierre de los polos solo se produce en la fase donde ocurrió la falla.

Las principales ventajas y desventajas de este tipo de maniobra se presentan a continuación.

### 2.7.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN RECIERRE TRIPOLAR

Ventajas:

- Al momento de producirse una falla bifásica o monofásica a tierra, los polos en las tres fases son abiertos y por lo tanto no se produce el arco secundario.
- Si el tipo de falla es trifásica, la apertura tripolar garantiza el aislamiento de dicha falla.

Desventaja:

- Si está siendo utilizado cerca de centrales de generación unidas o enlazadas a simple circuito, en el momento de realizar la operación de recierre de los tres polos, lo hace sin verificar la tensión de sincronismo entre el sistema y la generación.
- Suspensión del transporte de energía en sistemas de transmisión de simple circuito al aplicarse la apertura tripolar.

### 2.7.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN RECIERRE MONOPOLAR

Ventajas:

- Al momento de realizar la operación de apertura, solo lo hace en la fase que presenta una perturbación.
- En sistemas de simple circuito al aplicarse la apertura en una fase, no se suspende el flujo de potencia debido a que el flujo continuará por medio de las fases que no fueron desconectadas.
- En una falla trifásica o bifásica se abren las tres fases pero no se realiza el recierre.

Desventajas:

- Se presenta el fenómeno del arco secundario al ocurrir fallas de tipo bifásica y monofásica a tierra.
- Necesita de mayor tiempo muerto para la desionización o neutralización del arco y posterior cierre de los contactos.
- Cada fase debe tener su propio sistema de protección y control.

### 2.7.6 OPERACIÓN DE UN RECIERRE PARA FALLA TRANSITORIA

El siguiente diagrama indica la secuencia de eventos de una operación de recierre, en donde el interruptor realiza la operación de apertura y cierre del circuito luego de presentarse una falla [4] [5].

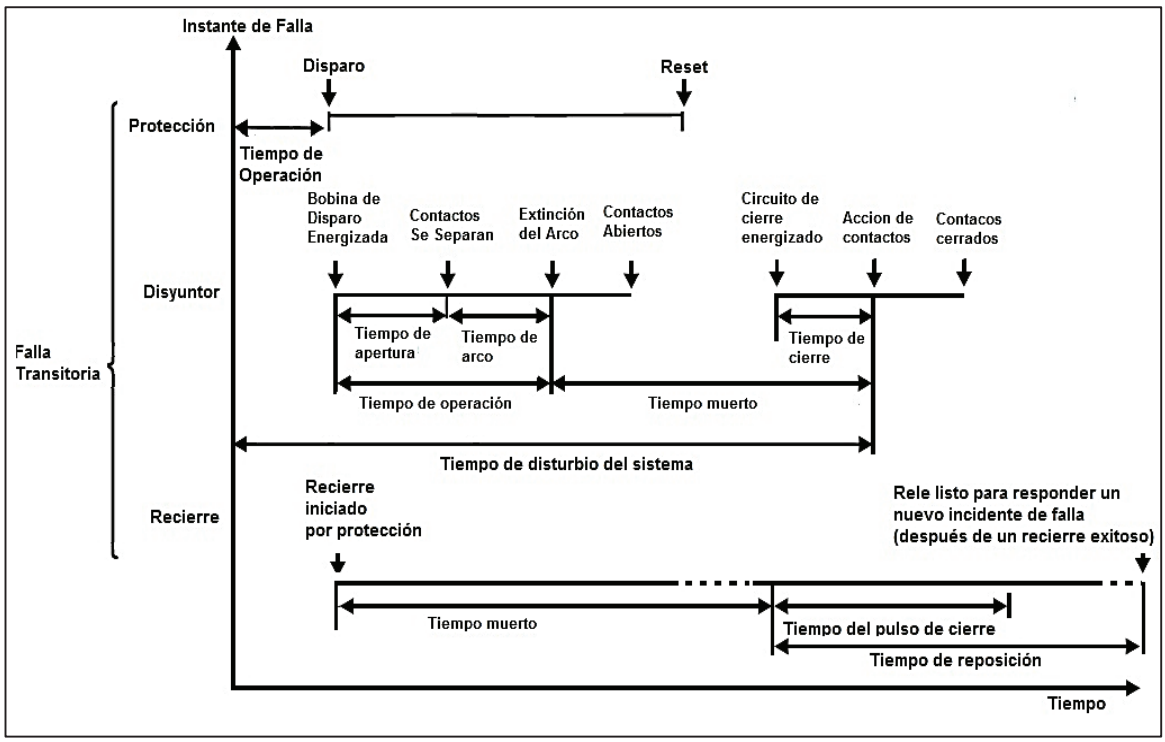



Figura 2.7. Recierre en Falla Transitoria.

De lo anterior se tiene las siguientes definiciones:

- Tiempo de operación del interruptor: Es el tiempo desde la energización de la bobina de disparo hasta la extinción del arco.
- Tiempo de apertura del interruptor: Es el intervalo de tiempo desde la energización de la bobina de disparo hasta la separación de los contactos del interruptor.
- Tiempo de arco del interruptor: Es el intervalo de tiempo desde el instante de inicio hasta la extinción del arco entre los contactos de los polos del interruptor.
- Tiempo muerto del interruptor: Corresponde al intervalo de tiempo desde la extinción del arco hasta el primer recierre entre los contactos.

- Tiempo de cierre del interruptor: Es el intervalo de tiempo entre el inicio de la operación de cierre y el instante de cierre de los contactos de los polos.
- Tiempo muerto de recierre: Es el intervalo desde el instante en la bobina del interruptor es energizada hasta el instante de que el circuito de cierre del interruptor es energizado.
- Tiempo de operación de la protección: Es el tiempo desde que la protección detecta la falla hasta la señal de disparo de la bobina del interruptor.
- Tiempo de reset o de reposición: Es el tiempo necesario para que el sistema de protección vuelva a estar preparado para responder a un nuevo incidente de falla.
- Tiempo de disturbio del sistema: Es el tiempo desde el instante de falla hasta la acción de los contactos del interruptor en un primer recierre.

## 2.8 TIEMPO DE DESPEJE DE FALLAS

El éxito de una reconexión o recierre es proporcional a la rapidez con la cual la fase fallada es despejada, es decir, entre más rápido se produzca el despeje de la falla se tendrá una elevada probabilidad de éxito en la reconexión y en consecuencia el impacto sobre el sistema será menor.

En estudios de estabilidad transitoria, fuera del alcance de este proyecto, la evaluación del tiempo crítico de despeje resulta importante en la estabilidad del sistema ya que mejora la confiabilidad del mismo; es decir, si se despeja una falla en un tiempo muy corto las oscilaciones transitorias pueden ser controladas y el sistema permanecerá estable.

Por lo tanto, según estudios realizados se a podido determinar que se puede despejar fallas en sistema de 500 kV en tiempos entre 80 y 100 ms [6].

## 2.9 ARCO PRIMARIO Y SECUNDARIO

Como se mencionó en 2.6, las fallas de mayor probabilidad de ocurrencia que se presentan en una línea de transmisión, son las de tipo fase a tierra y de naturaleza no permanente; por esta razón, el recierre monopolar representa una adecuada alternativa en los sistemas de transmisión, ya que permite transportar la

energía con un mínimo número de interrupciones consiguiendo así, aceptables niveles de confiabilidad del sistema.

El fenómeno que surge durante una falla a tierra pasa por dos etapas denominadas arco primario y arco secundario.

La corriente de una falla del tipo monofásica a tierra, antes de realizarse la operación de apertura monopolar, se la conoce como corriente de arco primario.

La desventaja que se presenta al momento de aplicar un despeje monopolar, son los acoplamientos capacitivos existentes entre las fases, los cuales originan que entre las fases haya una transferencia mutua de energía, por lo tanto, al momento de realizarse la apertura monopolar en una fase fallada, esos acoplamientos seguirán transfiriendo energía a la fase abierta produciéndose así un fenómeno conocido como arco secundario.

Es decir, el arco secundario después que la fase fallada ha sido abierta, permanece reencendido debido al acoplamiento electromagnético con las fases sanas no desconectadas; además, el arco secundario presenta valores de corriente menores con respecto al arco primario.

En la figura 2.8, se puede observar este proceso.

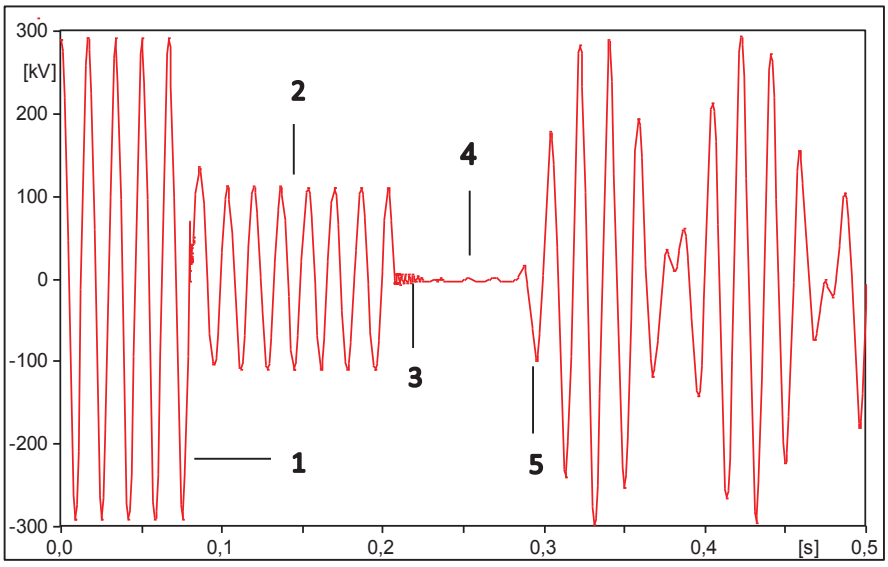



Figura 2.8. Etapa del Arco Primario y Secundario.

Donde [7]:

1 *Condición Normal*
2 *Arco Primario*
3 *Arco Secundario*
4 *Extinción del Arco Secundario*
5 *Tensión de Recuperación*

## 2.10 NEUTRALIZACIÓN DEL ARCO SECUNDARIO

Se hace importante neutralizar el efecto del arco secundario para evitar su reencendido con lo que consecuentemente se limitará el tiempo muerto de recierre y la cantidad de potencia que pueda ser transportada por la línea, que puede ser mayor cuanto más rápido pueda efectuarse el recierre regresando así a las condiciones normales del sistema. Es decir, que la cantidad de potencia que pueda ser transportada es inversamente proporcional al tiempo que tarde en neutralizarse el efecto del arco secundario.

### 2.10.1 ELEMENTOS PARA LA EXTINCIÓN DEL ARCO SECUNDARIO

La extinción o neutralización del arco secundario está relacionada principalmente con los siguientes elementos:

- La tensión inducida en la fase abierta debido a la presencia de alguna contingencia.
- La corriente que circula a través del arco primario

Cabe recordar que en un recierre tripolar (2.7.3), al ser abierta la fase fallada como también las fases sanas, se elimina la fuente encargada de reencender el arco.

### 2.10.2 METODOS PARA LA NEUTRALIZACIÓN DEL ARCO SECUNDARIO

Los métodos para la neutralización del arco secundario se dirigen a la reducción de la magnitud de la corriente del arco secundario con lo cual se evita su reencendido; esta neutralización debe ser rápida a modo de permitir reconexiones rápidas y exitosas con el fin de asegurar la estabilidad transitoria del sistema, pero también deben ser lo suficientemente lentas para asegurar la extinción del arco

secundario. Por lo tanto, para que el recierre sea exitoso la corriente de arco secundario debe extinguirse durante el tiempo muerto de recierre y una vez extinguido el arco, la tensión transitoria de recuperación en el interruptor no exceda los límites establecidos por la norma IEC 62271-100 [8] High – Voltaje Switchgear and Controlgear, cuya norma es aplicable para el diseño de interruptores en sistemas que operen con frecuencias de 50 o 60 hz y con niveles de tensión superior a 1 kV.

La tabla 2.3, indica el rango exitoso de la longitud de línea basada en la tensión de la misma, que no necesitan medidas adicionales para la extinción de arco, es decir, su extinción del arco será de manera natural [9].

Tabla 2.3. Longitud de Líneas para Extinción Natural del Arco Secundario.

| Voltaje (kV) | Rango Exitoso (km) | Rango Probable (km) |
|---|---|---|
| 750 | 0-81 | 81-129 |
| 500 | 0-97 | 97-161 |
| 345 | 0-225 | 225-419 |
| 230 | 0-482 | 482-805 |

Si la longitud de la línea de transmisión está dentro del rango exitoso, el arco puede auto extinguirse sin la necesidad de un equipamiento especial, en cambio, si la línea está dentro del rango probable o es más larga, entonces debemos aplicar medidas adicionales para poder neutralizar el arco secundario.

Estas medidas adicionales pueden ser las siguientes [9], [10], [11]:

### *1. Esquema de Línea de Transmisión con Banco de Cuatro Reactores.*

La mayoría de las líneas largas en extra alta tensión, requieren de tres reactores monofásicos denominados reactores de línea o derivación para realizar el control de tensión.

Un banco de cuatro reactores es diseñado mediante la adición de un cuarto reactor (Xn) en el neutro de los tres reactores monofásicos (Xs) denominado reactor de neutro y el cual, es utilizado para reducir la corriente de arco secundario.

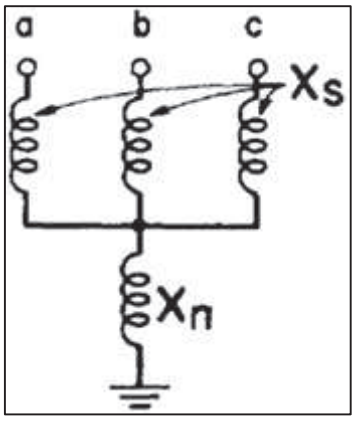



Figura 2.9. Esquema de Cuatro Reactores

Ventaja: Esquema confiable.

Desventaja: Costo elevado debido a que el extremo neutro de los reactores de fase debe tener mayor aislamiento.

2. ***Esquema de Interruptor de Puesta a Tierra de Alta Velocidad (HSGS, por sus siglas en inglés).***

Este esquema implica la aplicación de un interruptor de puesta a tierra de alta velocidad ubicado en cada fase y en el extremo de la línea. El interruptor de puesta a tierra se cierra en la fase fallada después de que el interruptor de fase asociado se abre al detectar la falla.

El principio de este interruptor de puesta a tierra es eliminar todo el voltaje de la fase abierta de la línea, provocando así, que la tensión que impulsa a la formación del arco se elimine [11].

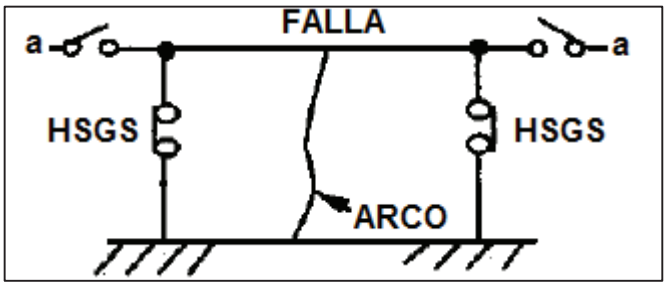



Figura 2.10. Esquema de Interruptor HSGS

Ventajas:

Bajo costo, no necesita de reactores de línea y de neutro.

Desventajas:

Necesita de un esquema complejo de control y protección.
No puede ser utilizado en líneas que dispongan de reactores de línea.

### *3. Esquema Híbrido Monofásico.*

En este esquema primero se abre la fase fallada, luego, las dos fases sanas son abiertas más tarde con un tiempo de retardo de 50 a 60 ciclos, después, las tres fases se cierran automáticamente dentro de 10 a 15 ciclos.

Este esquema tiene dos propósitos:

- Mantener las dos fases sanas cerradas de 50 a 60 ciclos después de que la falla esté despejada.
- El rápido recierre de las tres fases, elimina la corriente de arco secundario sin ningún dispositivo adicional.

Ventajas: No necesita de dispositivos adicionales para eliminar el arco secundario.

Desventajas: No puede ser utilizado donde una fase es necesaria para mantener el sincronismo entre el sistema y la central de generación.

## OTROS ESQUEMAS

A continuación se presenta las ventajas y desventajas de posibles esquemas que no han sido considerados en la extinción del arco secundario, debido a su falta de aplicación en líneas en extra alta tensión, ya sea porque son económicamente no factibles o por su complicada coordinación con los sistemas de protección y control.

### *4. Esquema de Capacitor en Serie.*

El capacitor se encuentra ubicado en la línea.

Ventajas: Flexibilidad de colocación del reactor.

Desventajas: Diseño complejo, no puesto en práctica.

### *5. Esquema de Seccionamiento de Línea*

Ventajas: Puede no necesitar de un reactor en derivación.

Desventaja: El seccionamiento debe estar localizado en la mitad de la línea.

La tabla 2.4 desarrollada empíricamente, muestra la longitud de líneas a nivel de 500 kV y el método de neutralización del arco secundario propuesto [10].

Tabla 2.4 Métodos Propuestos para la Neutralización del Arco Secundario.

| **Longitud millas, (km)** | **Método de Extinción del Arco Secundario** |
|---|---|
| 17-51, (28-82) | Natural |
| 52-68, (83-110) | Natural/Híbrido |
| 69-99, (112-160) | Híbrido [2] /4 Reactores |
| 90-140, (145-225) | HSGS /4 Reactores |
| 141-230, (227-370) | 4 reactores |

[2] Si la línea es de doble circuito.

# CAPITULO 3

# INTERRUPTORES

Un disyuntor o interruptor de potencia es un dispositivo cuya función consiste en interrumpir y restablecer la conducción de corriente en un circuito, es decir, abre o cierra al circuito implicado. Su operación puede ser manual o automática accionada por la señal de un relé encargado de vigilar la correcta operación del sistema eléctrico.

Esta interrupción puede efectuarse tanto en condiciones de operación normal como en condición de cortocircuito, ya sea para despejar alguna falla, desconectar o conectar algún equipo eléctrico o cualquier línea de transmisión.

El interruptor tiene que ser capaz de:

- Cerrado, debe de interrumpir rápidamente la corriente que está circulando por sus contactos desde bajas intensidades hasta su capacidad de interrupción a la que fue diseñado.
- Abierto, cerrar rápidamente y en cualquier instante sus contactos bajo corrientes de falla.
- Tener flexibilidad para realizar operaciones de apertura y cierre de sus contactos.
- Cerrado, debe ser un conductor ideal, y abierto, debe ser un aislador ideal.

## 3.1 DEFINICIONES

**Arco eléctrico en interruptores:** Corriente que se desarrolla entre los contactos del interruptor.

**Tensión del arco:** Tensión que se desarrolla entre los contacto durante el tiempo de extinción del arco.

**Tensión transitoria de restablecimiento o recuperación, TTR:** Tensión transitoria que aparece entre los contactos del interruptor después de la interrupción del arco.

En la Figura 3.1 se ilustran las principales definiciones:

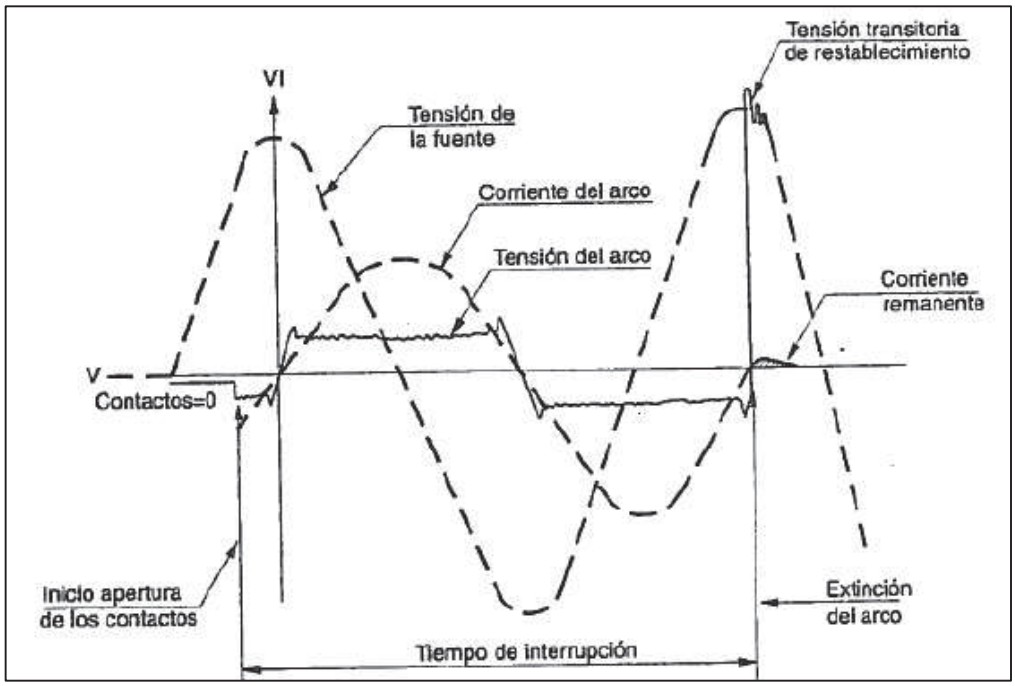



Figura 3.1. Interrupción en Falla Trifásica.

## 3.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

La operación tanto de apertura y cierre las realiza por medios mecánicos, los cuales bajo presión, los mantiene en su posición haciendo posible la circulación de corriente de un contacto a otro.

**Etapa de Apertura:** En este proceso los contactos se separen con cierta velocidad cuando se desea interrumpir el circuito. La interrupción consiste en desionizar el medio dieléctrico para convertirlo en un aislante y que la corriente no fluya.

**Etapa de Cierre:** Esta etapa ocurre desde el momento de energización de la bobina de cierre hasta la conexión de los contactos; además, durante este proceso el material de los contactos sufre un desgaste producido por esfuerzos eléctricos entre los contactos, a medida que estos empiezan a acercarse.

## 3.3 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE INTERRUPTORES DE POTENCIA

Los interruptores se clasifican según sus características constructivas.

### 3.3.1 SEGÚN EL DISEÑO EXTERNO

Pueden clasificarse como interruptores de tanque vivo o tanque muerto.

Tanque muerto: Consiste en un tanque a potencial de tierra que contiene el medio de interrupción y a través de cuya tapa pasan aisladores o bujes de porcelana para conectarse al circuito de alta tensión.

Figura 3.2. Interruptor de Tanque Muerto.

El interruptor del tipo tanque muerto presenta las siguientes ventajas con respecto al interruptor de tanque vivo:

- Se puede instalar TC's en los bujes del equipo.
- Su construcción ofrece una mayor soportabilidad sísmica.
- Pueden ser despachados de fábrica ya ensamblado.

Tanque vivo: El dispositivo de interrupción está en tanques de diámetro pequeño denominados polos, los cuales se ubican sobre soportes aislantes; los polos se conectan directamente al circuito de alta tensión, por lo tanto están a un potencial superior al de tierra.

El interruptor de tanque vivo es utilizado con respecto al interruptor de tanque muerto debido a:

- Menor costo.
- Menos requerimiento de espacio.
- Menor cantidad de medio de interrupción.

Figura 3.3. Interruptor de Tanque Vivo.

### 3.3.2 SEGÚN EL MEDIO DE INTERRUPCIÓN

A continuación, se describe brevemente los principales tipos de interruptores más utilizados en sistemas eléctricos de potencia [12].

#### 3.3.2.1. Interruptores de aire comprimido

Hasta la aparición del interruptor en SF6, el de aire comprimido fue el que operó satisfactoriamente para elevadas tensiones entre 72.5 kV y 800 kV; además es del tipo tanque vivo.

Ventajas:

- Operación rápida.
- Puede emplearse es sistemas con reconexión automática.
- Menor peso.
- Facilidad de acceso a los contactos.

Desventajas:

- Instalación compleja debido a la red de aire comprimido.
- Alto costo de las instalaciones neumáticas y mantenimiento.
- Estruendo al desconectar sus contactos.

### 3.3.2.2 Interruptor en SF6

Debido al aumento en los niveles de cortocircuito en los sistemas de potencia, se ha adoptado medidas más eficientes de interrumpir las corrientes de fallas con el fin de minimizar los tiempos de corte y la energía disipada durante el arco.

Las propiedades químicas del SF6 lo hacen un medio excelente de aislamiento y enfriamiento del arco eléctrico por lo cual, las tecnologías del aceite y del aire comprimido han quedado obsoletas. El SF6 es cinco veces más pesado que el aire, es inodoro, incoloro e incombustible y tiene una rigidez dieléctrica mayor que el aire.

Estos tipos de interruptor son unidades selladas, monofásicas o trifásicas y pueden operar varios años sin mantenimiento debido a que prácticamente no se descompone, además se fabrican tanto del tipo de tanque vivo como de tanque muerto.

Ventajas:

- Este gas posee características favorables en la interrupción de corriente eléctrica debido a su alta rigidez dieléctrica que lo hace un excelente medio aislante.
- Requiere menor espacio con respecto a otro tipo de interruptor.

Desventaja:

- Costo elevado para su implementación.
- Es un medio contaminante.

El principio de operación se puede resumir de la siguiente manera [13]:

- Inicialmente los contactos se encuentran cerrados.
- En el momento que empiezan a separase los contactos, un pistón se mueve comprimiendo el SF6 en una cámara de compresión.
- Luego, una cantidad de gas es inyectada al arco para reducir su corriente y enfriándolo a la vez.
- Finalmente el pistón deja de moverse y la inyección de SF6 continúa hasta que los contactos estén completamente abiertos.

## 3.4 NORMAS TECNICAS

Las principales normas y recomendaciones sobre interruptores son las siguientes:

- IEC 62271-100 *High - Voltage Switchgear and Controlgear.*
- IEC 60427 *Synthetic Testing of High – Voltage Alternating Current Circuit-Breakers*.
- IEC 61233 *High - Voltage Alternating Current Circuit-Breakers* I*nductive Load Switching.*
- IEEE Std C37.06 *AC High - Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities*.
- IEEE Std C37.09 *Test Procedure for AC High – Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*.
- ANSI C37.12 *AC High - Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Specifications Guide*.

## 3.5 ESPECIFICACIONES TECNICAS DE UN INTERRUPTOR

Para un interruptor, se debe establecer algunas características comunes en equipos de alta tensión, las cuales, entre las más importantes, esta:

- Frecuencia asignada [Hz]
- Corriente asignada [A]
- Duración asignada del cortocircuito [s]
- Elevación de temperatura [°C]
- Tensión asignada [kV]
- Tensión soportada al impulso tipo rayo [kV pico]
- Tensión soportada al impulso tipo maniobra [kV pico]
- Tensión soportada al impulso de corta duración a frecuencia industrial [kV ]
- Poder de corte asignado en cortocircuito [A].
- Poder de cierre asignado en cortocircuito [A].
- Tensión transitoria de restablecimiento [kV].

# CAPITULO 4

# MODELACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se presenta la modelación del SNI tanto para demanda máxima y mínima con sus escenarios de operación para el año 2016; año en el cual, se tiene previsto la entrada de operación de un nuevo sistema de transmisión en extra alta tensión a nivel de 500 kV, el mismo que permitirá transportar la potencia generada por los nuevos proyectos de generación que se encuentran en desarrollo, siendo el más destacado el proyecto de Coca Codo Sinclair de 1500 MW de potencia instalada.

Debido a que en las líneas de transmisión la potencia se propaga en ambas direcciones (fuente a carga y/o carga a fuente) mediante ondas viajeras incidentes y reflejadas, sucede que, cuando la línea es sometida a una perturbación o contingencia tal como una descarga atmosférica u operación de maniobra, surgen ondas de voltaje y corriente que viajan a lo largo de la línea de transmisión a una velocidad cercana a la velocidad de la luz, cuando estas ondas llegan a los terminales de la línea, dan lugar a la aparición de ondas reflejadas de voltaje y corriente que viajan de regreso por la línea de transmisión sobrepuestas a las ondas iniciales y que debido a las pérdidas en la línea, las ondas que viajan son atenuadas y desaparecen después de algunas reflexiones [14], es así que, cuando se incorpora las pérdidas en la línea de transmisión la teoría de análisis de transitorios se complica, por lo que reducir o simplificar el sistema es una manera adecuada para evitar esa complejidad dando además resultados que no difieren mucho de los resultados cuando el sistema no es simplificado [15] [16].
Para el efecto de simplificación del sistema, se recurre a la ayuda del programa computacional DIgSILENT PowerFactory.

## 4.1 SOFTWARE COMPUTACIONAL DIGSILENT POWER FACTORY

El programa computacional PowerFactory, nombrado así por DIgSILENT es una herramienta de ayuda de ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

Utilizando una base de datos, se puede disponer de los datos requeridos para todos los equipos dentro de un sistema de potencia tales como datos de líneas, generadores, protecciones; además, se puede ejecutar dentro del mismo ambiente del programa, todas las funciones disponibles como: simulaciones de flujos de potencia, cálculo de corrientes y equivalentes de corto circuito, análisis de harmónicos, coordinación de protecciones, cálculos de estabilidad, entre otros. Para más detalles del software dirigirse a las referencias [5] [17].

## 4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A MODELAR

El sistema a modelar, proporcionado por CELEC EP- Unidad de Negocio TRANSELECTRIC; corresponde a la planificación del SNI para 2016 en los escenarios de demanda máxima y mínima.

Según lo expuesto en 2.5, el sistema de 500 kV servirá para transportar la potencia generada desde Coca Codo Sinclair hacia la subestación San Rafael y desde San Rafael a la subestación El Inga, además servirá también para enlazar los centros de cargas de Quito (El Inga) y Guayaquil (Chorrillos), cuya trayectoria comprende las subestaciones El Inga – Tisaleo y Tisaleo – Chorrillos.

De acuerdo al estudio realizado por CELEC EP - Unidad de Negocio TRANSELECTRIC las líneas de transmisión a 500 kV serán de simple circuito en haz de conductores, con longitud y calibre de conductor siguiente:

Tabla 4.1. L/T a 500 kV del SNI.

| Línea de transmisión | Circuito | Longitud (km) | Conductor |
|---|---|---|---|
| Coca Codo Sinclair-San Rafael C1 | Simple | 7 | 4x1100 ACAR |
| Coca Codo Sinclair-San Rafael C2 | Simple | 7 | 4x1100 ACAR |
| San Rafael - Inga C1 | Simple | 118 | 4x1100 ACAR |
| San Rafael - Inga C2 | Simple | 118 | 4x1100 ACAR |
| Inga - Tisaleo | Simple | 150 | 3x1100 ACAR |
| Tisaleo - Chorrillos | Simple | 200 | 3x1100 ACAR |

Se considera la utilización de reactores en derivación los cuales estarán situados a los extremos de cada línea con los siguientes valores de potencia reactiva [2]:

Tabla 4.2. Reactores de Línea en L/T a 500 kV.

| Línea de transmisión | MVAr Primer Extremo | MVAr Total Compensación |
|---|---|---|
| San Rafael – Inga C1 | 30 | 60 |
| Inga – San Rafael C1 | 30 | |
| San Rafael – Inga C2 | 30 | 60 |
| Inga – San Rafael C2 | 30 | |
| Inga – Tisaleo | 90 | 120 |
| Tisaleo-Inga | 30 | |
| Chorrillos-Tisaleo | 120 | 150 |
| Tisaleo – Chorrillos | 30 | |

## 4.3 SNI A NIVELES DE 230 Y 500 kV

Como se menciona al inicio de este capítulo acerca de la presencia de ondas viajeras, se procede entonces a reducir el SNI en niveles de 230 y 500 kV.

### 4.3.1 METODOLOGÍA APLICADA

Para reducir el sistema mediante la separación de los componentes del SNI con niveles de tensión inferior a 230 kV, se emplean equivalentes de cortocircuito; luego de obtenido el modelo, se lo valida con flujos de potencia y análisis de cortocircuitos.

La simplificación se la realiza para demanda mínima y máxima con los escenarios de operación: lluvioso y estiaje.

## 4.4 SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA

Se procede a realizar un flujo de potencia en el sistema reducido, mostrando resultados de las condiciones del sistema como voltaje en barras, potencias en

transformadores y líneas para el año 2016, los cuales, serán la base para la modelación del sistema en el software ATP en el siguiente capítulo.

En las figuras 4.1 a 4.4, se presenta los flujos de potencia del SNI en los diferentes escenarios de demanda para el año de 2016 en donde, el nivel de tensión de 230 kV está representado con color negro y el nivel de tensión de 500 kV se encuentra representado de color verde.

### 4.4.1 SNI DEMANDA MAXIMA LLUVIOSO

Figura 4.1

### 4.4.2 SNI DEMANDA MAXIMA ESTIAJE

Figura 4.2

### 4.4.3 SNI DEMANDA MINIMA LLUVIOSO

Figura 4.3

### 4.4.4 SNI DEMANDA MINIMA ESTIAJE

Figura 4.4

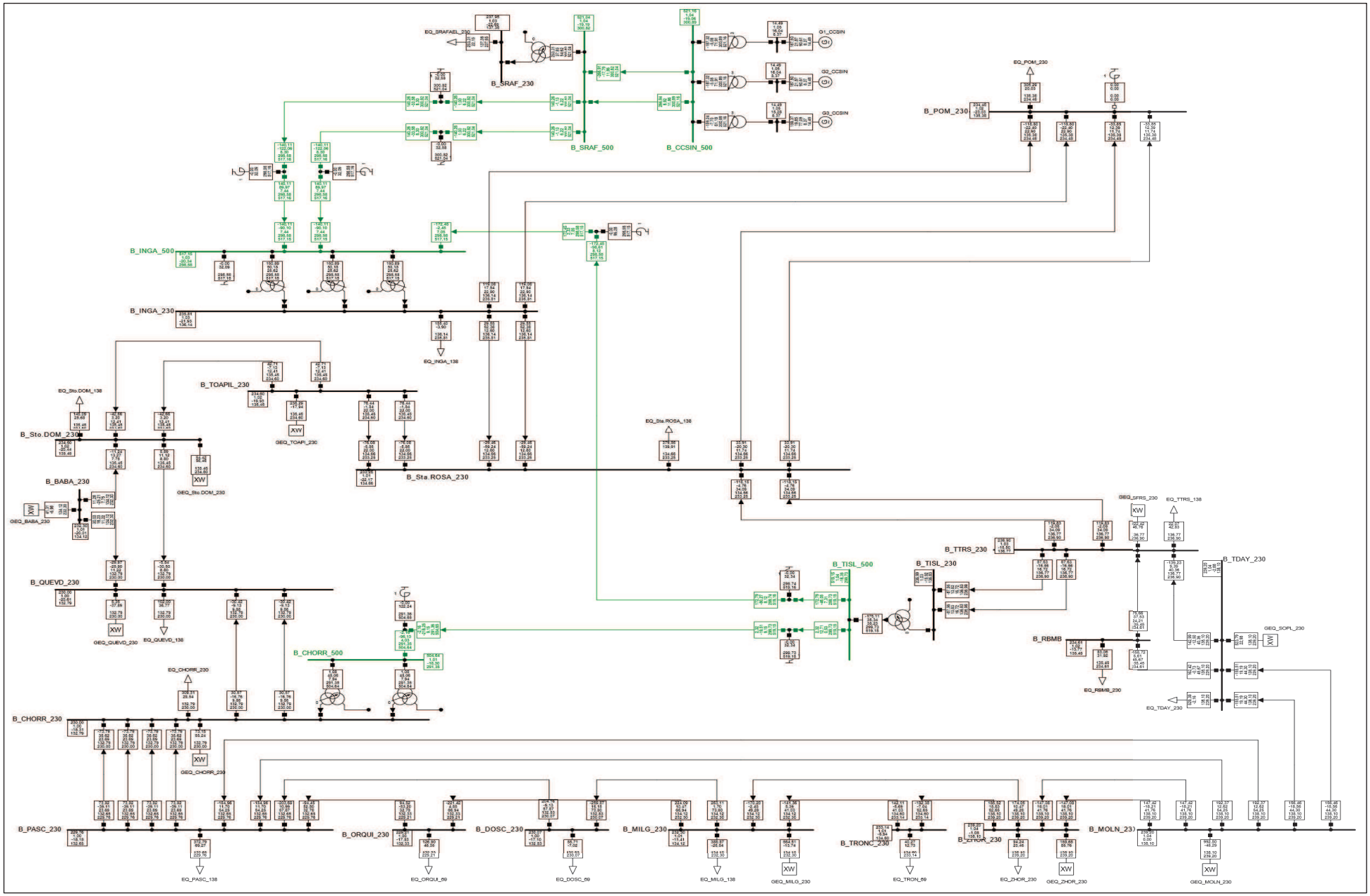



Figura 4.1. Flujo de Potencia para Demanda Máxima Lluvioso.

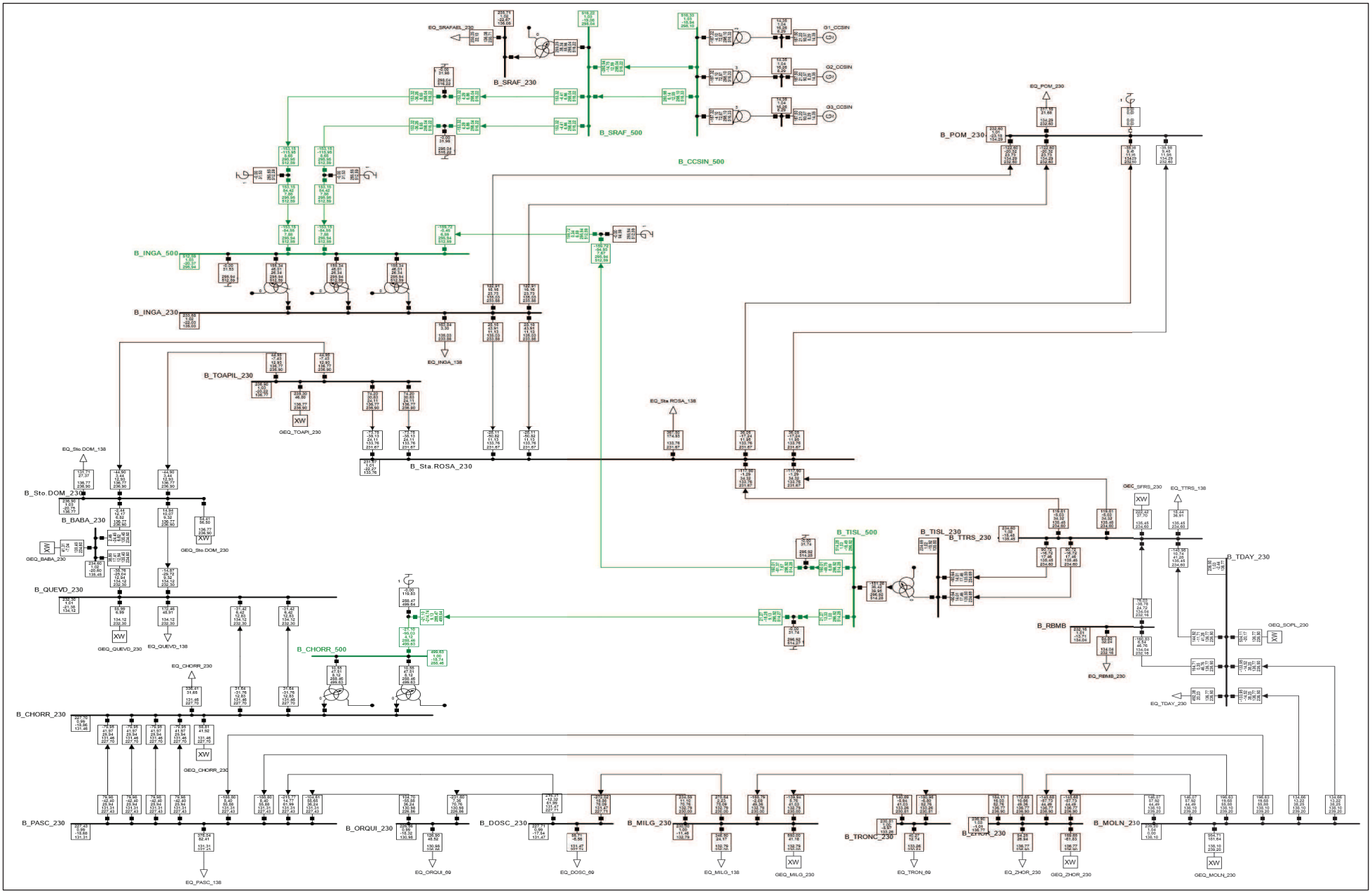



Figura 4.2. Flujo de Potencia para Demanda Máxima Estiaje.

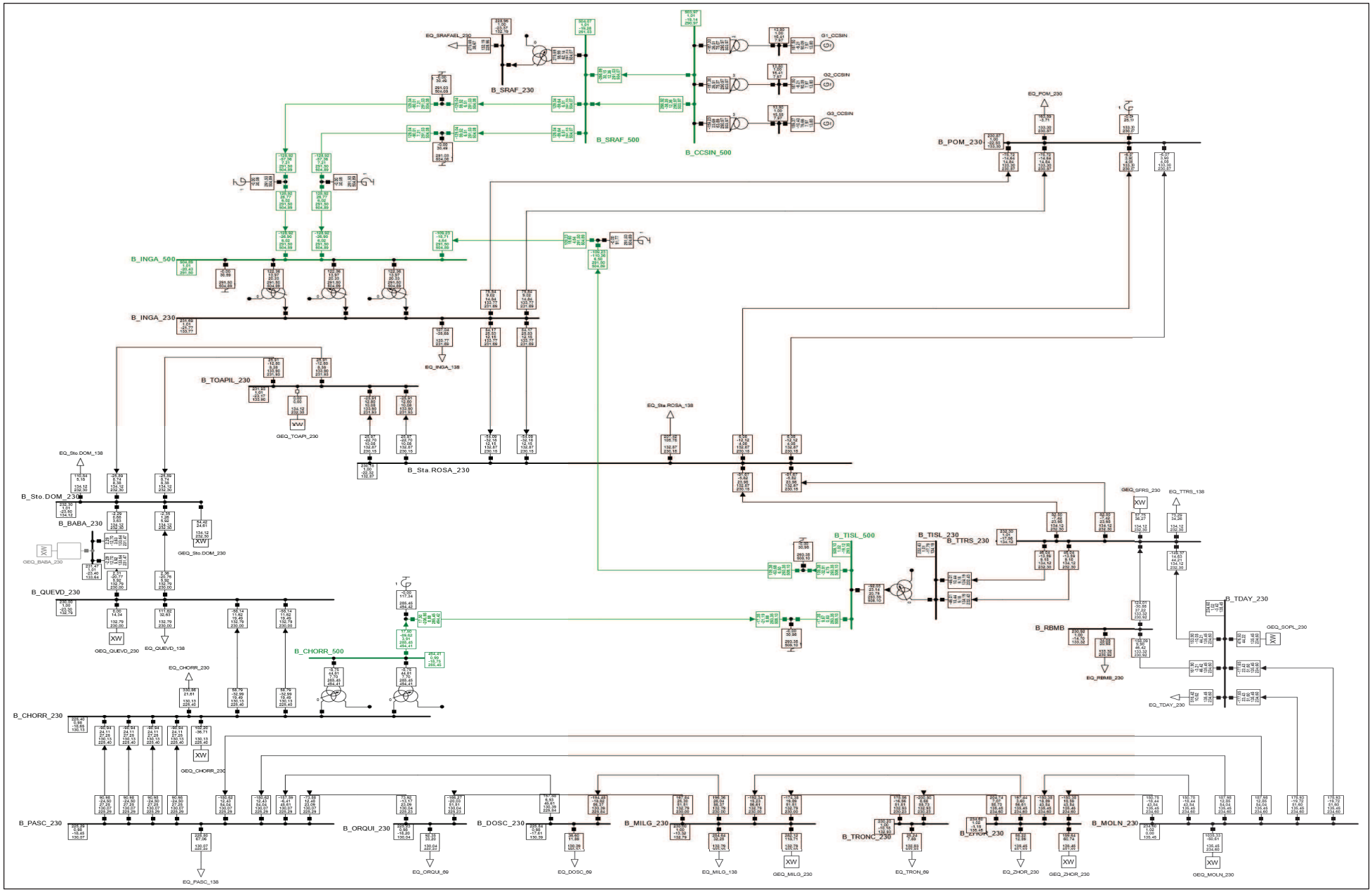



Figura 4.3. Flujo de Potencia para Demanda Mínima Lluvioso.

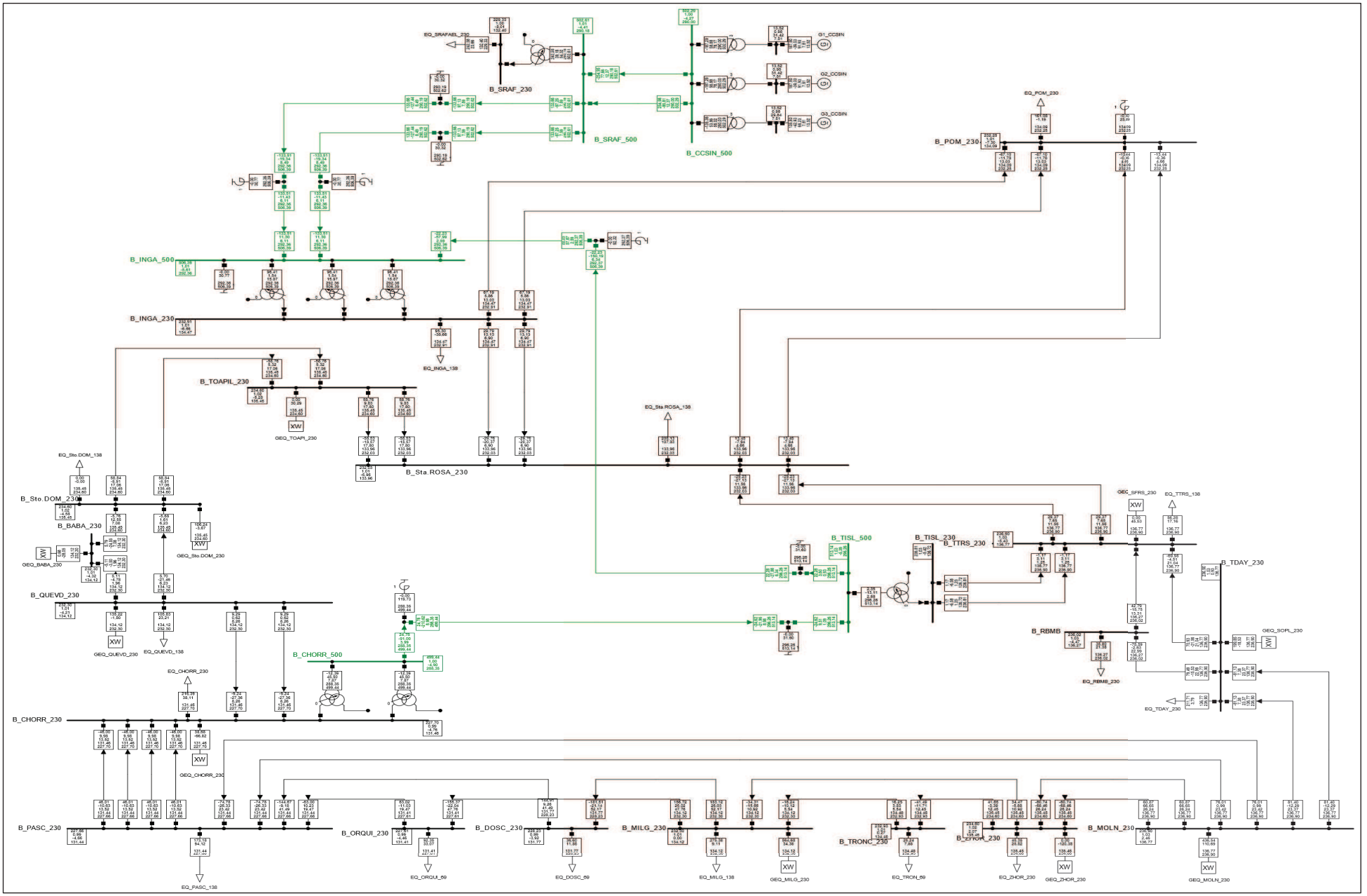



Figura 4.4. Flujo de Potencia para Demanda Mínima Estiaje.

### 4.4.5 RESULTADOS EN BARRAS DEL SISTEMA DE 500 kV

Una vez simulado los flujos de potencia se obtiene valores de voltaje en p.u en las barras, que para este caso, será en el sistema de transmisión de 500 kV.

Tabla 4.3. Voltaje en Sistema de 500 kV en Máxima Lluvioso.

| BARRA | $V_{L-L}$ [p.u] |
|---|---|
| Coca Codo Sinclair | 1.042 |
| San Rafael | 1.042 |
| Inga | 1.034 |
| Tisaleo | 1.038 |
| Chorrillos | 1.009 |

Tabla 4.4. Voltaje en Sistema de 500 kV en Máxima Estiaje.

| BARRA | $V_{L-L}$ [p.u] |
|---|---|
| Coca Codo Sinclair | 1.033 |
| San Rafael | 1.032 |
| Inga | 1.025 |
| Tisaleo | 1.029 |
| Chorrillos | 0.999 |

Tabla 4.5. Voltaje en Sistema de 500 kV en Mínima Lluvioso.

| BARRA | $V_{L-L}$ [p.u] |
|---|---|
| Coca Codo Sinclair | 1.008 |
| San Rafael | 1.008 |
| Inga | 1.009 |
| Tisaleo | 1.016 |
| Chorrillos | 0.989 |

Tabla 4.6. Voltaje en Sistema de 500 kV en Mínima Estiaje.

| BARRA | $V_{L-L}$ [p.u] |
|---|---|
| Coca Codo Sinclair | 1.004 |
| San Rafael | 1.005 |
| Inga | 1.013 |
| Tisaleo | 1.026 |
| Chorrillos | 0.999 |

# CAPITULO 5

# ANALISIS DEL ARCO SECUNDARIO

De acuerdo a lo mencionado en 2.9, el arco secundario se origina al momento de realizar una reconexión monopolar a causa de la aparición de una falla del tipo fase a tierra en las líneas de transmisión.

Con los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se procede a realizar el análisis del arco secundario en las líneas de transmisión del SNI a nivel de 500 kV para 2016: El Inga-Tisaleo y Tisaleo-Chorrillos.

Para el estudio de este fenómeno, se lo hará con la ayuda del programa ATP.

## 5.1 SOFTWARE COMPUTACIONAL ATP

ATP es un programa que permite la simulación de fenómenos transitorios, mediante la predicción del comportamiento de variables dentro de una red eléctrica en función del tiempo, siendo este comportamiento el producto de disturbios en la red tal como maniobras de apertura y/o cierre de interruptores para el despeje de algún tipo falla [18].

Para más detalle del software dirigirse a la referencia [15] [16] [18] [19].

## 5.2 MODELACIÓN DEL SISTEMA EN ATP

Para modelar el sistema reducido en el programa ATP, se procede a obtener la red de secuencias de las principales barras de 230 kV del sistema.

Gracias a la base de datos del SNI proporcionada por CELEC EP- Unidad de Negocio TRANSELECTRIC en el programa computacional DigSILENT donde se encuentran conductores (Anexo B), transformadores, reactores de línea, datos de cargas y disposición de torres (Anexo C), se procede a modelar el sistema para su estudio, figura 5.1.

En el anexo A se presentan los modelos utilizados para la modelación del sistema en el programa computacional ATP.

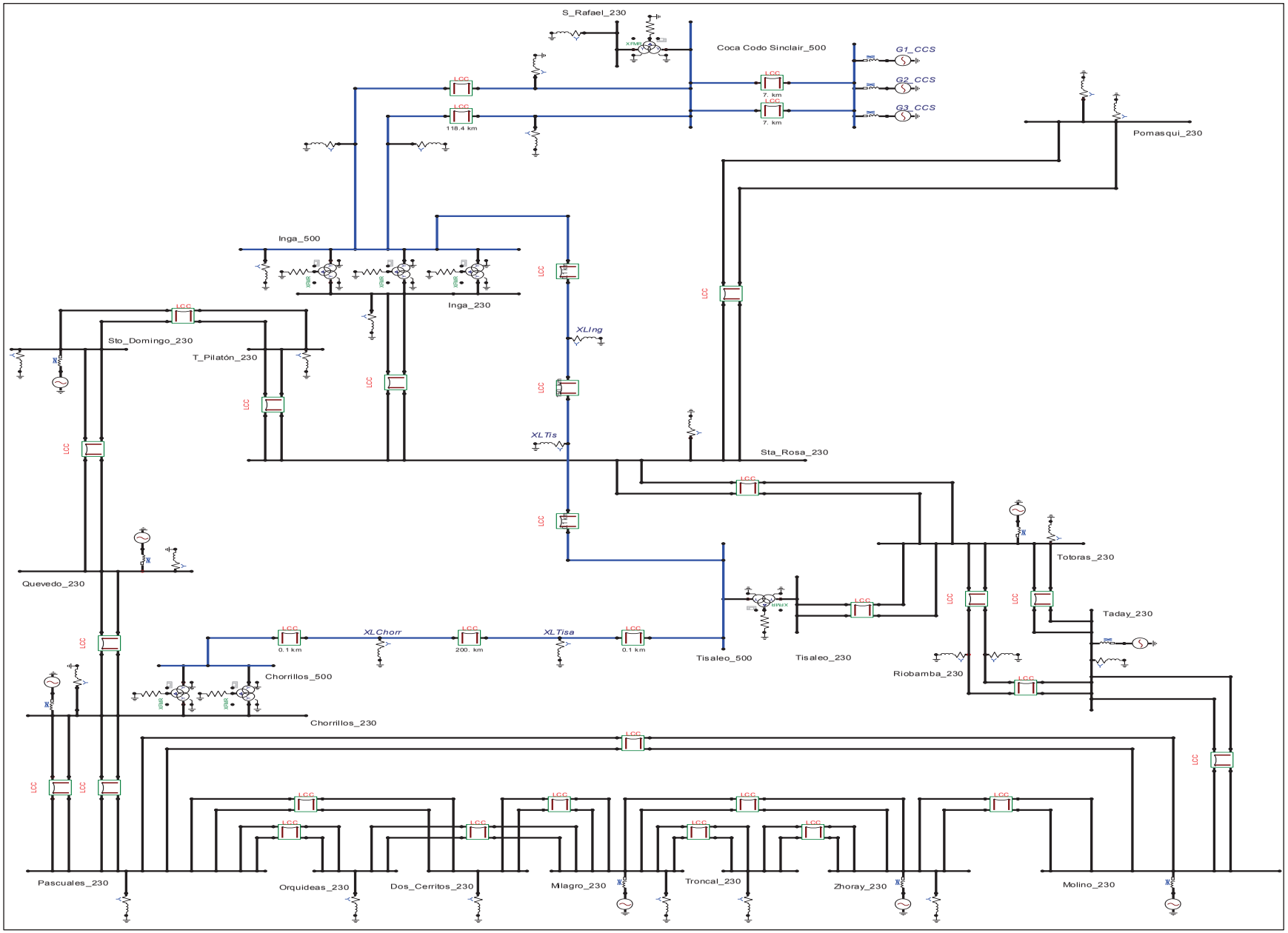



Figura 5.1. Sistema Modelado en ATP

## 5.3 ESTUDIO DEL ARCO SECUNDARIO

De acuerdo a lo expuesto en 2.10.2, existen varios métodos que pueden ser utilizados para la disminución o neutralización de la corriente de arco secundario, como el objeto del presente proyecto no es la evaluación comparativa entre los diferentes métodos, se empleará entonces el uso de reactores de neutro sintonizados conjuntamente con los reactores de línea por ser el método más aplicado en líneas de transmisión con longitudes similares a las líneas en estudio (Tabla 2.4), que empíricamente ha presentado mejores resultados al neutralizar el arco secundario y además de ser un método económicamente viable.

## 5.4 DETERMINACIÓN DE REACTORES DE NEUTRO

Para su determinación, se empleará la metodología propuesta por [20] y se la aplicará para el sistema en estudio con el fin de determinar el efecto que producirán los reactores mencionados en las líneas de estudio.

### 5.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA

La metodología propuesta por la referencia [20], considera que la capacitancia de cualquier línea trifásica puede ser reducida a una matriz de línea trifásica equivalente de simple circuito:

$$\boldsymbol{C_{abc}} = \begin{bmatrix} \mathrm{Caa} & \mathrm{Cab} & \mathrm{Cac} \\ \mathrm{Cba} & \mathrm{Cbb} & \mathrm{Cbc} \\ \mathrm{Cca} & \mathrm{Ccb} & \mathrm{Ccc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde los elementos diagonales representan la capacitancia propia y los no diagonales el acoplamiento capacitivo entre fases. En adelante se usarán negritas y cursiva para notación matricial.

De la expresión (1), se obtiene que los coeficientes de la matriz capacitancia de un sistema trifásico corresponden a:

$$\begin{aligned} \mathrm{C_{aa}} &= \mathrm{C_{ab}} + \mathrm{C_{ca}} + \mathrm{C_{ag}} \\ \mathrm{C_{bb}} &= \mathrm{C_{ab}} + \mathrm{C_{bc}} + \mathrm{C_{bg}} \\ \mathrm{C_{cc}} &= \mathrm{C_{bc}} + \mathrm{C_{ca}} + \mathrm{C_{cg}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C_{ab} &= C_{ba} \\ C_{ab} &= C_{ba} \\ C_{ab} &= C_{ba} \end{aligned} \qquad (3)$$

Como una segunda reducción, se considera a la línea trifásica en estudio totalmente simétrica, por lo tanto, se la puede representar como el circuito siguiente:

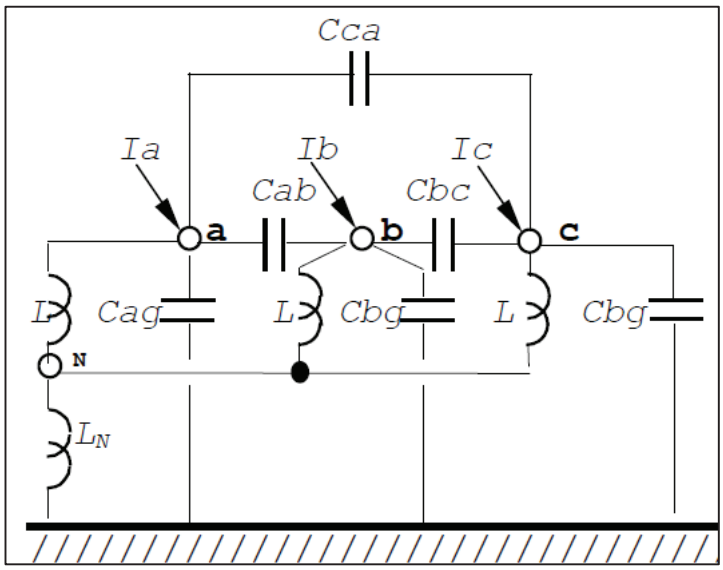



Figura 5.2. Representación de un Circuito Trifásico.

De esta manera en la figura 5.2, la corriente inyectada en los nodos puede ser considerada compuestas por:

$$\begin{aligned} I_a &= I'_a + I''_a \\ I_b &= I'_b + I''_b \\ I_c &= I'_c + I''_c \end{aligned} \qquad (4)$$

Donde las I' son las componentes correspondientes a la corrientes capacitivas y las I" son las corrientes inductivas de compensación.

Para facilidad en la deducción de las expresiones, el circuito es divido en parte capacitiva y parte inductiva.

***Parte Capacitiva***

Con las acotaciones anteriormente mencionadas, en la matriz de capacitancias de la línea de la expresión (1), se puede efectuar el siguiente reemplazo:

$$C_{aa} = C_{bb} = C_{cc} = C \quad (5)$$
$$C_{ab} = C_{ba} = C_{ac} = C_{ca} = C_{bc} = C_{cb} = -C' \quad (6)$$

Es conocido que:

$$\boldsymbol{I_{abc} = C_{abc}.V_{abc}} \quad (7)$$

De la expresión (7) se observa que se tiene un sistema de ecuaciones lineales en función de las fases del sistema, por lo tanto, se puede hacer un cambio de variable para tener un sistema de ecuaciones no acopladas:

$$\boldsymbol{I_{abc} = Ts.I_d} \quad (8)$$
$$\boldsymbol{V_{abc} = Ts.V_d} \quad (9)$$

Donde **Ts** es una matriz de transformación.

Reemplazando las expresiones (8) y (9) en (7), se tiene:

$$\boldsymbol{I_d = Ts^{-1}.C_{abc}.Ts.V_d} \quad (10)$$

Por lo tanto:

$$\boldsymbol{\frac{I_d}{V_d} = C_d = Ts^{-1}.C_{abc}.Ts} \quad (11)$$

Donde la expresión (11) es la matriz de transformación a componentes simétricas, por lo tanto:

$$\boldsymbol{C_d} = \begin{bmatrix} C - 2C' & 0 & 0 \\ 0 & C + C' & 0 \\ 0 & 0 & C + C' \end{bmatrix} \quad (12)$$

Así pues, los coeficientes son:

$C_0 = C - 2C'$, capacitancia de secuencia “0” (13)
$C_1 = C_2 = C + C'$, capacitancia de secuencia “+” y “-” (14)

Si se despeja $C'=C_1-C$ de la expresión (14) y se reemplaza en (13) $C_0=C-2C_1+2C$, se tiene:

$$C = \frac{2C_1 + C_0}{3} \tag{15}$$

$$C' = \frac{C_1 - C_0}{3} \tag{16}$$

Donde *C* representa a las capacitancias propias del sistema (5) y *C'* representa a las capacitancias mutuas del sistema (6).

***Parte Inductiva***

Para esta parte del circuito, la referencia [20] forma el sistema de ecuaciones nodales con las inductancias de compensación "*L*" en combinación con las inductancias de neutro "$L_N$" de la figura 5.2:

$$\mathbf{Y_{FF}} \qquad\qquad \mathbf{Y_{FN}}$$

$$I''a = \frac{1}{j\omega L} Va - 0\ Vb - 0\ Vc \;\Big|\; - \frac{1}{j\omega L} V_N \tag{17}$$

$$I''b = - 0\ Va + \frac{1}{j\omega L} Vb - 0\ Vc \;\Big|\; - \frac{1}{j\omega L} V_N \tag{18}$$

$$I''c = - 0\ Va - 0\ Vb + \frac{1}{j\omega L} Vc \;\Big|\; - \frac{1}{j\omega L} V_N \tag{19}$$

$$0 = - \frac{1}{j\omega L} Va - \frac{1}{j\omega L} Vb - \frac{1}{j\omega L} Vc \;\Big|\; - \left[ \frac{3}{j\omega L} + \frac{1}{j\omega L_N} \right] V_N \tag{20}$$

$$\mathbf{Y_{NF}} \qquad\qquad \mathbf{Y_{NN}}$$

Escribiendo en forma matricial se tiene:

$$\boldsymbol{I''_{abc}} = \boldsymbol{Y_{FF}}.\boldsymbol{V_{abc}} + \boldsymbol{Y_{FN}}.\boldsymbol{V_N} \tag{21}$$

$$\mathbf{0} \quad = \boldsymbol{Y_{NF}}.\boldsymbol{V_{abc}} + \boldsymbol{Y_{NN}}.\boldsymbol{V_N} \tag{22}$$

Despejando $\boldsymbol{V_N}$ de la expresión (22) y reemplazando en (21):

$$\boldsymbol{I''_{abc}} = \left(\boldsymbol{Y_{FF}} - \boldsymbol{Y_{FN}}.\boldsymbol{Y_{NN}}^{-1}.\boldsymbol{Y_{NF}}\right).\boldsymbol{V_{abc}} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{I''_{abc}} = \boldsymbol{Y''_{abc}}.\boldsymbol{V_{abc}} \tag{24}$$

La matriz $\boldsymbol{Y''_{abc}}$, se obtiene efectuando los productos matriciales expresados en (23) y representa el sistema de ecuaciones correspondiente a los reactores de compensación incluido el reactor de neutro, reducido a su equivalente trifásico:

$$\boldsymbol{Y''_{abc}} = \begin{bmatrix} \mathrm{Y_R} & -\mathrm{Y'_R} & -\mathrm{Y'_R} \\ -\mathrm{Y'_R} & \mathrm{Y_R} & -\mathrm{Y'_R} \\ -\mathrm{Y'_R} & -\mathrm{Y'_R} & \mathrm{Y_R} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Con:

$$\mathrm{Y_R} = \frac{1}{\mathrm{j\omega.L}} . \frac{2\mathrm{L_N}+\mathrm{L}}{3\mathrm{L_N}+\mathrm{L}} \quad (26)$$

$$\mathrm{Y'_R} = \frac{1}{\mathrm{j\omega.L}} . \frac{\mathrm{L_N}}{3\mathrm{L_N}+\mathrm{L}} \quad (27)$$

Aplicando el mismo concepto de transformación a componentes simétricas de (11), se obtiene la matriz del sistema de ecuaciones no acopladas:

$$\boldsymbol{Y_d} = \begin{bmatrix} \mathrm{Y_R} - 2\mathrm{Y'_R} & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{Y_R} + \mathrm{Y'_R} & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{Y_R} + \mathrm{Y'_R} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Donde el coeficiente $\mathrm{Y_R} - 2\mathrm{Y'_R}$ es la admitancia de secuencia cero $(\mathrm{Y_{R0}})$ y $\mathrm{Y_R} + \mathrm{Y'_R}$ es la admitancia de secuencia positiva $(\mathrm{Y_{R1}})$ y negativa $(\mathrm{Y_{R2}})$.

Si ahora reemplazamos (26) y (27) en (28) y resolvemos, se tiene:

$$\mathrm{Y_{R0}} = \frac{1}{\mathrm{j.\omega(3L_N+L)}} \quad (29)$$

$$\mathrm{Y_{R1}} = \mathrm{Y_{R2}} = \frac{1}{\mathrm{j.\omega.L}} \quad (30)$$

Con lo anterior realizado, se puede combinar ambas partes del circuito de acuerdo a lo mencionado en la expresión (4):

$$\boldsymbol{I_{abc}} = [\boldsymbol{j\omega}.\boldsymbol{C_{abc}} + \boldsymbol{Y''_{abc}}].\boldsymbol{V_{abc}} = \boldsymbol{Y_{abc}}.\boldsymbol{V_{abc}} \quad (31)$$

Resolviendo la matriz $\boldsymbol{Y_{abc}}$ y representando el sistema de ecuaciones por elemento:

$$I_a = \quad Y\,V_a - Y'V_b - Y'V_c \tag{32}$$
$$I_b = -Y'V_a + Y\,V_b - Y'V_c \tag{33}$$
$$I_c = -Y'V_a - Y'V_b + Y\,V_c \tag{34}$$

Donde las diagonales o admitancias propias son:

$$Y = j\omega.C + \frac{2L_N+L}{j\omega.L(3L_N+L)} \tag{35}$$

Y las no diagonales o admitancias mutuas son:

$$Y' = j\omega.C' + \frac{L_N}{j\omega.L(3L_N+L)} \tag{36}$$

Si reemplazamos las expresiones (15) y (16) en (35) y (36) respectivamente:

$$Y = j\omega.\frac{2C_1+C_0}{3} + \frac{2L_N+L}{j\omega.L(3L_N+L)} \tag{37}$$

$$Y' = j\omega.\frac{C_1-C_0}{3} + \frac{L_N}{j\omega.L(3L_N+L)} \tag{38}$$

Del reemplazo anterior, se tiene que ambas ecuaciones incluyen las capacitancias de la línea, también los reactores de compensación y el reactor de neutro.

### 5.4.2 COMPORTAMIENTO ANTE UNA FALLA MONOFÁSICA A TIERRA.

Al momento de ocurrir la falla monofásica por ejemplo en la fase a, esta es despejada por la apertura de los polos del interruptor en ambos extremos de la línea; por lo tanto, la fase fallada queda desconectada del sistema y en tales condiciones la tensión inducida en la fase A se obtiene de hacer, en la expresión (32), $I_a$=0, por lo tanto despejando $V_a$ queda:

$$V_a = \frac{Y\prime}{Y}.(V_b + V_c) \tag{39}$$

Debido a que la corriente, después de desconectada la fase fallada, se mantiene circulando por el acoplamiento entre las fases, la forma entonces de neutralizar esa corriente es hacer en la expresión (39) Y'=0.

Si en la expresión (38), los reactores de compensación son conectados sin sus reactores de neutro ($L_N$=0), esto implicará que Y'≠0 y por lo tanto $V_a$ en la expresión (39) también dependerá del valor de Y.

Entonces, en esas condiciones se observa que si Y tiende a 0, $V_a$ tenderá a infinito siempre que $L_N$=0, por tanto de la expresión (37) se tiene:

$$\omega.\frac{2C_1+C_0}{3}=\frac{1}{\omega.L} \tag{40}$$

$$\therefore L=\frac{3}{\omega.^2(2C_1+C_0)} \tag{41}$$

Con el uso de reactor de neutro se puede anular Y', situación que se produce para la condición de resonancia del acoplamiento entre fases, entonces de la expresión (38) se tiene:

$$\omega.\frac{C_1-C_0}{3}=\frac{L_N}{\omega.L(3L_N+L)} \tag{42}$$

Como el porcentaje de compensación con que cuenta la línea de transmisión se calcula mediante la compensación de potencia reactiva inductiva $Q_L$ sobre la potencia reactiva de la componente capacitiva de la línea $Q_C$, se tiene:

$$C\%=\frac{Q_L}{Q_c}.100=\frac{\frac{V^2}{X_L}}{\frac{V^2}{X_C}}.100=\frac{X_c}{X_L}.100 \tag{43}$$

$$\omega.L=\frac{X_c}{C\%}.100 \tag{44}$$

Reemplazando la expresión (44) en (42) y despejando $L_N$:

$$\frac{L_N}{3L_N+L}=\omega.\frac{C_1-C_0}{3}.\frac{X_C}{C\%}.100 \tag{45}$$

Si se invierte a la expresión (45) se obtiene:

$$3 + \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{L_N}} = \frac{3.\mathrm{C}\%}{\omega.(C_1 - C_0).X_C.100} \quad (46)$$

Se sabe que $\mathrm{X_c} = \frac{1}{\omega.\mathrm{C_1}}$ y si se reemplaza en la expresión (46) se obtiene:

$$3 + \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{L_N}} = \frac{3.\mathrm{C}\%}{100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]} \quad (47)$$

$$\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{L_N}} = \frac{3.\mathrm{C}\%}{100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]} - 3 \quad (48)$$

$$\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{L_N}} = 3.\left[\frac{\mathrm{C}\% - 100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]}{100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]}\right] \quad (49)$$

$$\frac{\mathrm{L_N}}{\mathrm{L}} = \frac{1}{3}.\left[\frac{100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]}{\mathrm{C}\% - 100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]}\right] \quad (50)$$

Donde $L_N$ *y* $L$, son los valores necesarios de inductancia de neutro y de compensación respectivamente.

Si se quiere trabajar en valores de reactancias, se lo puede hacer solo multiplicando y dividiendo por ω en la expresión (50), por lo tanto:

$$\frac{\mathrm{X_{LN}}}{\mathrm{X_L}} = \frac{1}{3}.\left[\frac{100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]}{\mathrm{C}\% - 100.\left[1 - \frac{\mathrm{C_0}}{\mathrm{C_1}}\right]}\right] \quad (51)$$

## 5.5 L/T INGA – TISALEO

Los datos principales de esta línea son:

Tabla 5.1. L/T Inga - Tisaleo

| Circuito | Simple |
|---|---|
| Voltaje Nominal [kV] | 500 |
| Longitud [km] | 150 |
| Susceptancia 1,2 [uS/km] | 4,59142 |
| Susceptancia 0 [uS/km] | 2,99305 |

Compensación:

Tabla 5.2. Compensación L/T Inga – Tisaleo

| Extremo | MVAr | Reactancia $X_L$ [ohm] | MVAr Total Compensación |
|---|---|---|---|
| Inga | 90 | 2777,778 | 120 |
| Tisaleo | 30 | 8333,333 | |

### 5.5.1 PORCENTAJE DE COMPENSACIÓN L/T INGA – TISALEO

Primeramente se procede a calcular los MVAr generados por la componente capacitiva de la línea de transmisión:

$$\mathrm{Q_C} = \mathrm{V_C^2}.\mathrm{B_C} \quad (52)$$

Dónde: $V_C$ es el voltaje de línea.

$B_C$ es la suceptancia de secuencia positiva

Por lo tanto:

$$\mathrm{Q_C} = (500\mathrm{kV})^2.\left(4{,}59142\,\frac{\mathrm{uS}}{\mathrm{km}}.150\mathrm{km}\right)$$

$$\mathrm{Q_C} = 172{,}178\ \mathrm{MVAr}$$

Con $Q_C$ calculado, ya se puede calcular el porcentaje de compensación con el que dispone la línea de transmisión aplicando la expresión (43):

$$\mathrm{C\%} = \frac{120}{172{,}178}.100$$

$$\mathrm{C\%} = 69{,}69$$

### 5.5.2 REACTORES DE NEUTRO L/T INGA - TISALEO

Con el porcentaje de compensación ya calculado y con los valores de las tablas 5.1 - 5.2, se procede al cálculo de la reactancia del reactor de neutro con la expresión (51) para cada reactor de compensación.

*Para reactor de compensación en Inga:*

$$X_{LN} = 924{,}0413\ ohm$$

*Para reactor de compensación en Tisaleo:*

$$X_{LN} = 2772{,}1238\ ohm$$

## 5.6 L/T TISALEO – CHORRILLOS

Los datos principales de esta línea son:

Tabla 5.3. L/T Tisaleo – Chorrillos.

| Circuito | Simple |
|---|---|
| Voltaje Nominal [kV] | 500 |
| Longitud [km] | 200 |
| Susceptancia 1,2 [uS/km] | 4,59142 |
| Susceptancia 0 [uS/km] | 2,99305 |

Compensación:

Tabla 5.4. Compensación L/T Tisaleo – Chorrillos.

| Extremo | MVAr | Reactancia $X_L$ [ohm] | MVAr Total Compensación |
|---|---|---|---|
| Chorrillos | 120 | 2083,333 | 150 |
| Tisaleo | 30 | 8333,333 | |

### 5.6.1 PORCENTAJE DE COMPENSACIÓN L/T TISALEO - CHORRILLOS

Los MVAr generados por la componente capacitiva de la línea de transmisión de acuerdo a la expresión (52) será:

$$Q_C = (500kV)^2.\left(4{,}59142\frac{uS}{km}.200km\right)$$

$$Q_C = 229{,}571\ MVAr$$

Por lo tanto de la expresión (43):

$$C\% = \frac{150}{229{,}571}.100$$

$$C\% = 65{,}34$$

### 5.6.2 REACTORES DE NEUTRO L/T TISALEO - CHORRILLOS

Con los valores de las tablas 5.3 - 5.4 y con la ecuación (51) tenemos entonces:

*Para reactor de compensación en Tisaleo:*

$$X_{LN} = 3167{,}681\ ohm$$

*Para reactor de compensación en Chorrillos:*

$$X_{LN} = 791{,}920\ ohm$$

## 5.7 CURVA EXPERIMENTAL CESI

Un criterio que permite el análisis del fenómeno del arco secundario es lo expuesto por la curva experimental CESI [21].

Esta curva nos dice que si la tensión de recuperación presenta valores por debajo de 180 kV pico y si la corriente de arco secundario presenta valores inferiores a 50 A (Figura 5.6), existe una elevada posibilidad de neutralización del reencendido del fenómeno del arco secundario.

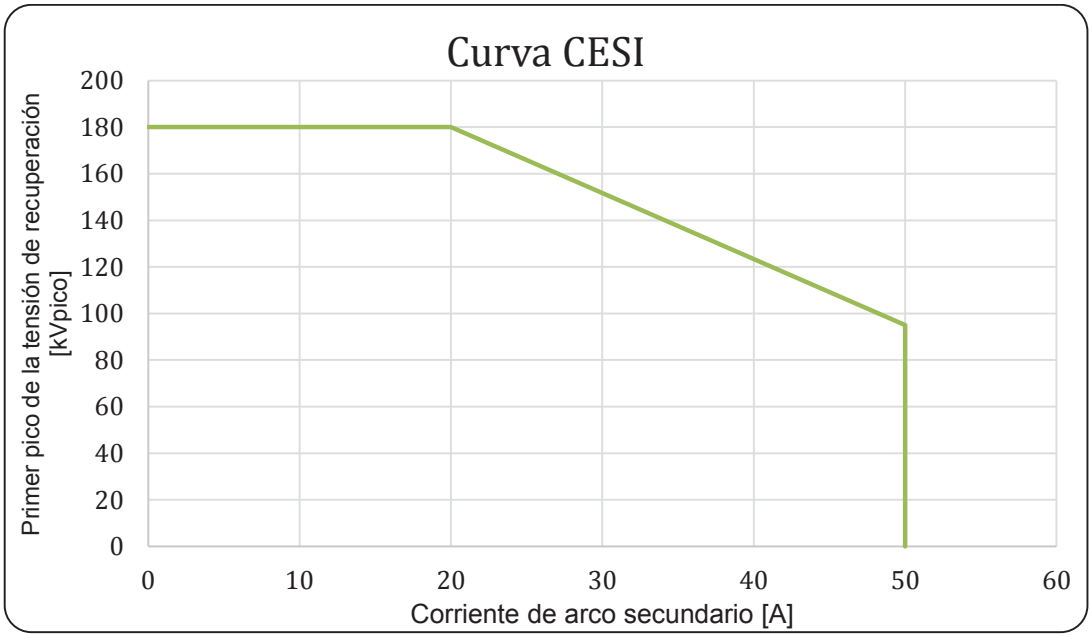



Figura 5.3. Curva Experimental CESI

## 5.8 CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO

De acuerdo a lo mencionado en 5.4.1, la metodología nos permite dimensionar los reactores de neutro por medio de los reactores de compensación de línea, así que, como punto de partida se utilizará el dimensionamiento de los reactores de

compensación planificados en el Plan de Expansión de Transmisión 2014-2023 de CELEC EP Unidad de Negocio TRANSELECTRIC.

Para el análisis se procede a simular fallas monofásicas en las líneas de estudio a 1 km de distancia de sus terminales, esto se hace porque cuando la falla se produce más cerca de los terminales de línea se tienen valores de corrientes de falla más elevados; además se considerará variaciones en el porcentaje de compensación (Tabla 5.5 – 5.6) para observar el comportamiento que presentará el arco secundario en diferentes porcentajes de compensación y, como la longitud de las líneas de transmisión en análisis puede, por razones constructivas variar, el análisis se lo realizará con la longitud planificada y con un aumento de 5 km, es así que para la línea de transmisión El Inga – Tisaleo el análisis será para 150 y 155 km de longitud y para la línea Tisaleo – Chorrillos el análisis será para 200 y 205 km de longitud.

Tabla 5.5. Reactores de Neutro para L/T Inga – Tisaleo.

| **Reactor Neutro (Ω) para Compensación Inga** | | | **Reactor Neutro (Ω) para Compensación Tisaleo** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***60%*** | ***69,69%*** | ***80%*** | ***60%*** | ***69,69%*** | ***80%*** |
| 1486,505 | 924,0413 | 621,437 | 4459,515 | 2772,1238 | 1864,312 |

Tabla 5.6. Reactores de Neutro para L/T Chorrillos – Tisaleo.

| **Reactor Neutro (Ω) para Compensación Chorrillos** | | | **Reactor Neutro (Ω) para Compensación Tisaleo** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***60%*** | ***65,34%*** | ***80%*** | ***60%*** | ***65,34%*** | ***80%*** |
| 1045,198 | 791,920 | 436,9482 | 4180,796 | 3167,681 | 1747,793 |

La simulación se realiza con las siguientes consideraciones:

- Inicialmente el sistema se encuentra operando en estado estable.
- Transcurridos 80 ms, ocurre una falla monofásica a 1 km en el lado en el que se esté realizando el estudio.
- 120 ms después de haber ocurrido la falla, se abre únicamente la fase fallada en los dos interruptores de los extremos de la línea. Este valor se toma como un tiempo máximo de despeje de falla ya que según lo mencionado en 2.8, se puede despejar fallas en sistemas de 500 kV entre 80 y 100 ms.

- Finalmente, luego de 80 ms se produce la apertura del interruptor que simula la falla.

## 5.9 ANÁLISIS PARA L/T INGA – TISALEO

A continuación se presenta los resultados obtenidos de corriente de arco secundario para la L/T Inga – Tisaleo en los escenarios de demanda máxima y mínima.

### 5.9.1 ANÁLISIS EN MÁXIMA LLUVIOSO

***Falla Monofásica 1 km Inga*** [Anexo D].

*Para longitud 150 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

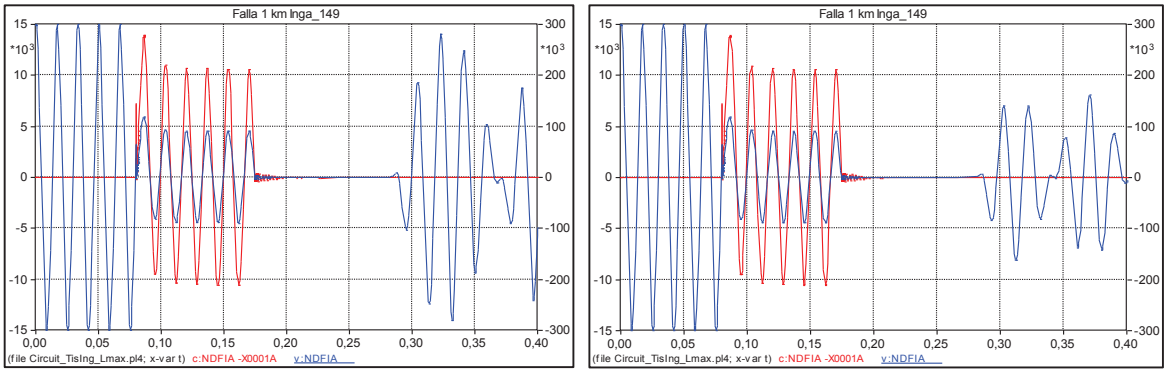



Figura 5.4.A Figura 5.4.B

Figura 5.4. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Máxima Lluvioso

Como se observa en la figura 5.4, el resultado que produce la ubicación de reactores de neutro se ve reflejado en la tensión de recuperación al presentarse como un efecto que le reduce su forma de onda, esto se produce debido a que los reactores de neutro absorben la energía de las ondas que viajen a través de la línea de transmisión producto del acoplamiento electromagnético que existe entre las fases.

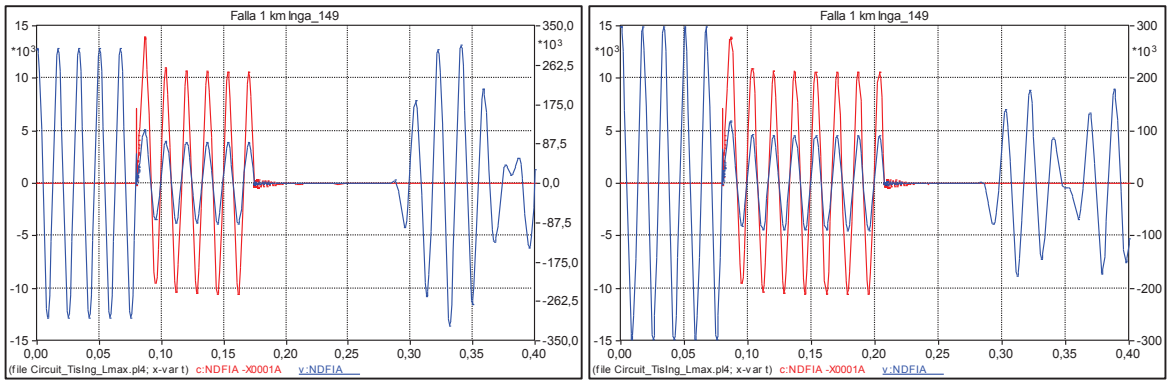



Figura 5.5.A Figura 5.5.B

Figura 5.5. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Máxima Lluvioso

En la figura 5.5 se presenta el mismo efecto que se produce en la tensión de recuperación y se menciona en la figura 5.4.

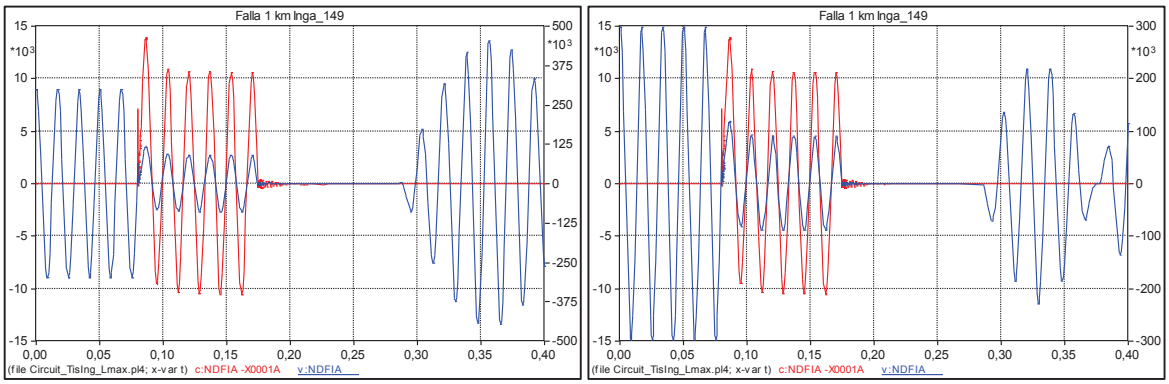



Figura 5.6. A Figura 5.6.B

Figura 5.6. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Máxima Lluvioso

Si se observa en la figura 5.6.A, la tensión de recuperación llega a valores cercanos de 500 kV/fase con respecto a los 289 kV/fase que presenta la línea cuando está operando en estado estable, este efecto se produce por el acoplamiento electromagnético que existe entre las fases que hace que la cantidad elevada de potencia reactiva se distribuya en las tres fases lo cual produce en la línea desenergizada que la tensión de recuperación aumente su amplitud.

En cambio en la figura 5.6.B, con la inclusión de reactores de neutro se produce la disminución en la amplitud de la tensión de recuperación debido a las mismas causas comentadas en la figura 5.4.

En la tabla 5.7, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E El Inga y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.7. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Máxima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 59,1 | 62,3 | 65,7 | 43,61 | 47,2 | 50,1 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 107,31 | 97,553 | 88,601 | 85,428 | 78,18 | 71,087 |

*Para longitud 155 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

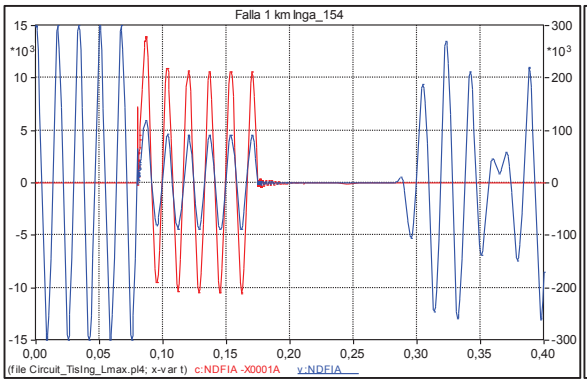



Figura 5.7. A

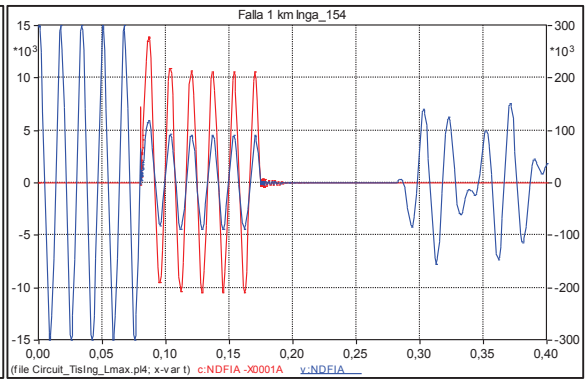



Figura 5.7.B

Figura 5.7. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Máxima Lluvioso

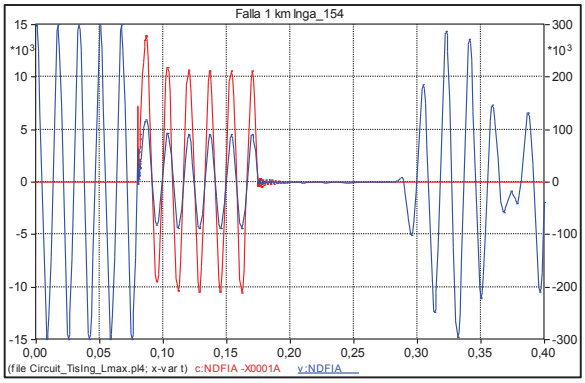



Figura 5.8. A

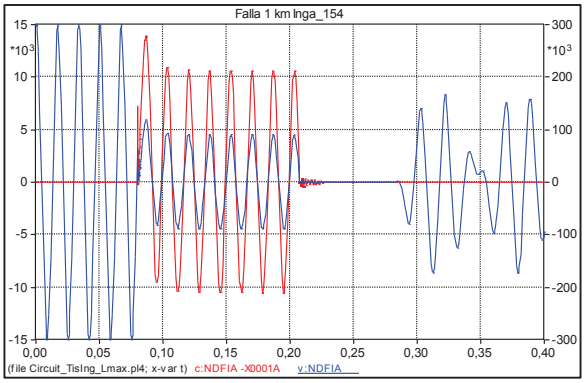



Figura 5.8. B

Figura 5.8. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo, Máxima Lluvioso

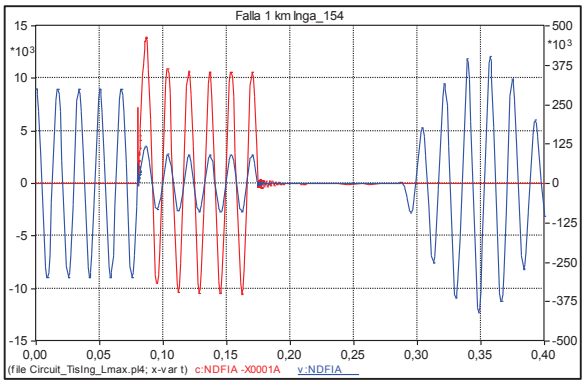



Figura 5.9. A

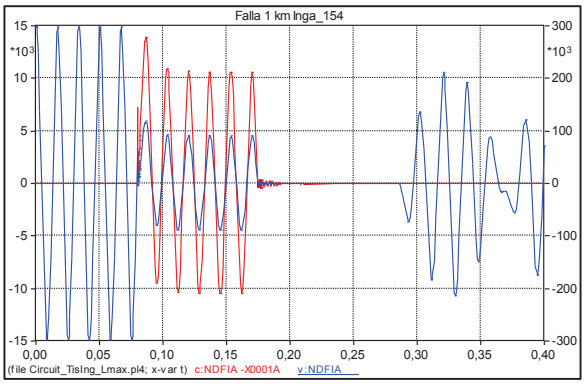



Figura 5.9. B

Figura 5.9. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Máxima Lluvioso

Para las figuras 5.7 a 5.9 se observa que se tiene un efecto similar en la tensión de recuperación con respecto a las figuras 5.4 a 5.6; este efecto se produce por las mismas causas que se manifiesta en la figuras obtenidas 5.4 a 5.6.

En la tabla 5.8, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E El Inga y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.8. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Máxima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 59,287 | 62,843 | 66,4 | 43,62 | 47,37 | 50,8 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 106,1 | 97,2 | 88,8 | 84,32 | 77,5 | 72,524 |

Para aplicar el criterio mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.7 y 5.8 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

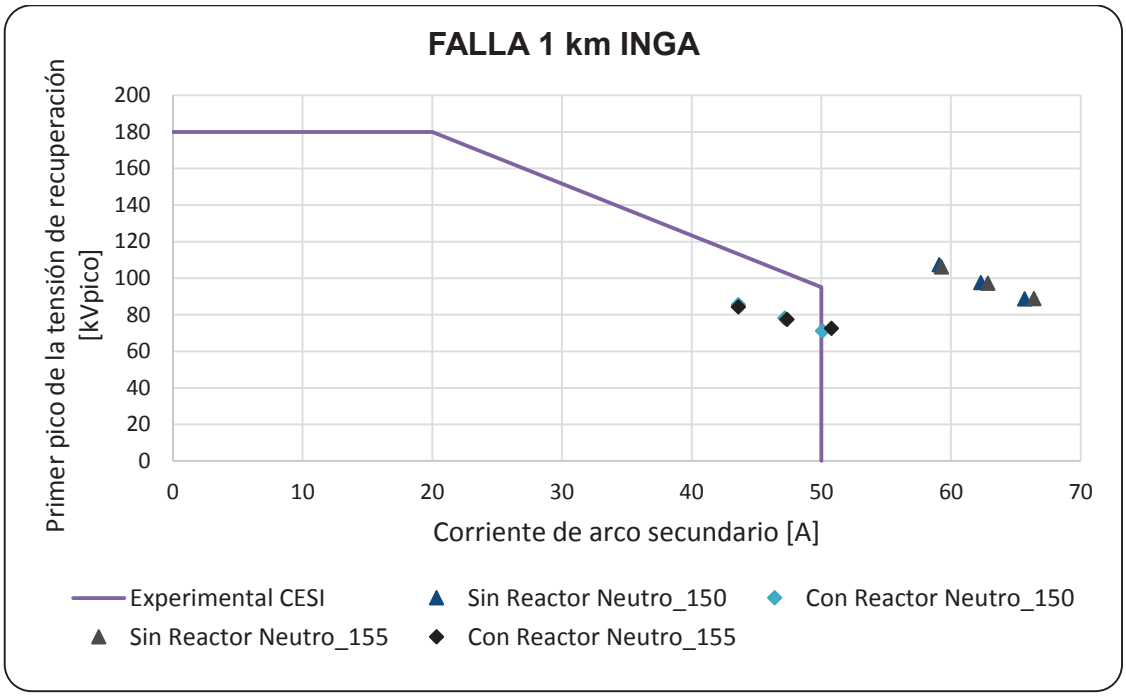



Figura 5.10. CESI 1 km Inga, Máxima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo.

Como se puede observar en la figura 5.10, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.7 y 5.8 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado, pero con el uso de reactores de neutro los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.7 y 5.8 para compensación de 60% y 69,69% tanto para 150 y 155 km de longitud el rencendido del arco secundario sería neutralizado; para 80% de compensación con 150 y 155 km de longitud de línea se tiene valores que están fuera de la zona de neutralización del arco secundario.

***Falla Monofásica 1 km Tisaleo*** [Anexo D].

*Para longitud de 150 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

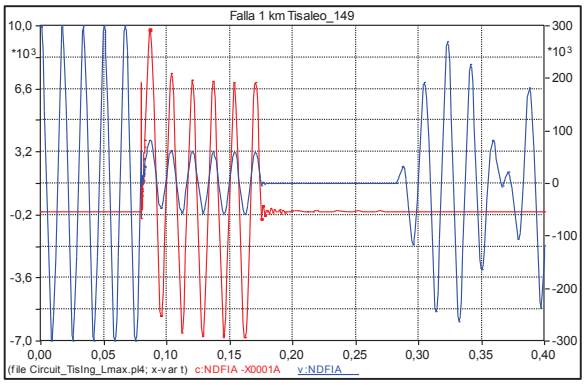



Figura 5.11. A

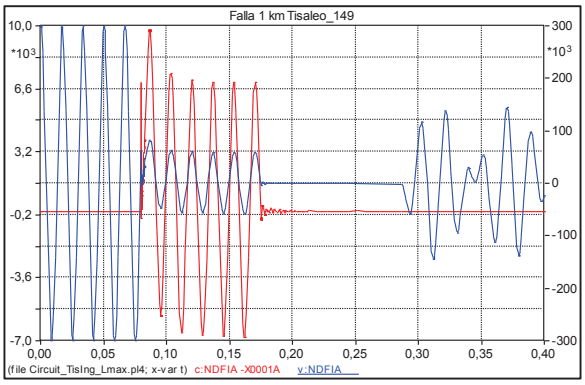



Figura 5.11. B

Figura 5.11. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Máxima Lluvioso

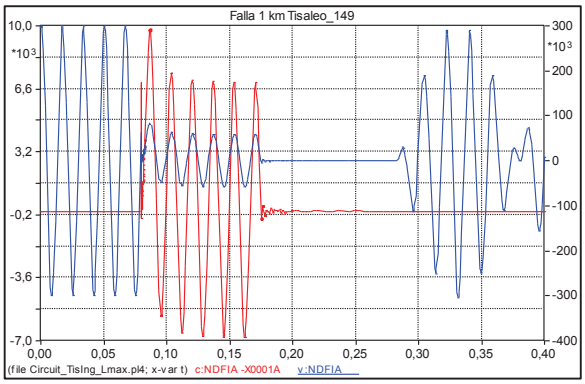



Figura 5.12. A

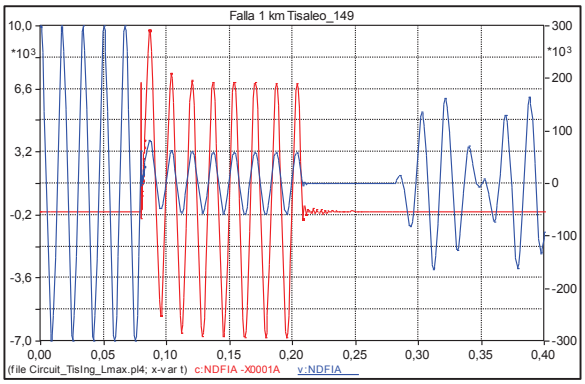



Figura 5.12. B

Figura 5.12. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Máxima Lluvioso

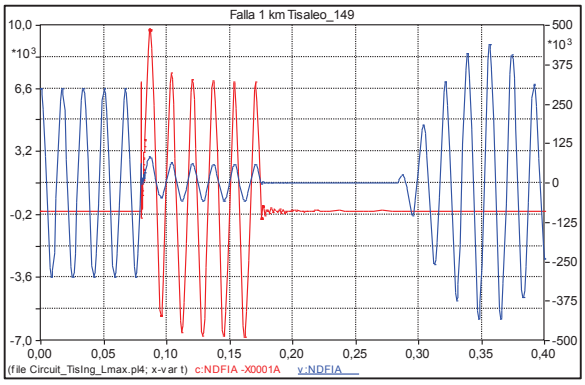



Figura 5.13. A

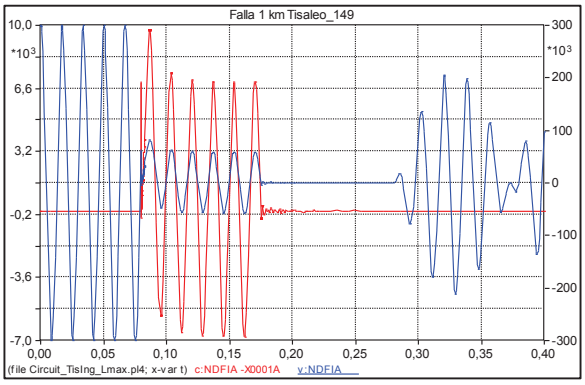



Figura 5.13. B

Figura 5.13. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Máxima Lluvioso

Para las figuras 5.11 a 5.13 se mantiene el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6.

En la tabla 5.9, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.9. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 47,67 | 49,2 | 50,8 | 34,819 | 37,05 | 39,444 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 113,43 | 105,6 | 97,15 | 87,42 | 81,33 | 74,287 |

*Para longitud 155 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

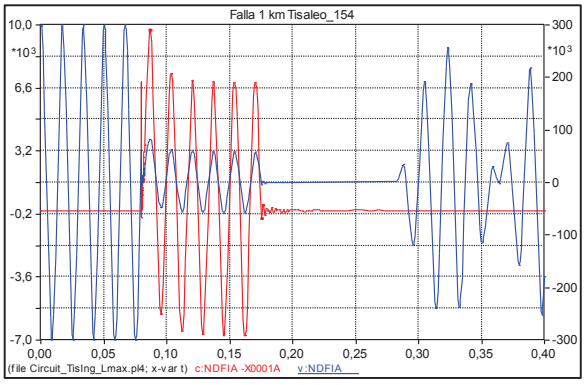



Figura 5.14. A

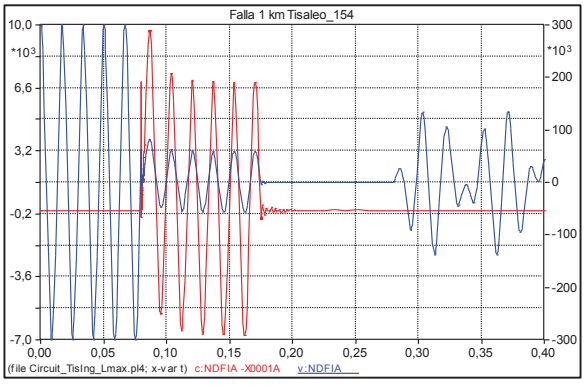



Figura 5.14. B

Figura 5.14. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Máxima Lluvioso

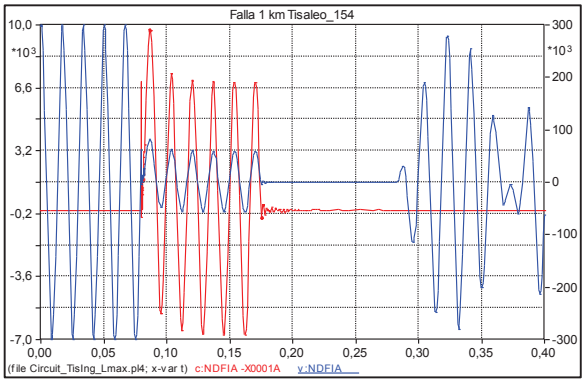



Figura 5.15. A

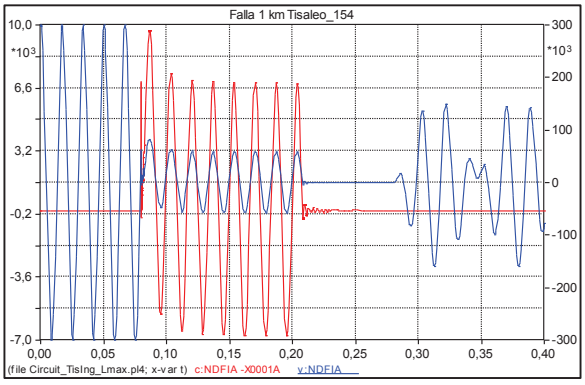



Figura 5.15. B

Figura 5.15. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Máxima Lluvioso

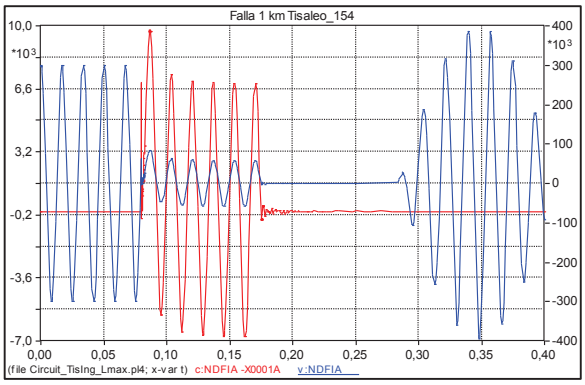



Figura 5.16. A

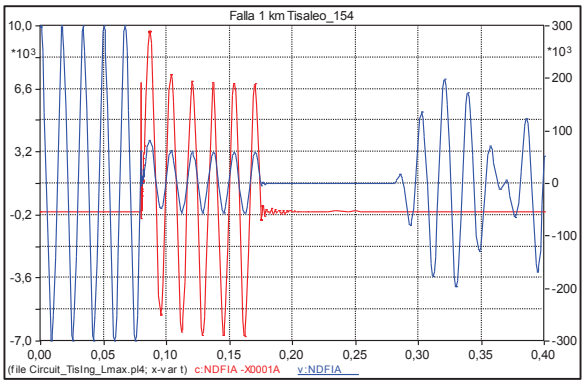



Figura 5.16. B

Figura 5.16. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Máxima Lluvioso

Para las figuras 5.14 a 5.16 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6.

En la tabla 5.10, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.10. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 59,287 | 62,843 | 66,4 | 43,6 | 47,37 | 50,8 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 106,1 | 97,2 | 88,8 | 84,32 | 77,5 | 72,524 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.9 y 5.10 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

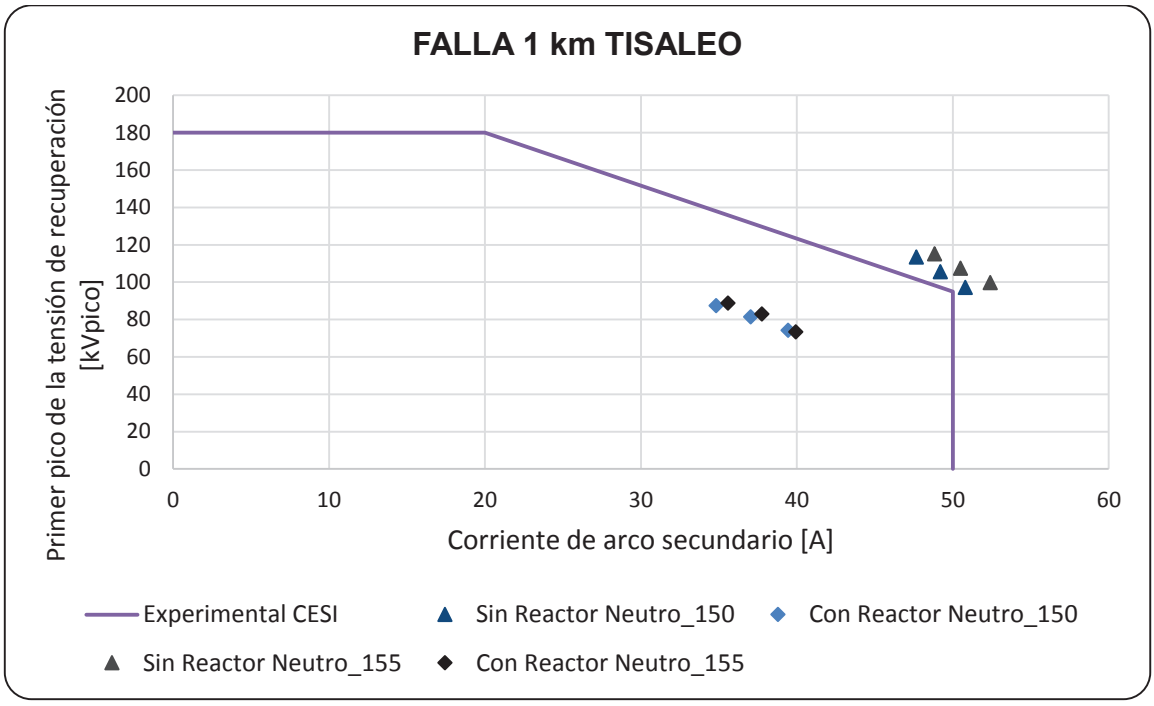



Figura 5.17. CESI 1 km Tisaleo, Máxima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo.

De acuerdo a la figura 5.17 para falla monofásica a 1 km de la S/E Tisaleo, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.9 y 5.10 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.9 y 5.10 para compensación de 60%, 69,69% y 80% tanto para longitud de línea de 150 y 155 km el rencendido del arco secundario sería neutralizado.

### 5.9.2 ANÁLISIS EN MÁXIMA ESTIAJE

***Falla Monofásica 1 km Inga.***

*Para longitud 150 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

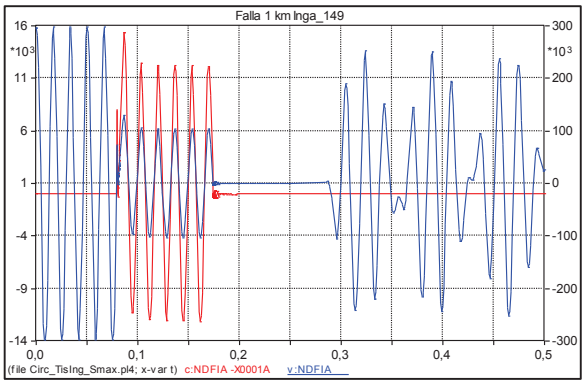



Figura 5.18. A

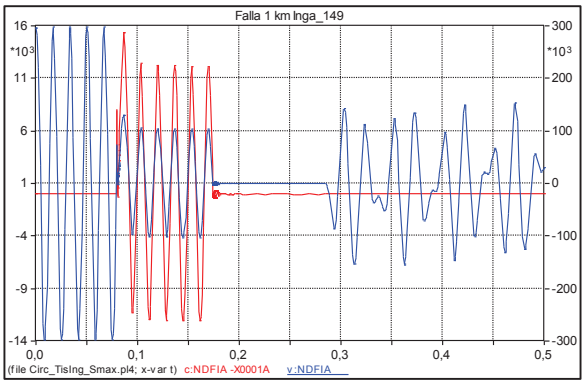



Figura 5.18. B

Figura 5.18. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Máxima Estiaje

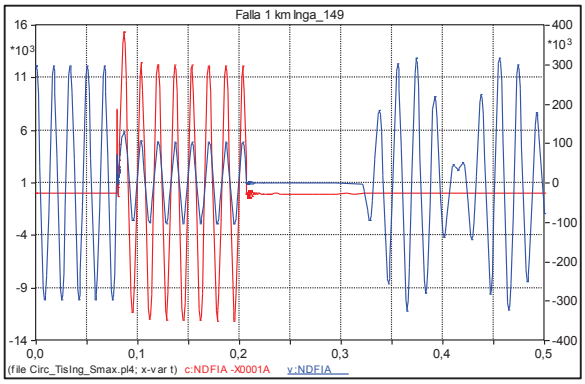



Figura 5.19. A

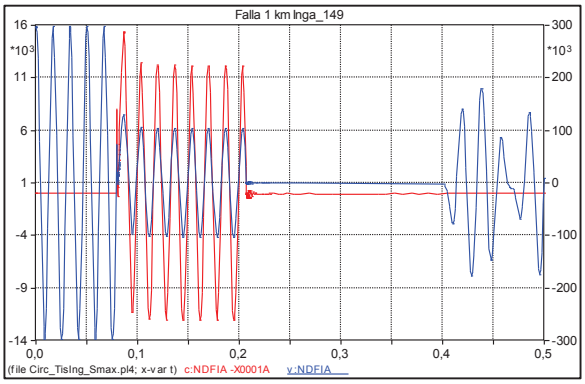



Figura 5.19. B

Figura 5.19. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Máxima Estiaje

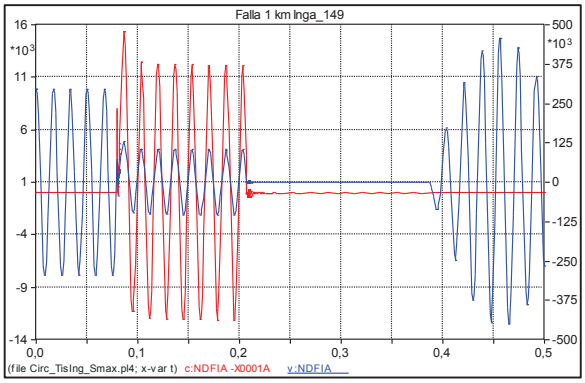



Figura 5.20. A

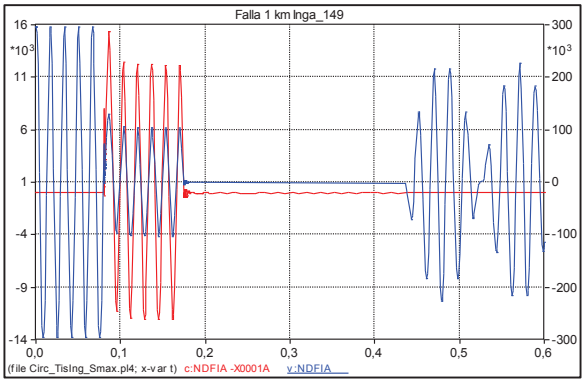



Figura 5.20. B

Figura 5.20. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Máxima Estiaje

Para las figuras 5.18 a 5.20 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.11, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con

150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Inga y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.11. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Máxima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 57,108 | 60,59 | 64,18 | 42,15 | 45,53 | 47,29 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 104,01 | 95,54 | 85,73 | 82,53 | 75,55 | 68,96 |

*Para longitud 155 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

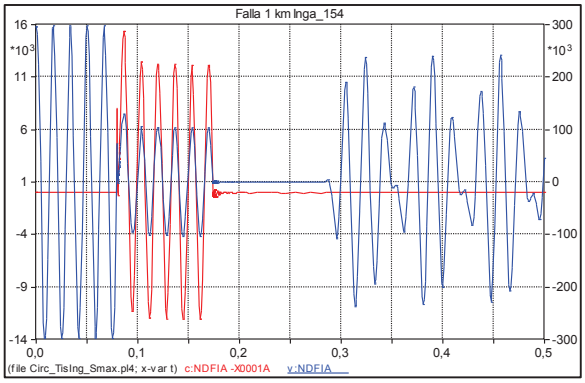



Figura 5.21. A

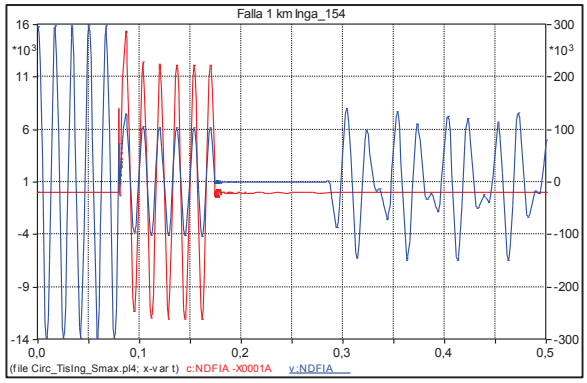



Figura 5.21. B

Figura 5.21. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Máxima Estiaje

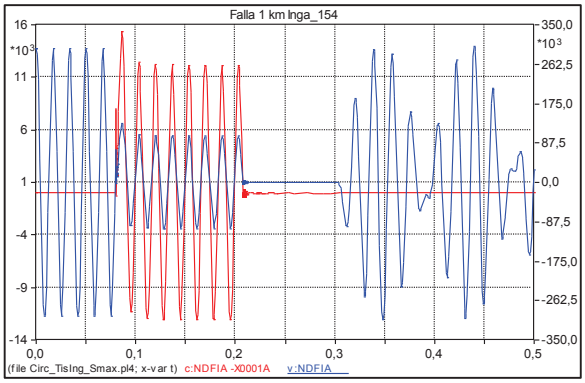



Figura 5.22. A

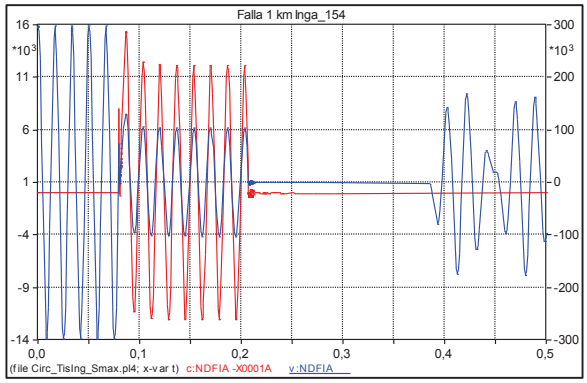



Figura 5.22. B

Figura 5.22. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Máxima Estiaje

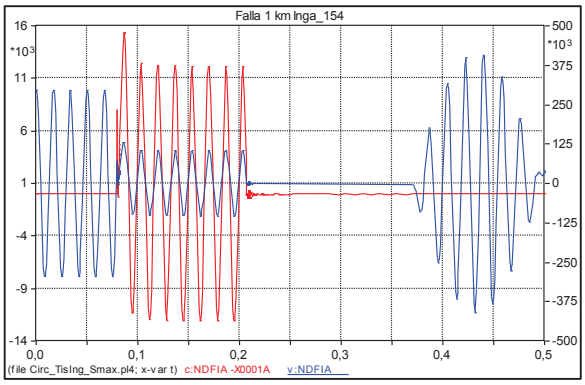



Figura 5.23. A

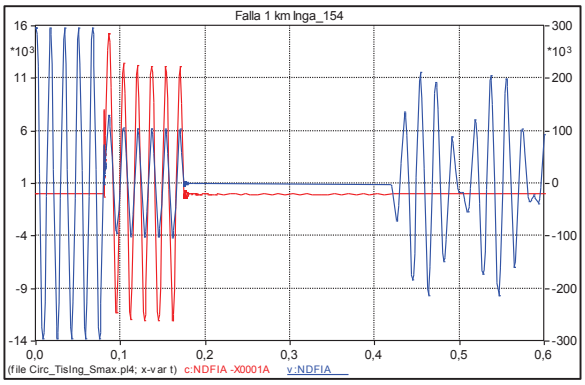



Figura 5.23. B

Figura 5.23. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Máxima Estiaje

Para las figuras 5.21 a 5.23 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.12, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Inga y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.12. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Máxima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 58,09 | 61,51 | 65,1 | 42,21 | 45,83 | 48,83 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 106,06 | 96,72 | 87,98 | 83,79 | 76,87 | 70,29 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.11 y 5.12 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

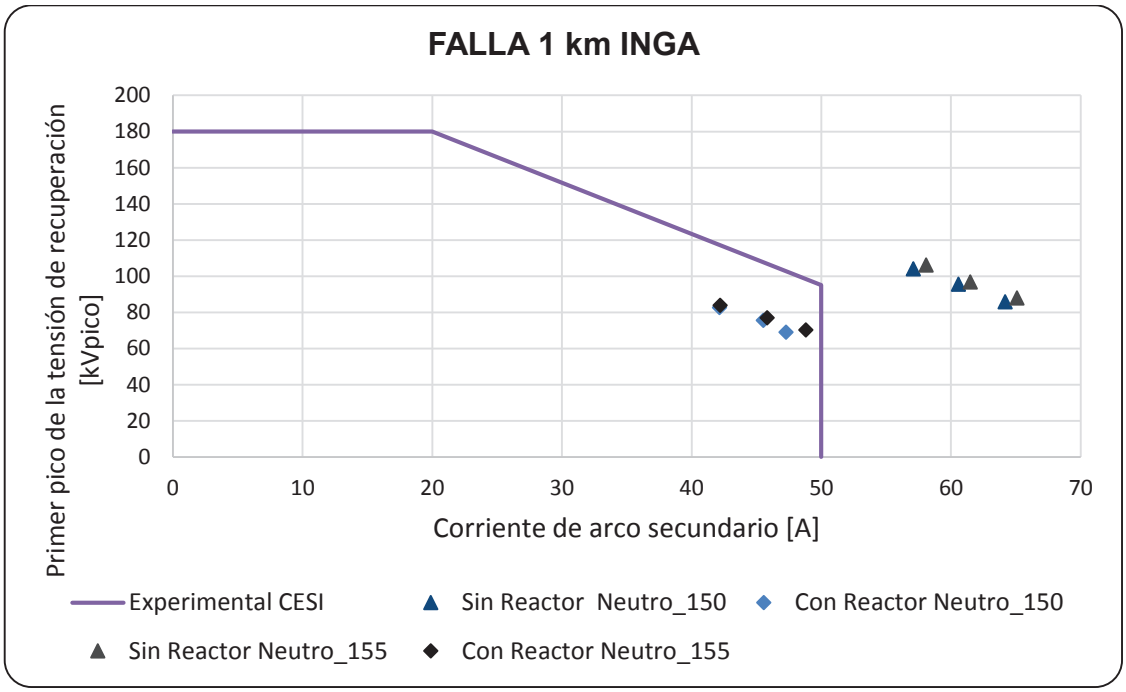



Figura 5.24. CESI 1 km Inga, Máxima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo.

De acuerdo a la figura 5.24 para falla monofásica a 1 km de la S/E Inga, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.11 y 5.12 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.11 y 5.12 para compensación de 60%, 69,69% y 80% tanto para longitud de línea de 150 y 155 km el rencendido del arco secundario sería neutralizado.

***Falla Monofásica 1 km Tisaleo.***

*Para longitud 150 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

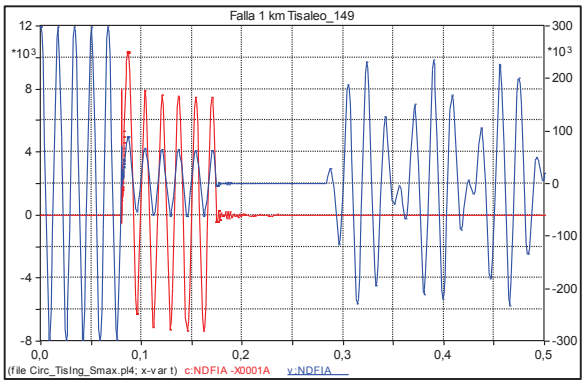



Figura 5.25. A

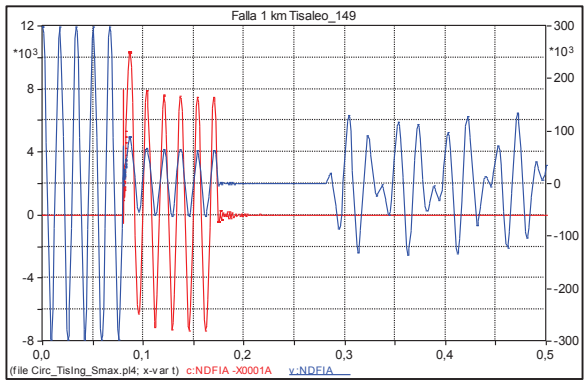



Figura 5.25. B

Figura 5.25. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Máxima Estiaje

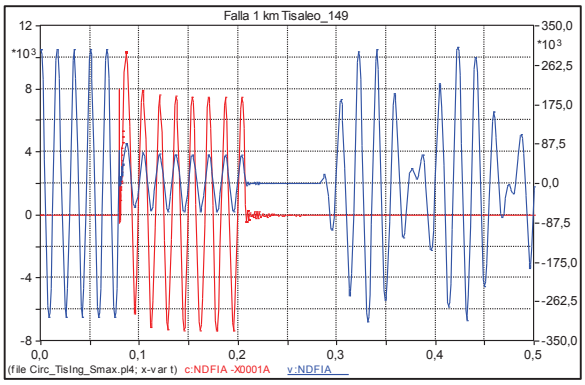



Figura 5.26. A

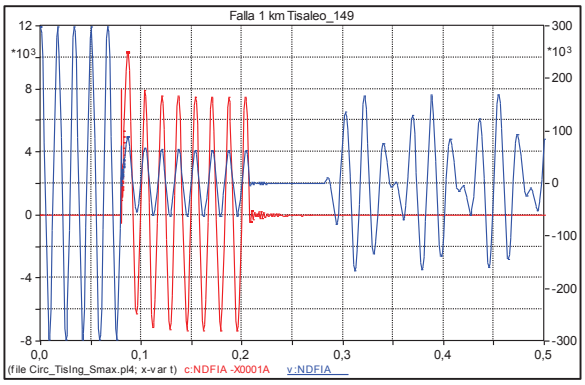



Figura 5.26. B

Figura 5.26. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Máxima Estiaje

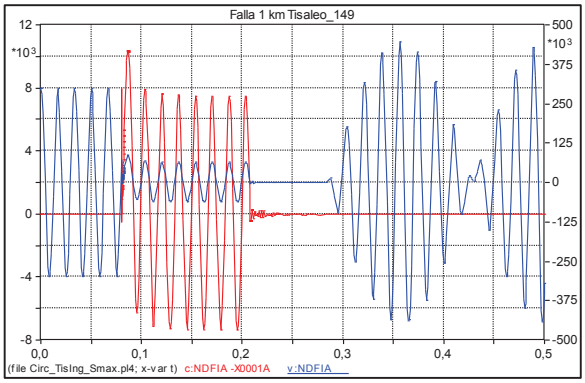



Figura 5.27. A

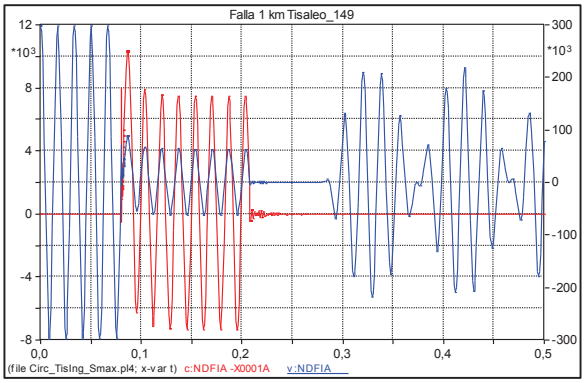



Figura 5.27. B

Figura 5.27. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Máxima Estiaje

Para las figuras 5.25 a 5.27 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6.

En la tabla 5.13, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.13. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 52,72 | 54,43 | 56,11 | 41,6 | 43,68 | 45,75 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 112,24 | 104,21 | 96,23 | 86,65 | 80,4 | 74,035 |

*Para longitud 155 km, se obtuvo:*

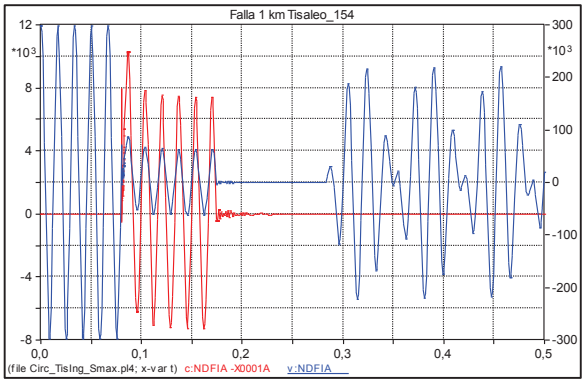



Figura 5.28. A

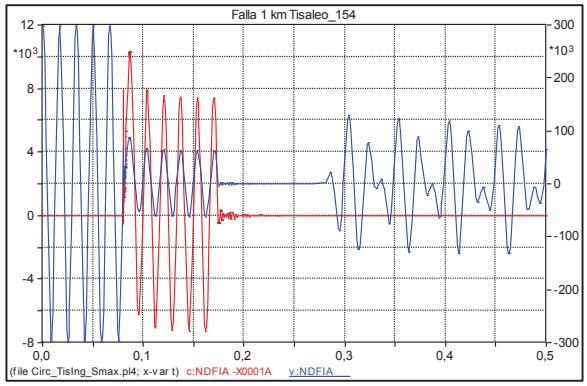



Figura 5.28. B

Figura 5.28. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Máxima Estiaje

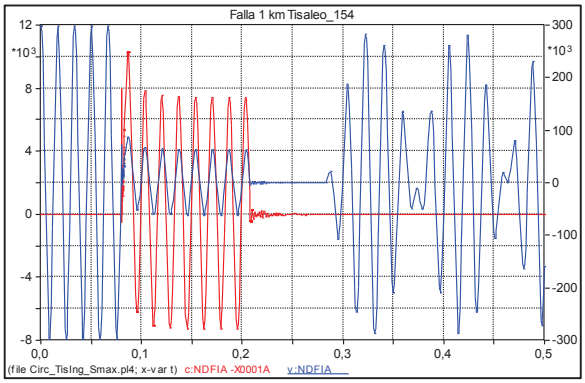



Figura 5.29. A

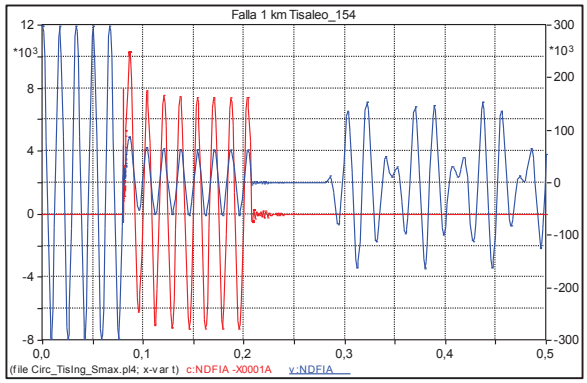



Figura 5.29. B

Figura 5.29. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Máxima Estiaje

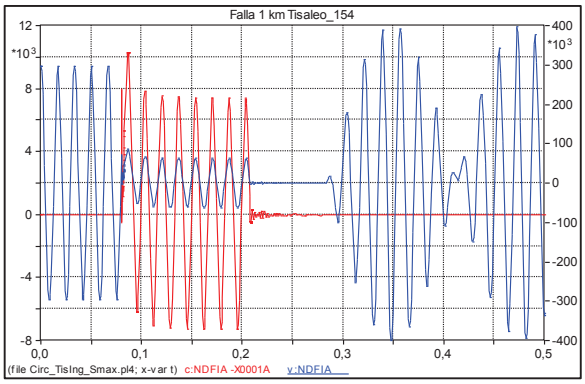



Figura 5.30. A

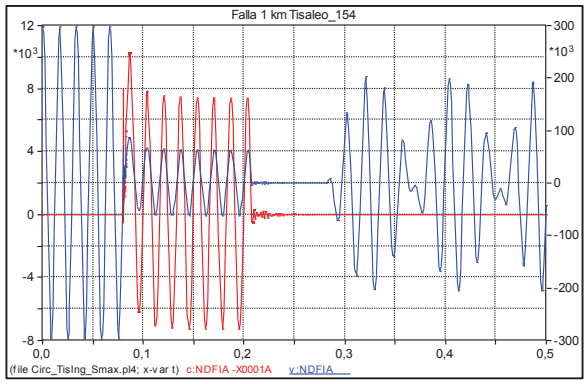



Figura 5.30. B

Figura 5.30. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Máxima Estiaje

Para las figuras 5.28 a 5.30 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.14, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.14. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 54,69 | 56,53 | 58,37 | 41,291 | 43,88 | 46,482 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 114,9 | 106,64 | 97,8 | 88,084 | 80,33 | 72,344 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.13 y 5.14 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

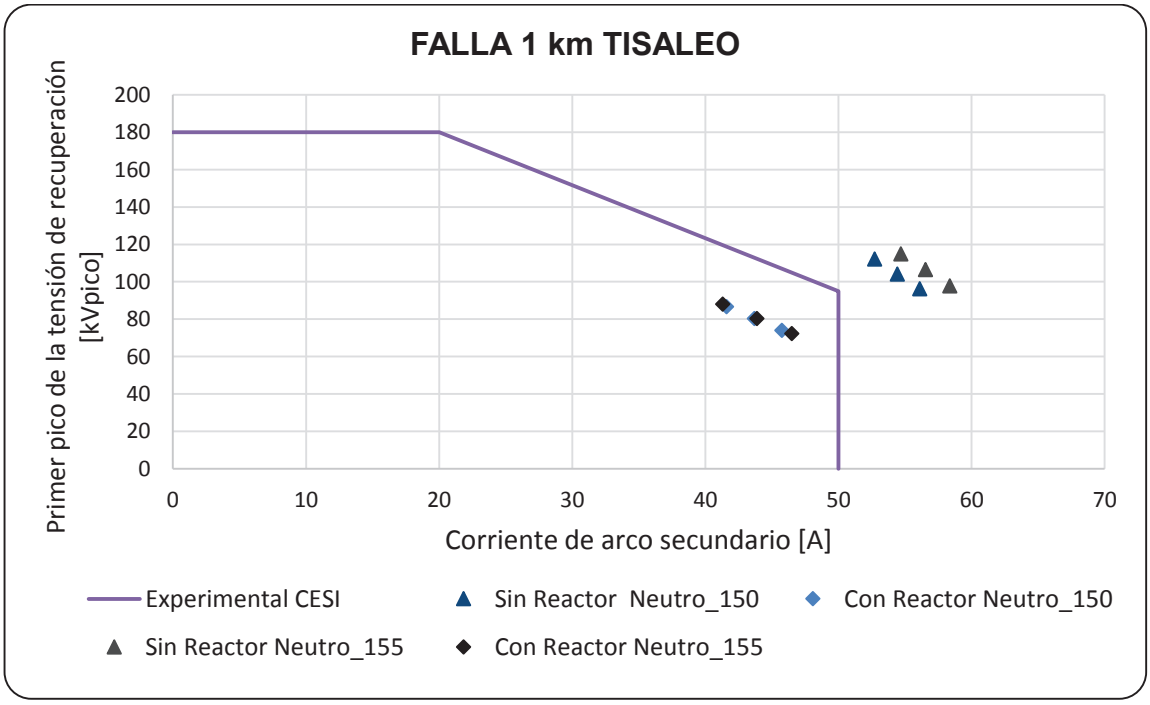



Figura 5.31. CESI 1 km Tisaleo, Máxima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo.

De acuerdo a la figura 5.31 para falla monofásica a 1 km de la S/E Tisaleo, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.13 y 5.14 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de

reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.13 y 5.14 para compensación de 60%, 69,69% y 80% tanto para longitud de línea de 150 y 155 km el rencendido del arco secundario sería neutralizado.

### 5.9.3 ANÁLISIS EN MÍNIMA LLUVIOSO

***Falla Monofásica 1 km Inga.***

*Para longitud 150 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

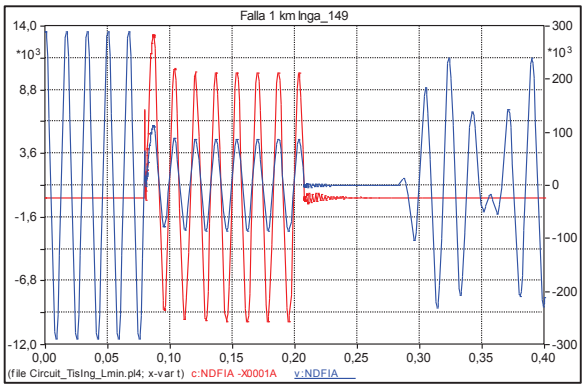



Figura 5.32. A

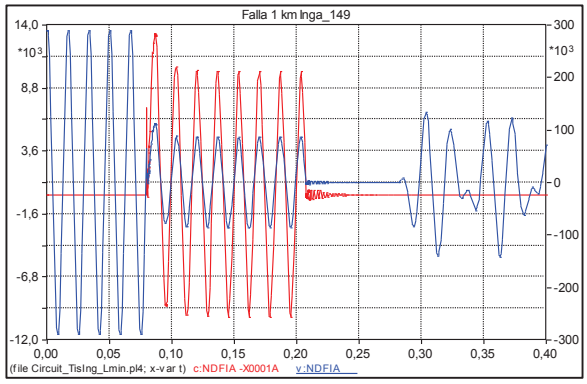



Figura 5.32. B

Figura 5.32. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Mínima Lluvioso

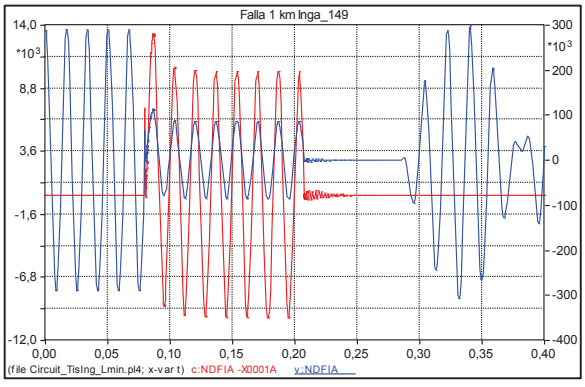



Figura 5.33. A

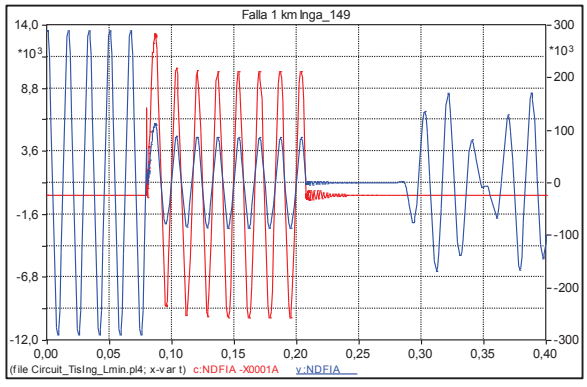



Figura 5.33. B

Figura 5.33. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Mínima Lluvioso

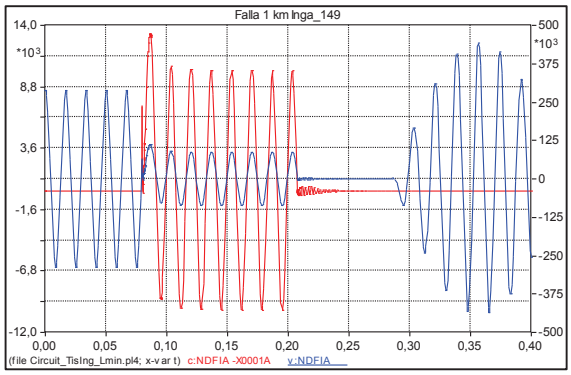



Figura 5.34. A

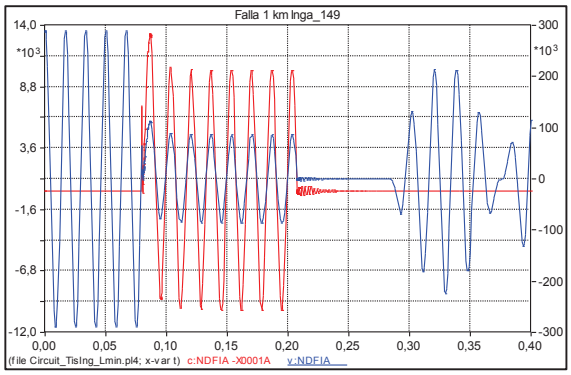



Figura 5.34. B

Figura 5.34. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Mínima Lluvioso

Para las figuras 5.32 a 5.34 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6.

En la tabla 5.15, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Inga y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.15. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Mínima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 59,57 | 62,9 | 66,506 | 43,785 | 47,56 | 50,551 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 104,4 | 95,1 | 86,3 | 83,51 | 75,6 | 69,9 |

***Para longitud 155 km, se obtuvo los siguientes resultados:***

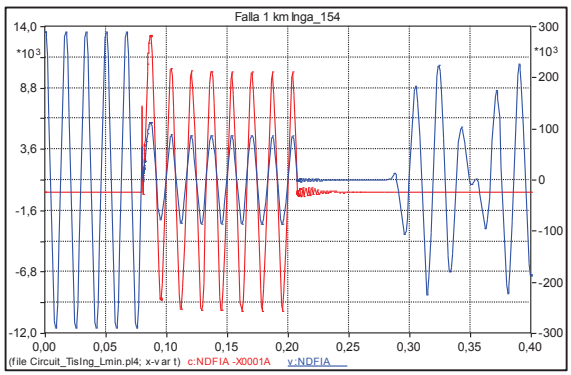



Figura 5.35. A

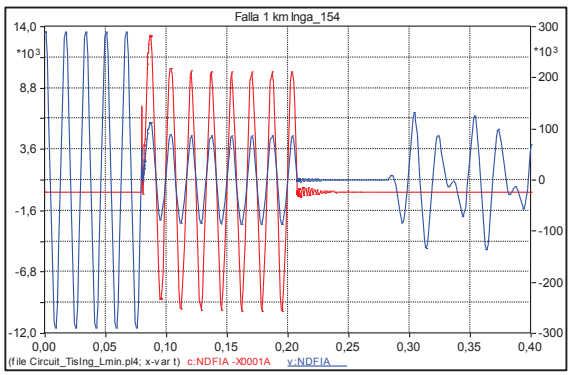



Figura 5.35. B

Figura 5.35. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Mínima Lluvioso

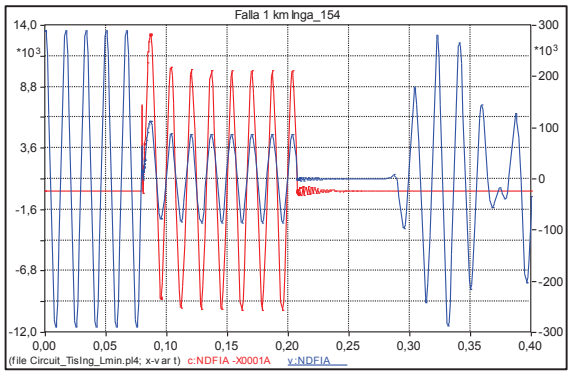



Figura 5.36. A

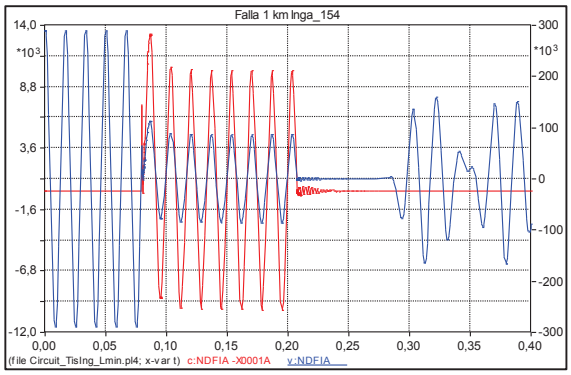



Figura 5.36. B

Figura 5.36. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Mínima Lluvioso

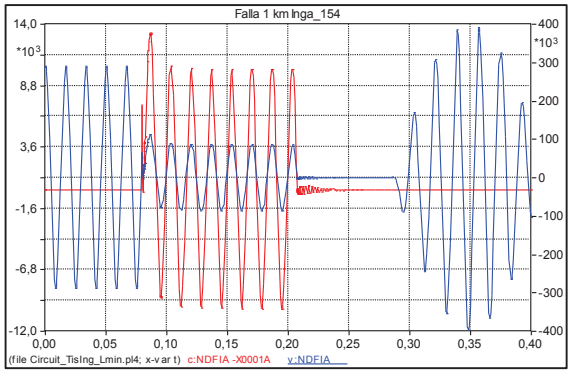



Figura 5.37. A

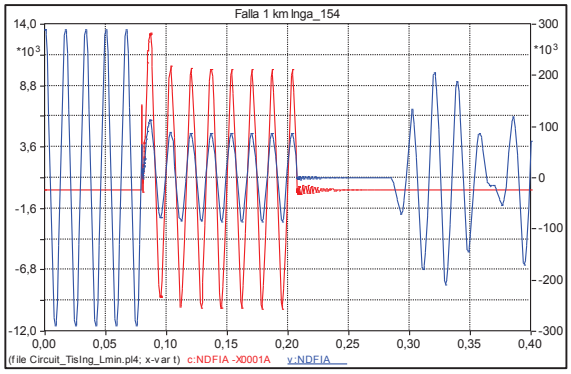



Figura 5.37. B

Figura 5.37. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Mínima Lluvioso

Para las figuras 5.35 a 5.37 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6.

En la tabla 5.16, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Inga y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.16. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Mínima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 59,82 | 62,963 | 66,611 | 45,51 | 49,1 | 52,8 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 106,3 | 99,899 | 90,683 | 86,717 | 79,45 | 70,4 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.15 y 5.16 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

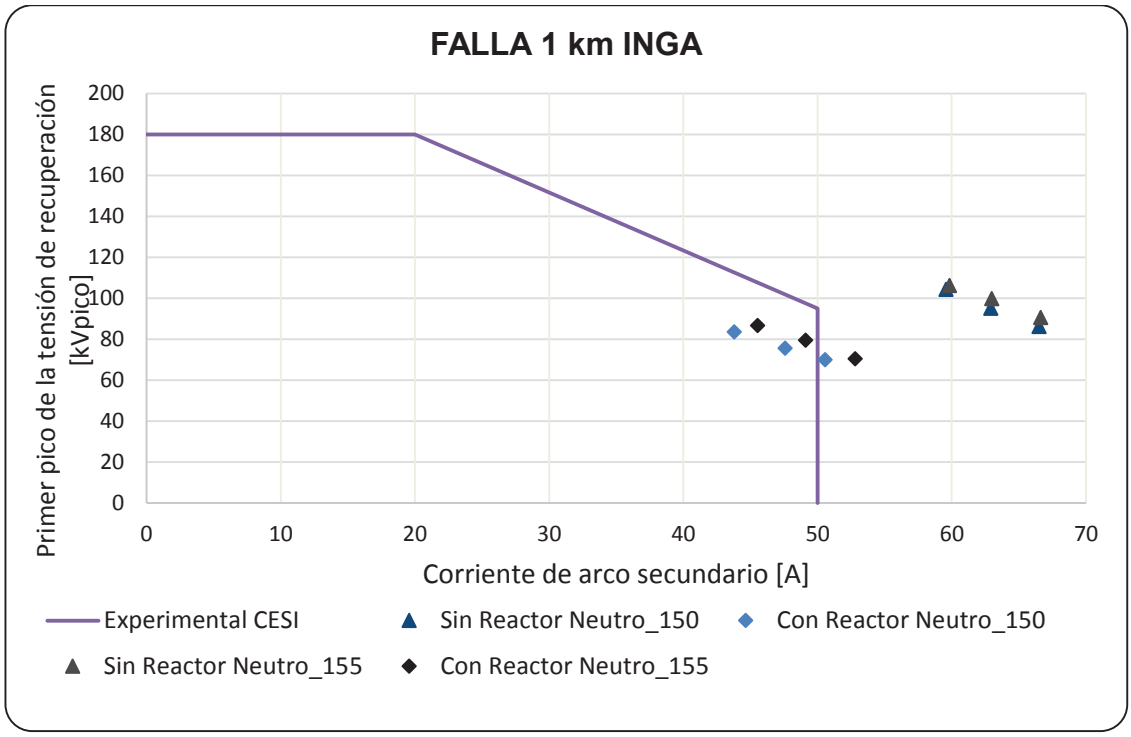



Figura 5.38. CESI 1 km Inga, Mínima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo.

De acuerdo a la figura 5.41 para falla monofásica a 1 km de la S/E Inga, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.15 y 5.16 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.15 y 5.16 para compensación de 60%, 69,69% tanto para longitud de 150 y 155 km el rencendido del arco secundario sería neutralizado, pero para 80% de compensación para ambas longitudes los resultados se encuentran fuera de la zona de neutralización del arco secundario.

***Falla Monofásica 1 km Tisaleo.***

*Para longitud 150 km, se obtuvo:*

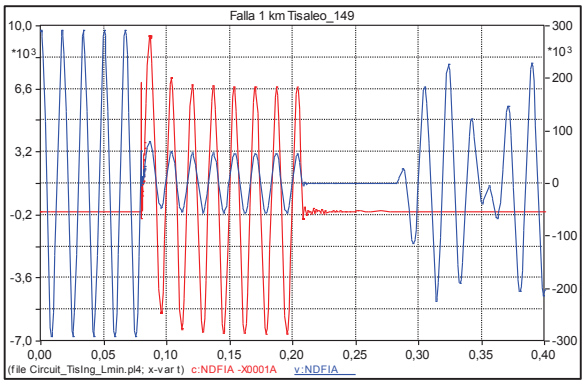



Figura 5.39. A

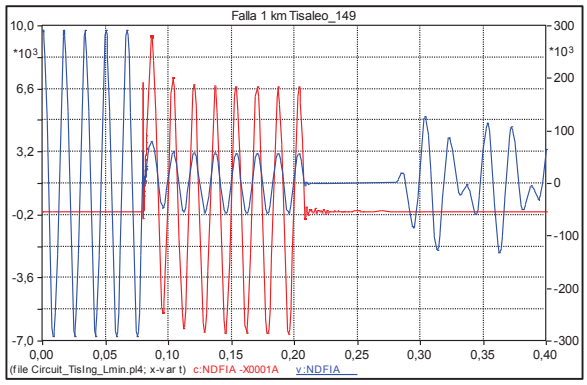



Figura 5.39. B

Figura 5.39. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Mínima Lluvioso

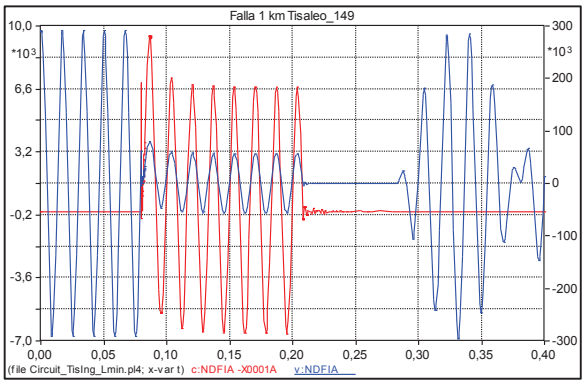



Figura 5.40. A

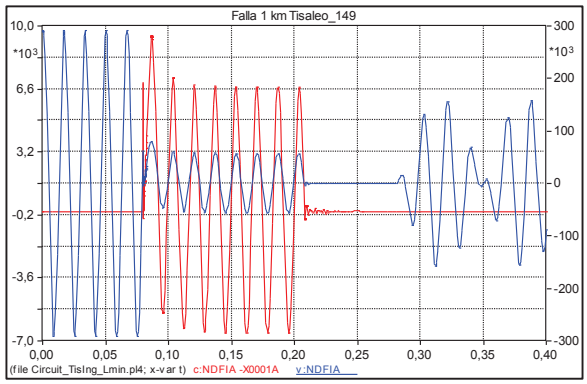



Figura 5.40. B

Figura 5.40. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Mínima Lluvioso

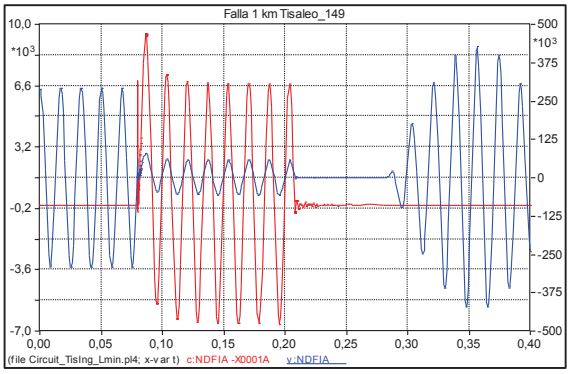



Figura 5.41. A

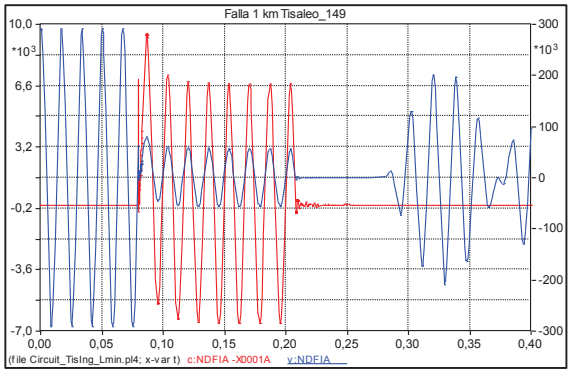



Figura 5.41. B

Figura 5.41. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Mínima Lluvioso

Para las figuras 5.39 a 5.41 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6.

En la tabla 5.17, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.17. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 49,493 | 51,354 | 53,229 | 35,6 | 37,9 | 39,94 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 116,21 | 108,11 | 100 | 85,17 | 79,6 | 72,64 |

*Para longitud 155 km, se obtuvo:*

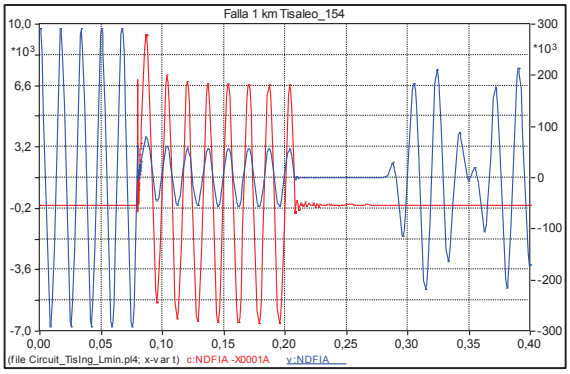



Figura 5.42. A

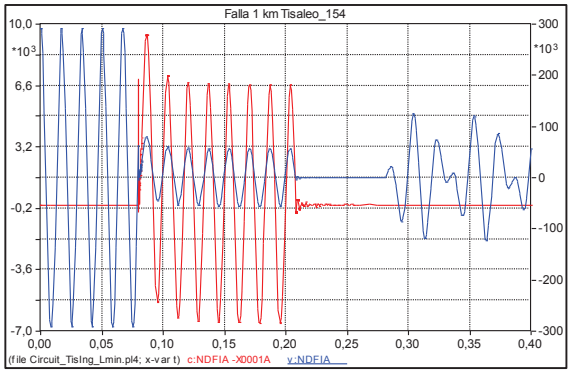



Figura 5.42. B

Figura 5.42. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Mínima Lluvioso

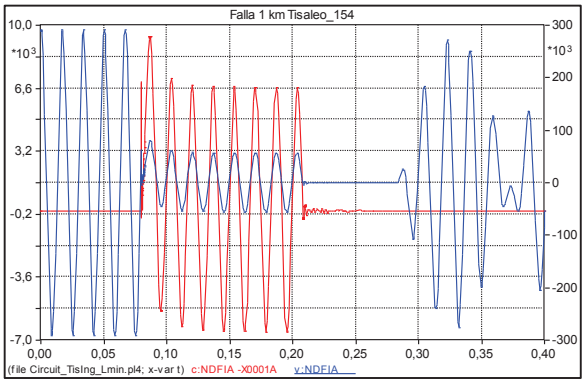



Figura 5.43. A

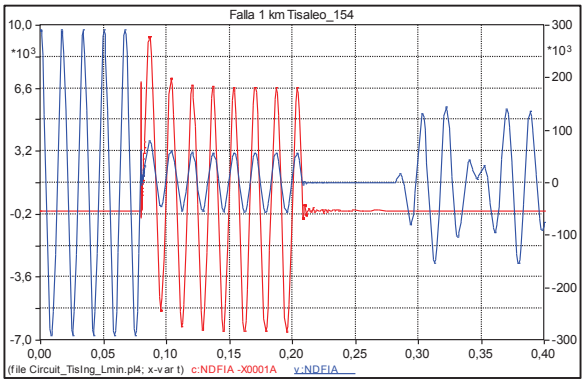



Figura 5.43. B

Figura 5.43. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Mínima Lluvioso

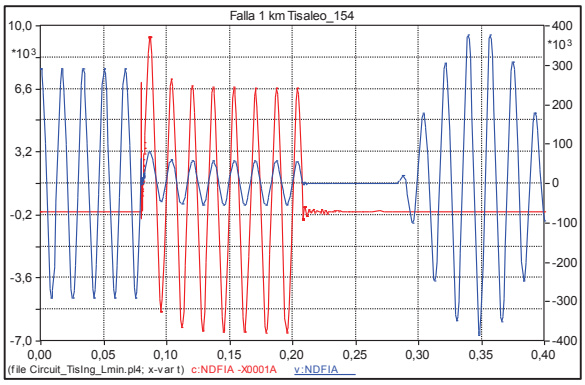



Figura 5.44. A

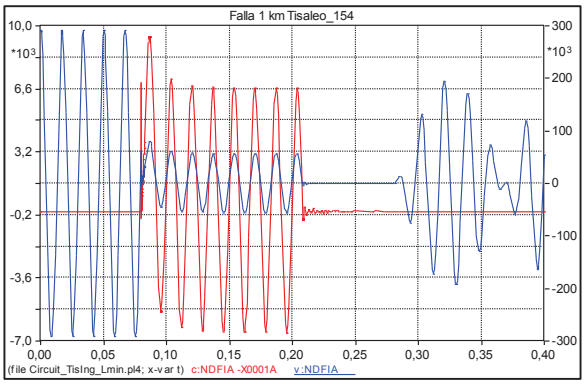



Figura 5.44. B

Figura 5.44. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Mínima Lluvioso

Para las figuras 5.42 a 5.44 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.18, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.18. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 49,953 | 51,712 | 53,492 | 36,17 | 38,1 | 39,97 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 117,83 | 110,23 | 102,61 | 85,85 | 80,5 | 74,7 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.17 y 5.18 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

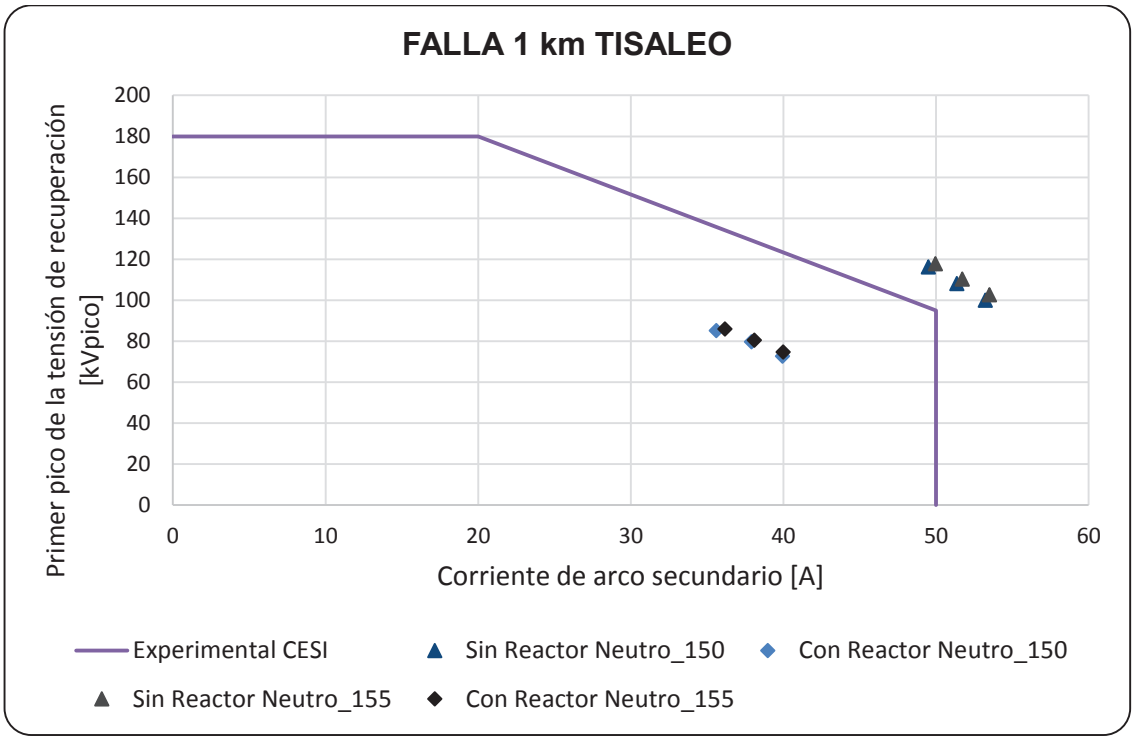



Figura 5.45. CESI 1 km Tisaleo, Mínima Lluvioso, L/T Inga-Tisaleo.

De acuerdo a la figura 5.45 para falla monofásica a 1 km de la S/E Tisaleo, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.17 y 5.18 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.17 y 5.18 para compensación de 60%, 69,69% y 80% tanto para longitud de línea 150 y 155 km el rencendido del arco secundario sería neutralizado.

### 5.9.4 ANÁLISIS EN MÍNIMA ESTIAJE

***Falla Monofásica 1 km Inga.***

*Para longitud 150 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

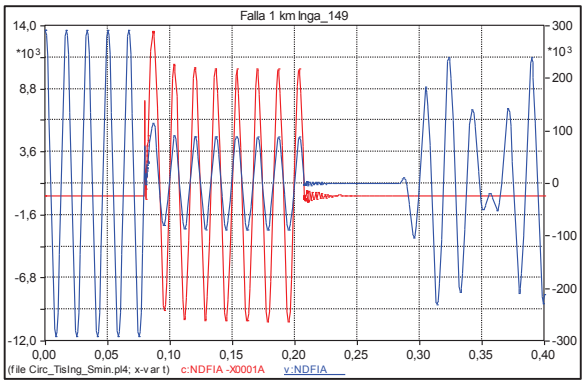



Figura 5.46. A

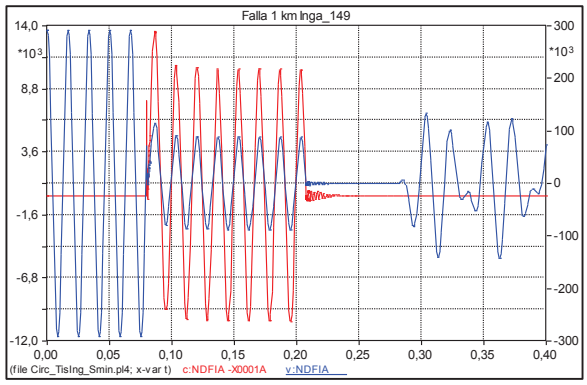



Figura 5.46. B

Figura 5.46. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Mínima Estiaje

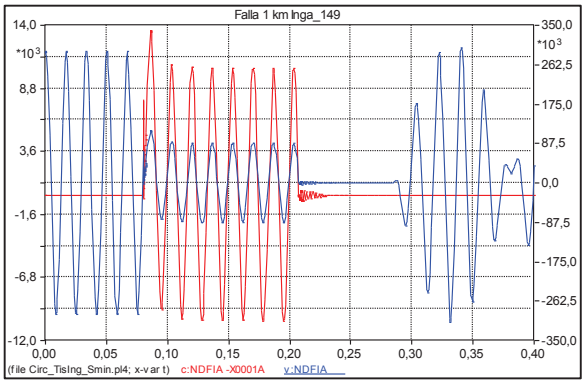



Figura 5.47. A

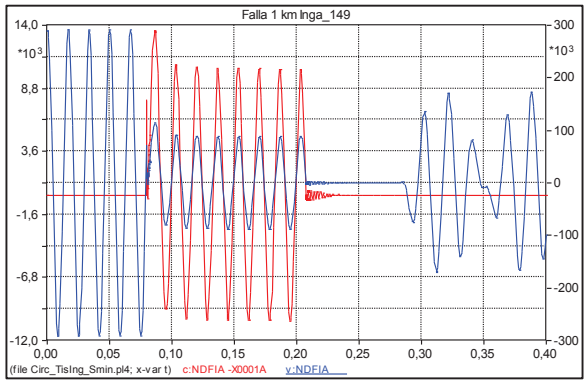



Figura 5.47. B

Figura 5.47. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Mínima Estiaje

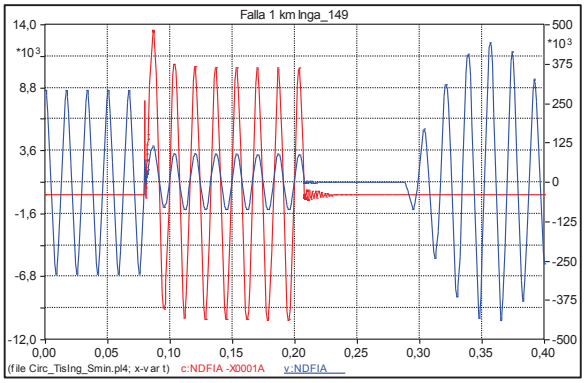



Figura 5.48. A

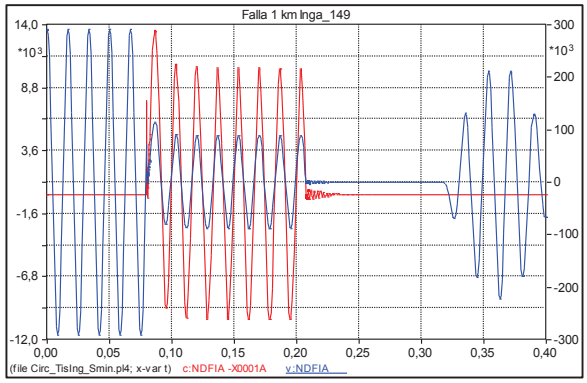



Figura 5.48. B

Figura 5.48. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 150 km, Mínima Estiaje

Para las figuras 5.46 a 5.48 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.19, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con

150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Inga y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.19. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Mínima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 64,465 | 66,869 | 67,36 | 47,64 | 48,33 | 48,853 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 104,88 | 96,159 | 87,498 | 86,56 | 78,2 | 70,497 |

*Para longitud 155 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

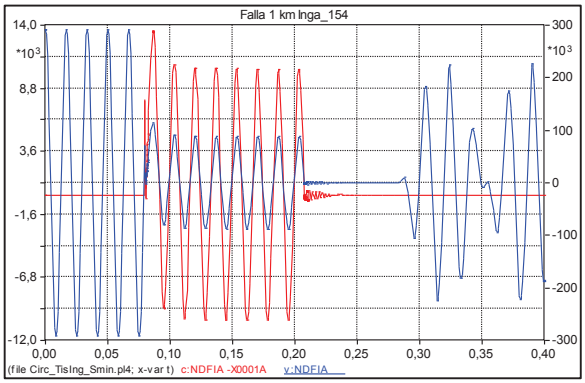



Figura 5.49. A

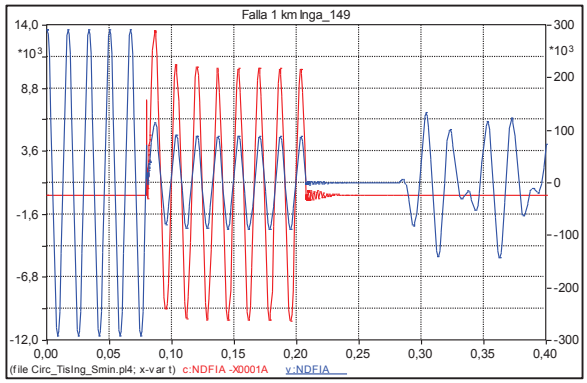



Figura 5.49. B

Figura 5.49. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Mínima Estiaje

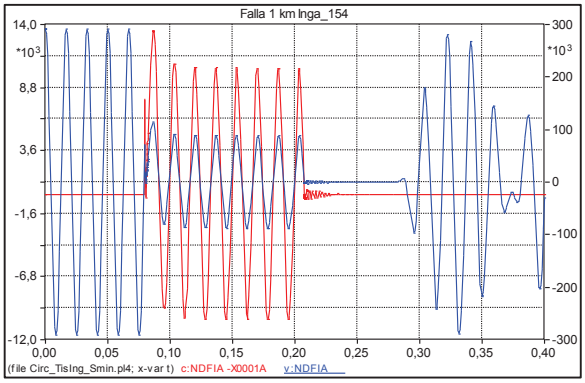



Figura 5.50. A

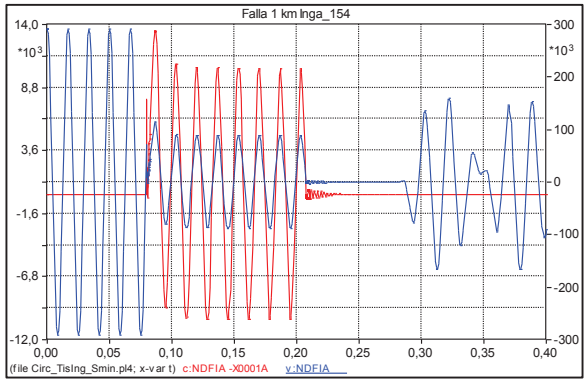



Figura 5.50. B

Figura 5.50. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Mínima Estiaje

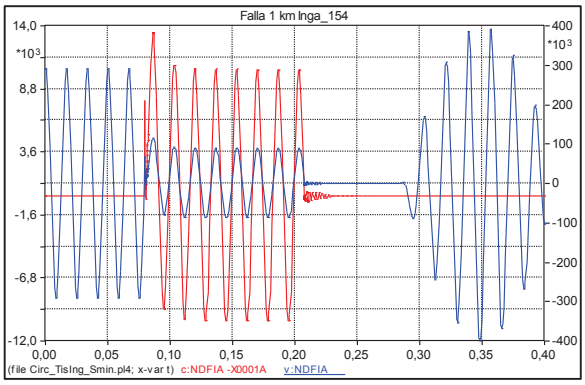



Figura 5.51. A

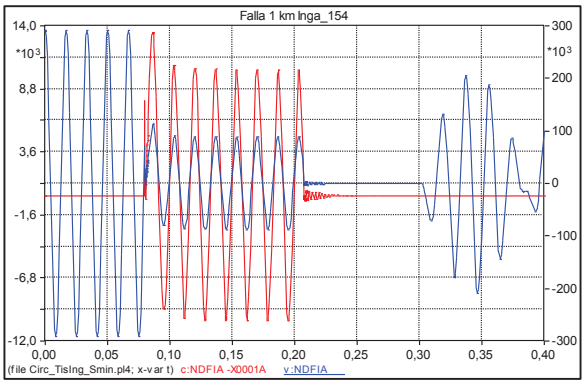



Figura 5.51. B

Figura 5.51. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Inga-Tisaleo 155 km, Mínima Estiaje

Para las figuras 5.49 a 5.51 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.20, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Inga y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.20. Resultados de Arco Secundario para Falla 1 km Inga, Mínima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 66,358 | 67,692 | 68,437 | 49,16 | 49,89 | 50,86 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 106,69 | 98,154 | 89,543 | 87,463 | 79,54 | 71,885 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.19 y 5.20 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

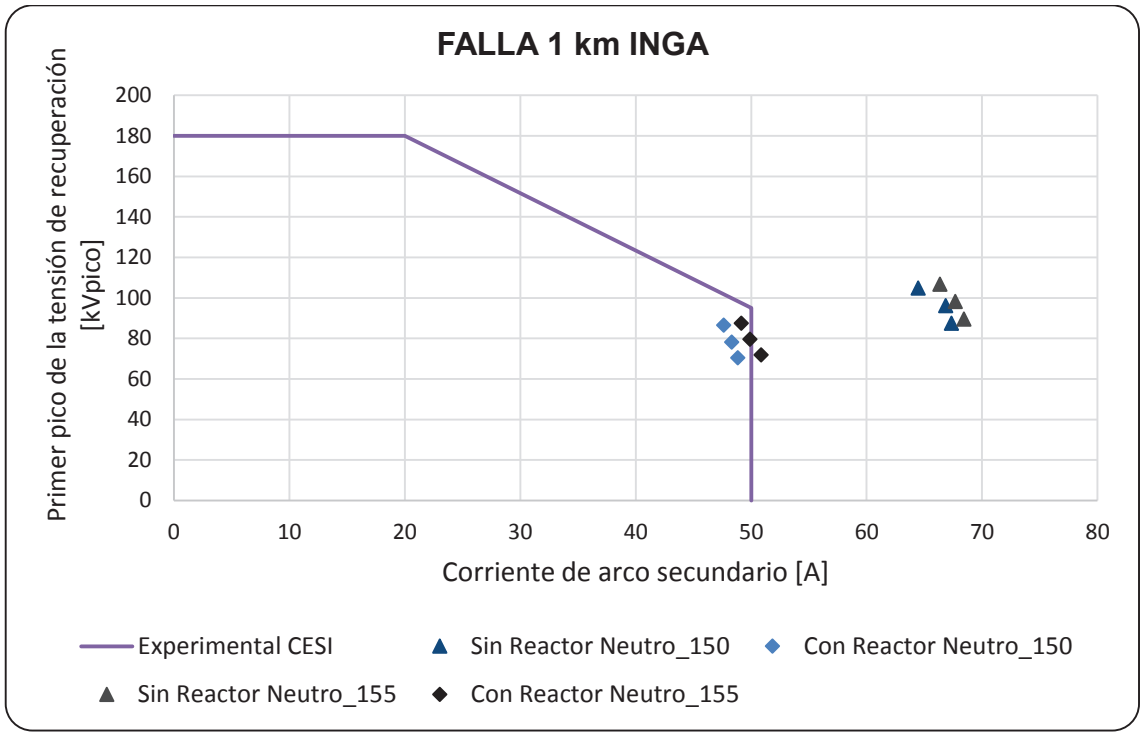



Figura 5.52. CESI 1 km Inga, Mínima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo.

De acuerdo a la figura 5.52 para falla monofásica a 1 km de la S/E Inga, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.19 y 5.20 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.19 y 5.20 para compensación de 60% y 69,69% el rencendido del arco secundario sería neutralizado para longitudes de línea de 150 y 155 km, para compensación de 80% la neutralización del arco secundario se produciría para 150 km de longitud pero no se neutralizaría para 155 km debido a que el valor de 50,86 A de corriente de arco secundario esta fuera de la zona de neutralización de arco secundario.

***Falla Monofásica 1 km Tisaleo.***

*Para longitud 150 km, se obtuvo:*

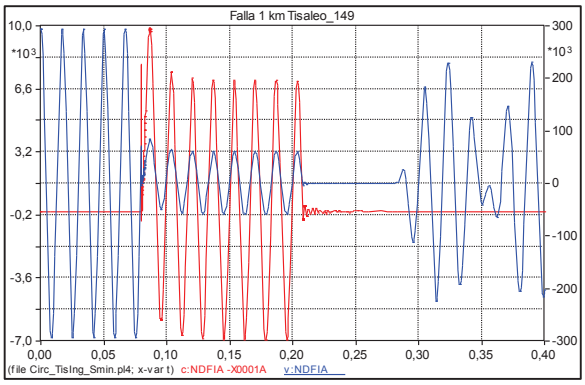



Figura 5.53. A

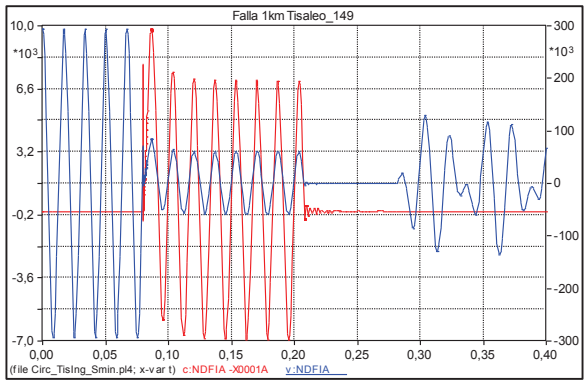



Figura 5.53. B

Figura 5.53. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Mínima Estiaje

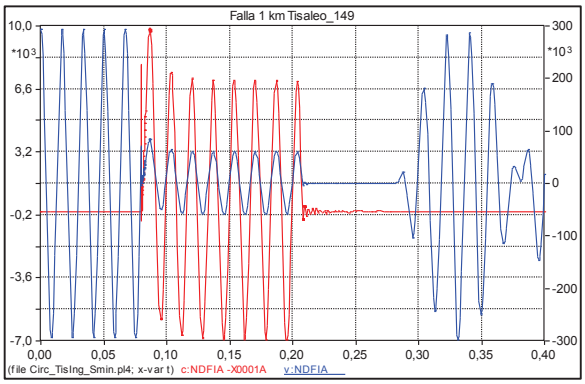



Figura 5.54. A

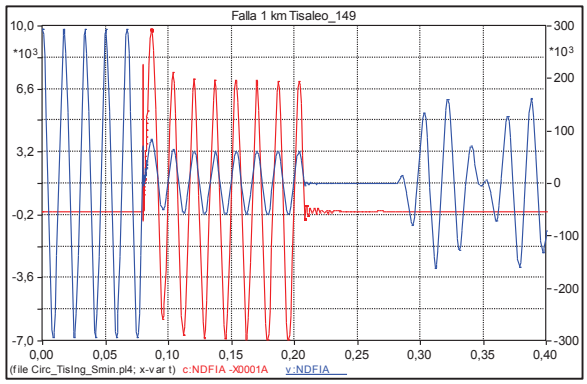



Figura 5.54. B

Figura 5.54. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Mínima Estiaje

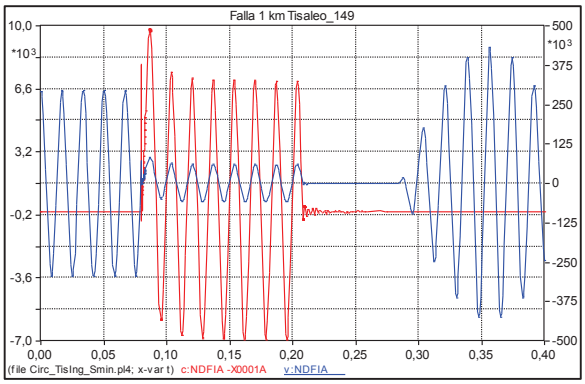



Figura 5.55. A

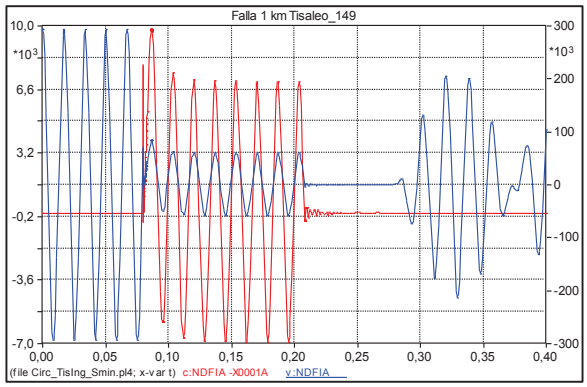



Figura 5.55. B

Figura 5.55. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 150 km, Mínima Estiaje

Para las figuras 5.53 a 5.55 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.21, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con

150 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.21. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 150 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 55,138 | 57,344 | 59,586 | 41,861 | 44,34 | 46,76 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 112,88 | 104,46 | 96,497 | 86,23 | 78,51 | 69,714 |

*Para longitud 155 km, se obtuvo:*

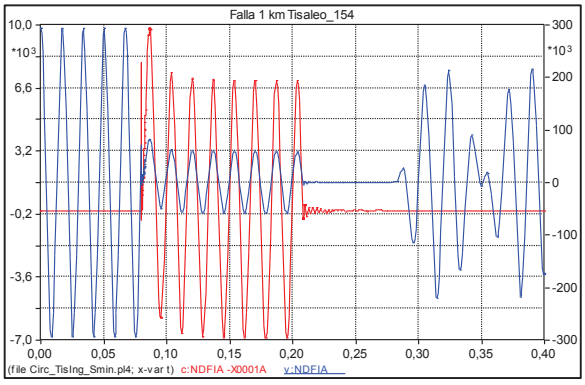



Figura 5.56. A

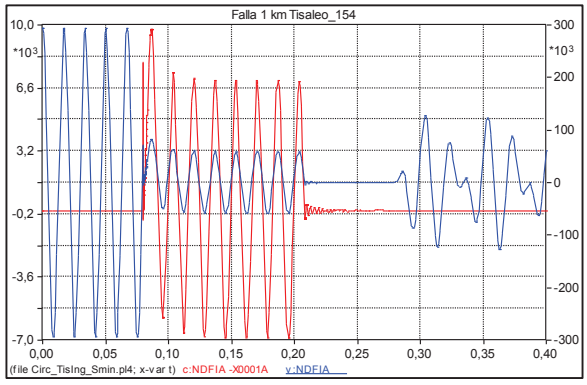



Figura 5.56. B

Figura 5.56. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Mínima Estiaje

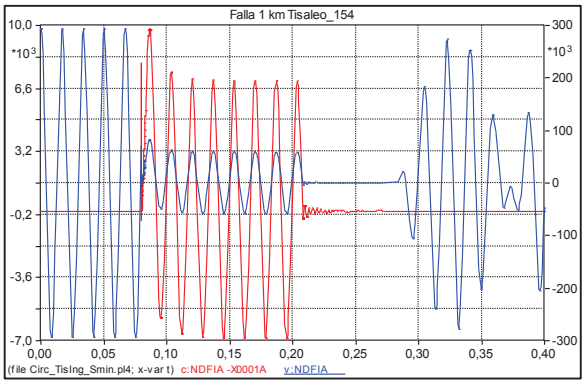



Figura 5.57. A

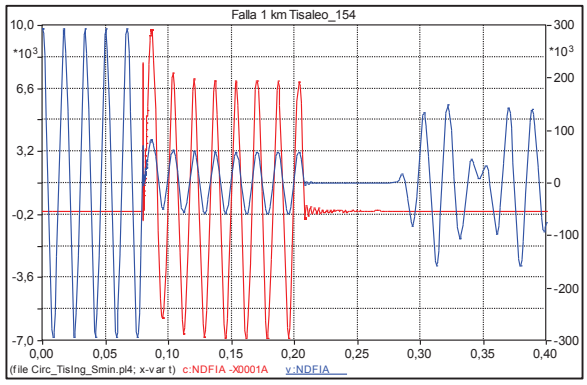



Figura 5.57. B

Figura 5.57. A. 69.69% Compensación Sin $R_N$. B. 69.69% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Mínima Estiaje

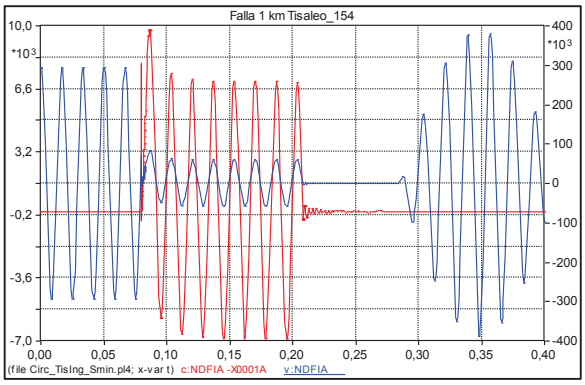



Figura 5.58. A

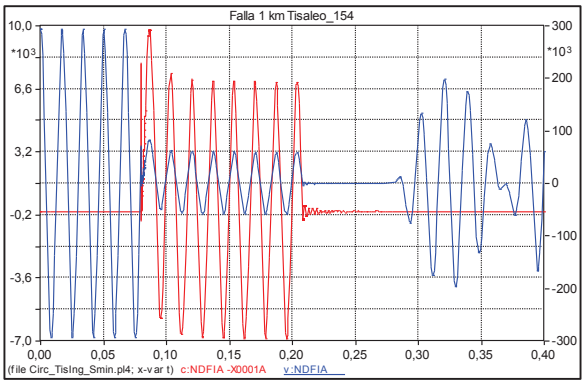



Figura 5.58. B

Figura 5.58. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Inga 155 km, Mínima Estiaje

Para las figuras 5.56 a 5.58 se presenta el efecto en la tensión de recuperación similar a los anteriores resultados obtenidos en las figuras 5.4 a 5.6

En la tabla 5.22, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Inga-Tisaleo, con 155 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.22. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo 155 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** | ***60*** | ***69,69*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 57,092 | 59,366 | 61,629 | 43,03 | 44,88 | 46,858 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 114,63 | 107,49 | 99,347 | 87,27 | 82,51 | 76,49 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.21 y 5.22 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

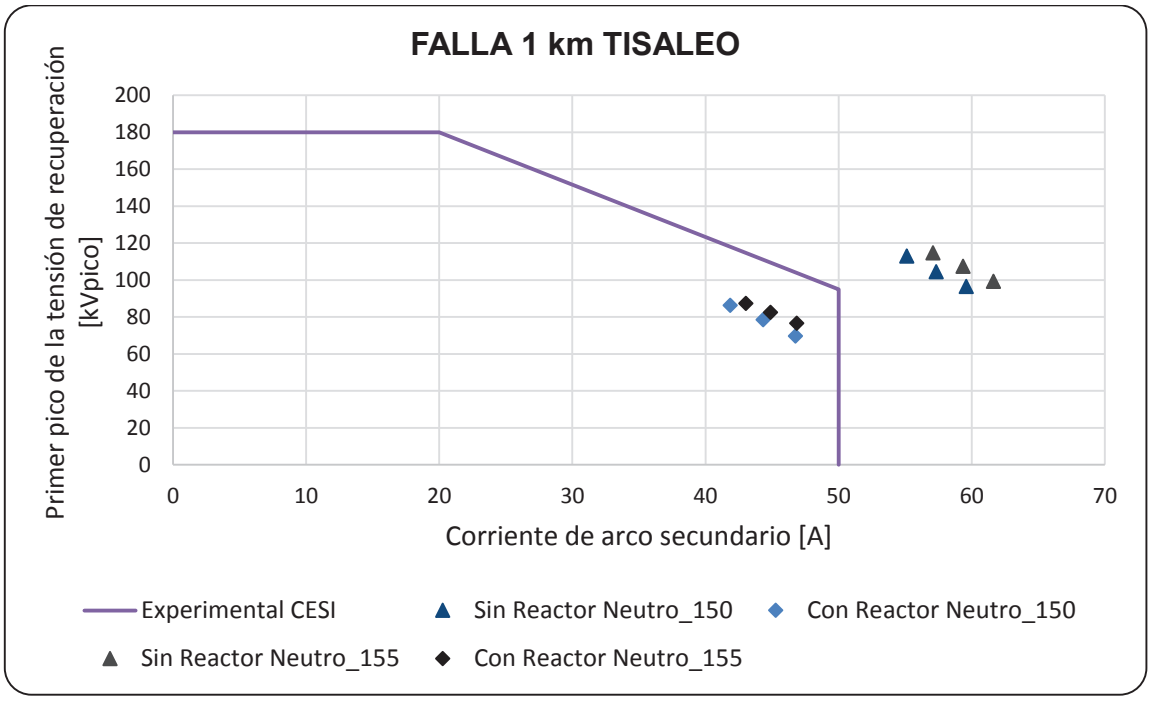



Figura 5.59. CESI 1 km Tisaleo, Mínima Estiaje, L/T Inga-Tisaleo.

De acuerdo a la figura 5.59 para falla monofásica a 1 km de la S/E Tisaleo, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.21 y 5.22 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.21 y 5.22 para compensación de 60%, 69,69% y 80% el rencendido del arco secundario sería neutralizado para longitudes de línea de 150 y 155 km.

## 5.10 ANÁLISIS PARA L/T TISALEO - CHORRILLOS

A continuación se presenta los resultados obtenidos de corriente de arco secundario para la L/T Tisaleo-Chorrillos en los escenarios de demanda máxima y mínima.

### 5.10.1 ANÁLISIS EN MÁXIMA LLUVIOSO

***Falla Monofásica 1 km Chorrillos*** [Anexo E]**.**

*Para longitud 200 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

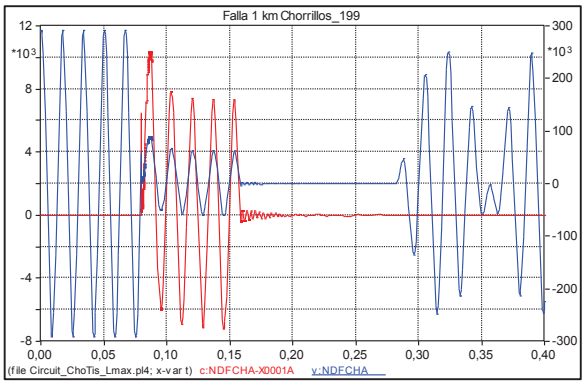



Figura 5.60. A

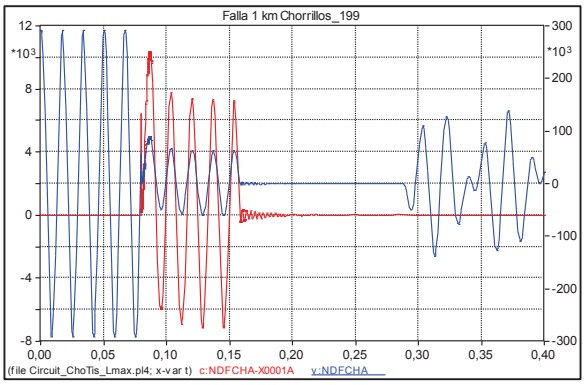



Figura 5.60. B

Figura 5.60. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Máxima Lluvioso

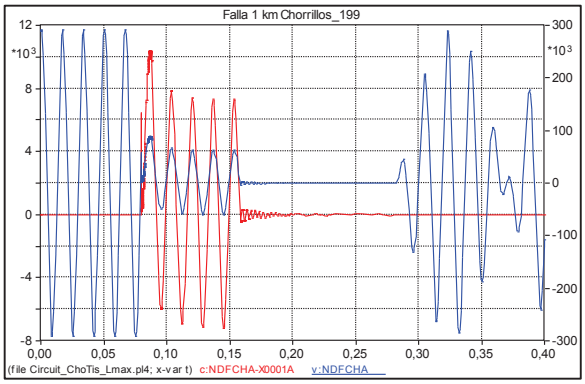



Figura 5.61. A

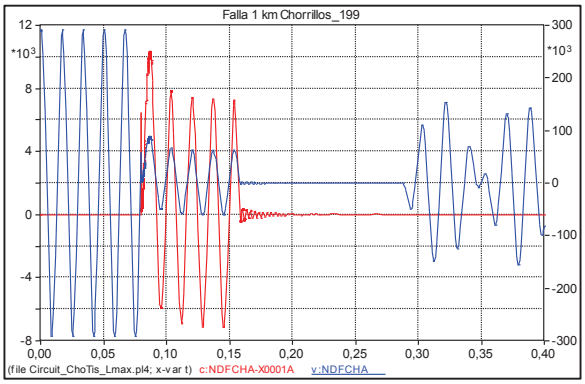



Figura 5.61. B

Figura 5.61. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Máxima Lluvioso

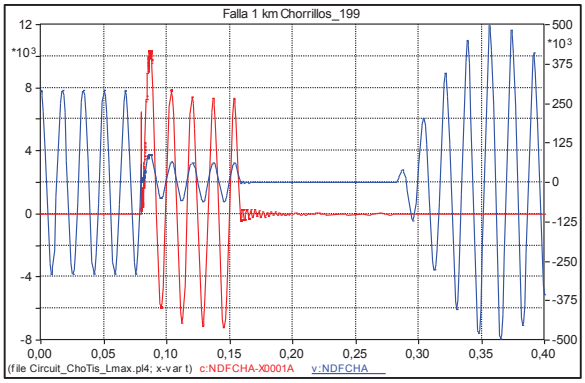



Figura 5.62. A

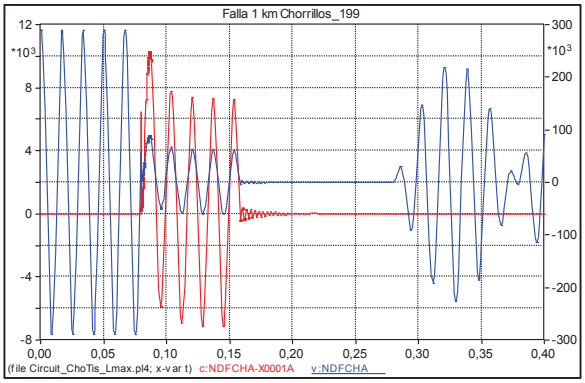



Figura 5.62. B

Figura 5.62. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Máxima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.60 a 5.62, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.23, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.23. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Máxima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 58,23 | 58,8 | 60,26 | 43,1 | 43,74 | 45,198 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 131,38 | 127,38 | 115,57 | 96,15 | 93,45 | 86,505 |

*<u>Para longitud 205 km, se obtuvo los siguientes resultados:</u>*

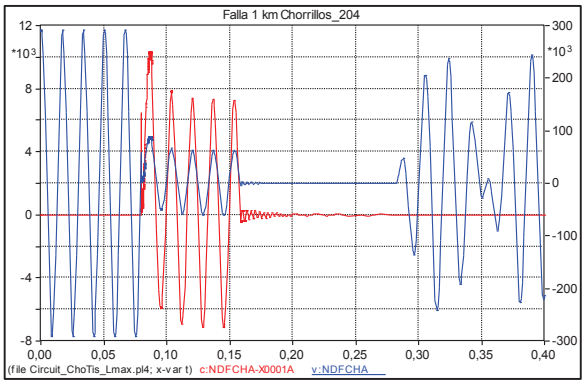



Figura 5.63. A

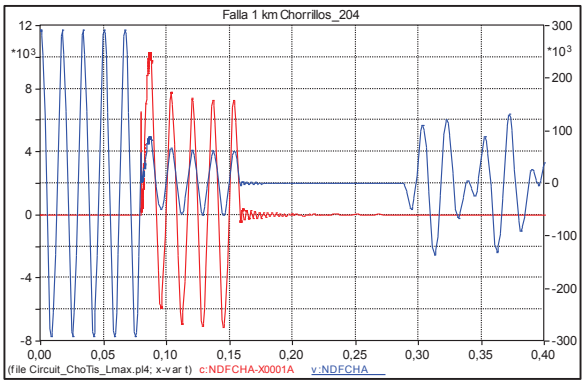



Figura 5.63. B

Figura 5.63. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Máxima Lluvioso

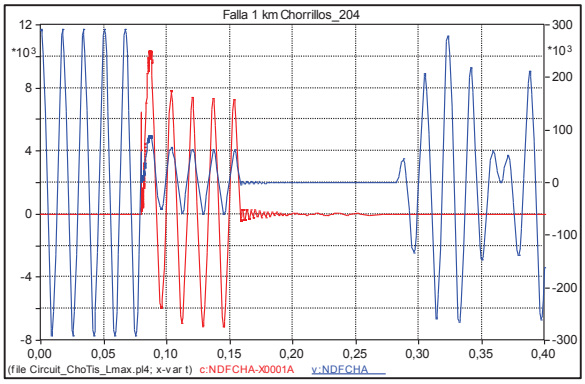



Figura 5.64. A

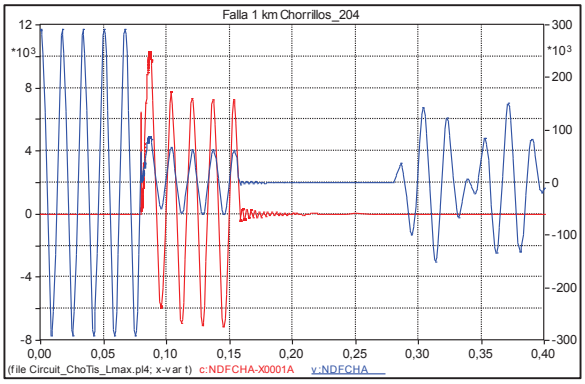



Figura 5.64. B

Figura 5.64. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Máxima Lluvioso

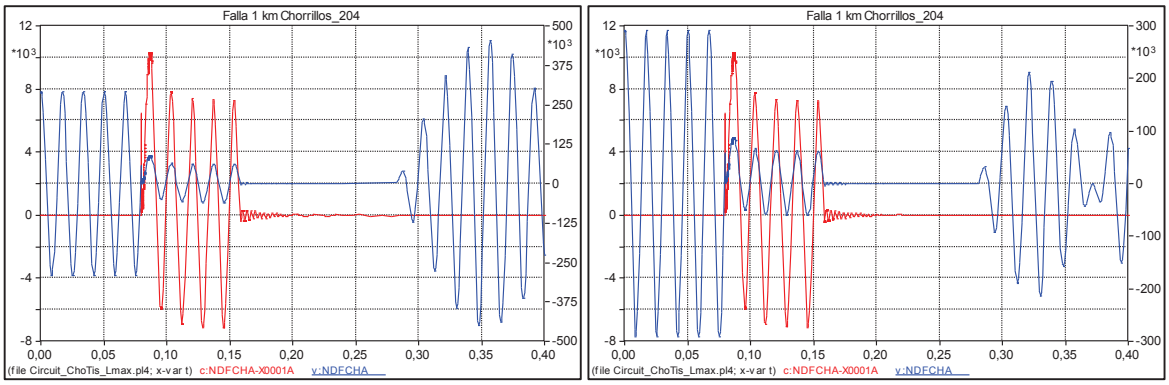



Figura 5.65. A Figura 5.65. B

Figura 5.65. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Máxima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.63 a 5.65, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.24, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.24. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Máxima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 61,34 | 61,87 | 62,88 | 43,7 | 44,63 | 47,41 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 132,97 | 128,96 | 117,28 | 97,23 | 94,65 | 85,801 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.23 y 5.24 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

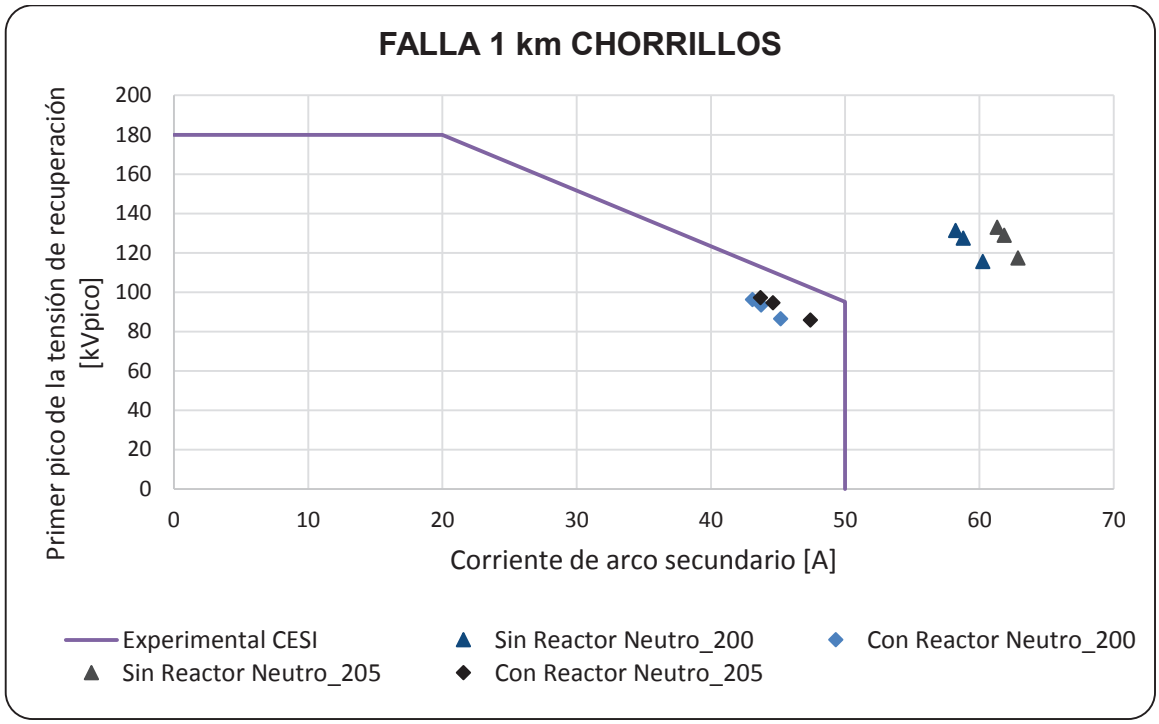



Figura 5.66. CESI 1 km Chorrillos, Máxima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.66 para falla monofásica a 1 km de la S/E Chorrillos, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.23 y 5.24 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.23 y 5.24 para compensación de 60%, 65,34% y 80% el rencendido del arco secundario sería neutralizado para sus longitudes de línea de 200 y 205 km.

***Falla Monofásica 1 km Tisaleo*** [Anexo E]**.**

*Para longitud 200 km, se obtuvo:*

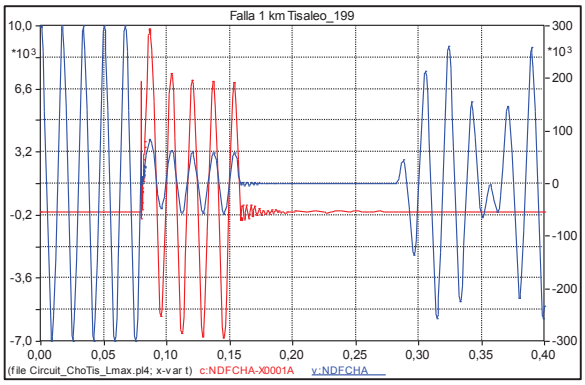



Figura 5.67. A

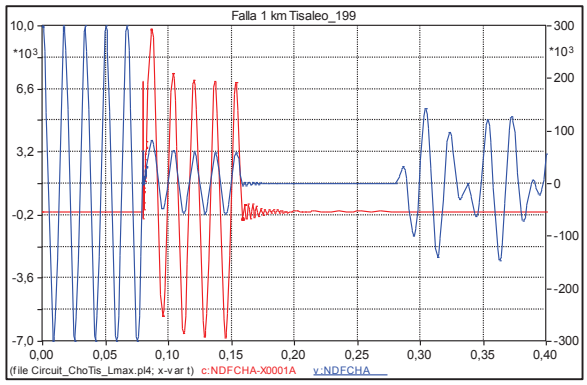



Figura 5.67. B

Figura 5.67. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Máxima Lluvioso

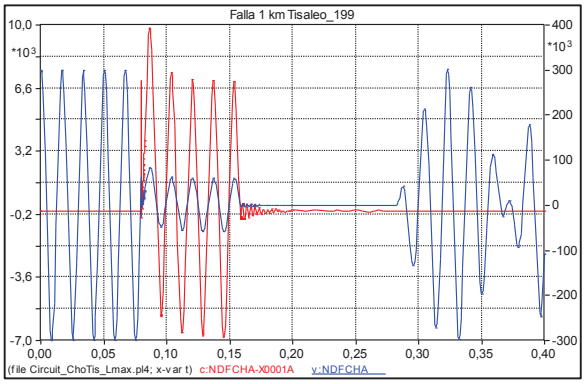



Figura 5.68. A

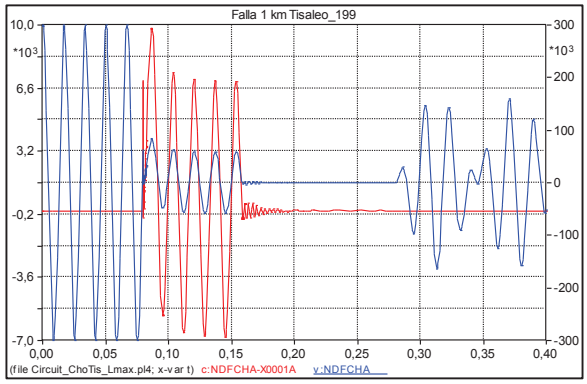



Figura 5.68. B

Figura 5.68. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Máxima Lluvioso

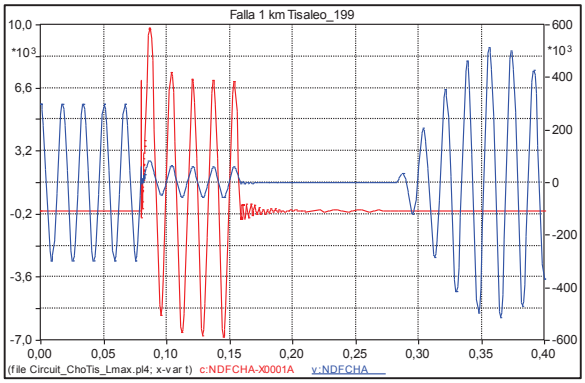



Figura 5.69. A

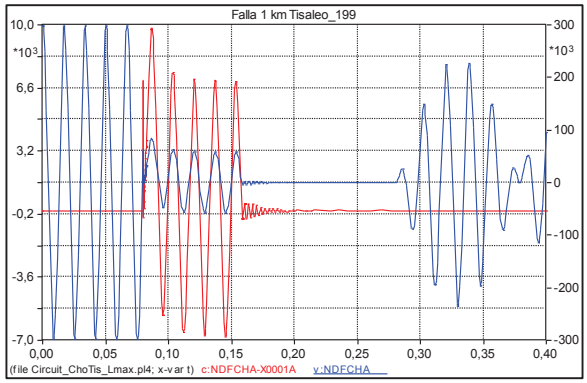



Figura 5.69. B

Figura 5.69. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Máxima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.67 a 5.69, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.25, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.25. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 53,48 | 54,1 | 56,25 | 38,54 | 39,44 | 41,82 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 131,31 | 127,76 | 116,46 | 108,66 | 96,082 | 88,751 |

*<u>Para longitud 205 km, se obtuvo:</u>*

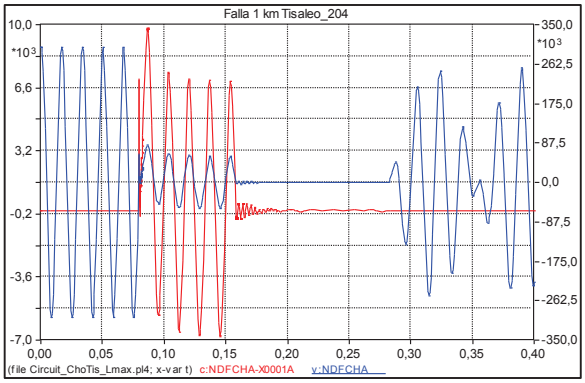



Figura 5.70. A

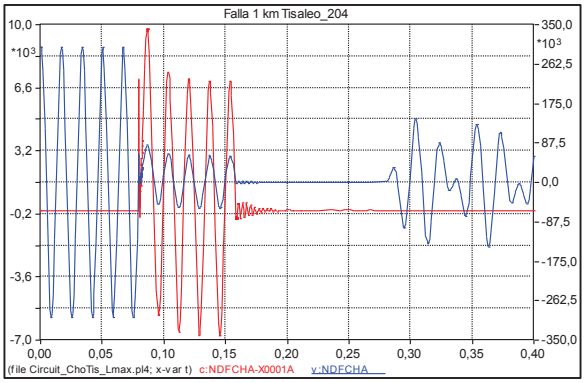



Figura 5.70. B

Figura 5.70. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Máxima Lluvioso

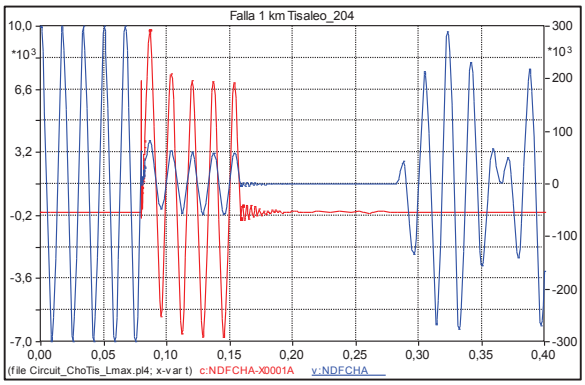



Figura 5.71. A

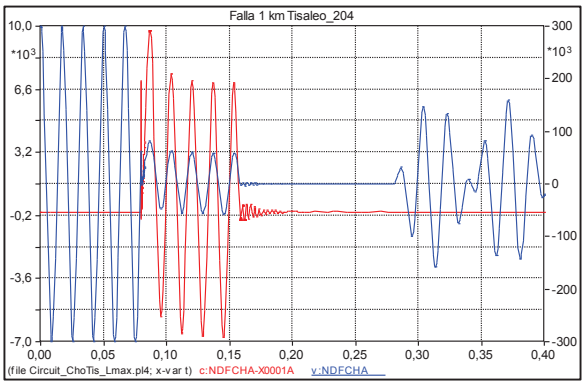



Figura 5.71. B

Figura 5.71. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Máxima Lluvioso

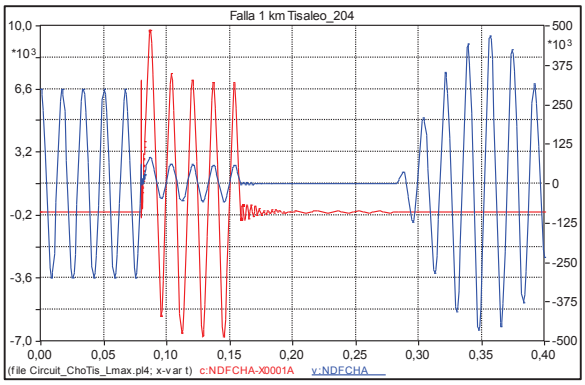



Figura 5.72. A

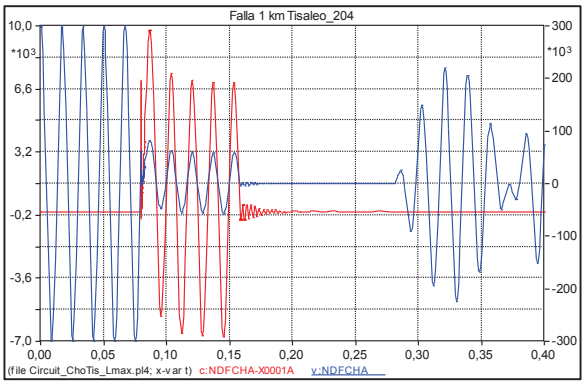



Figura 5.72. B

Figura 5.72. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Máxima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.70 a 5.72, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.26, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima lluvioso.

Tabla 5.26. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 57,21 | 58,025 | 60,2 | 39,6 | 40,32 | 42,31 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 133,11 | 129,53 | 118,06 | 108,6 | 101,63 | 89,59 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.25 y 5.26 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

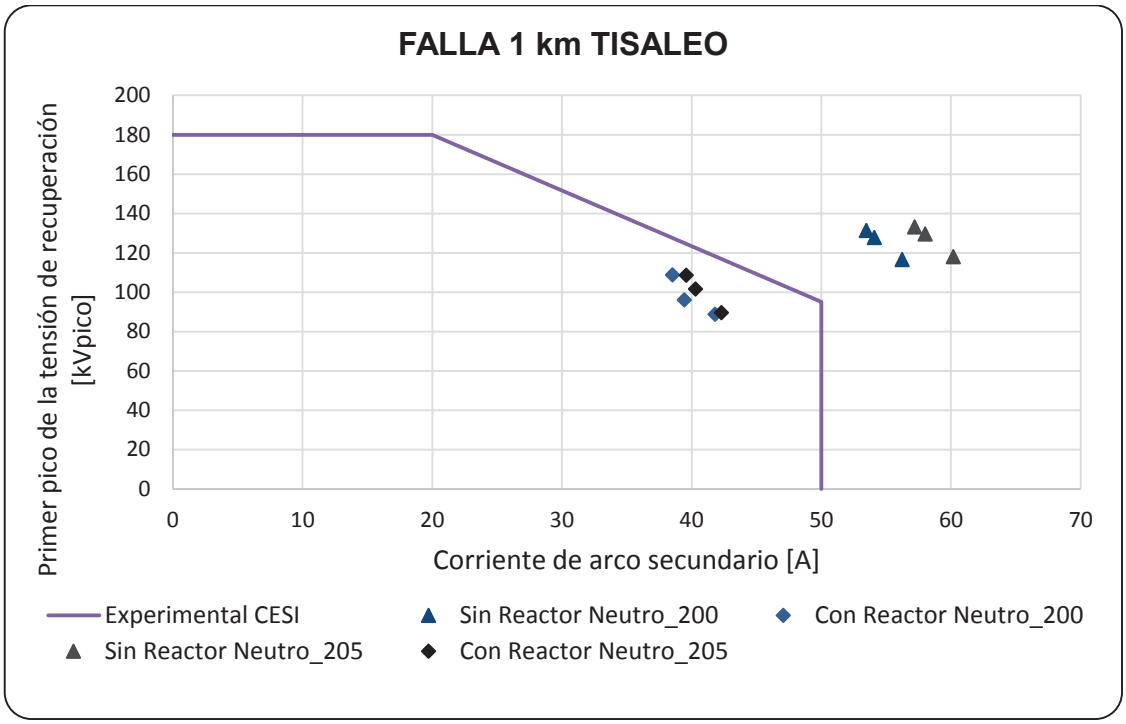



Figura 5.73. CESI 1 km Tisaleo, Máxima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.73 para falla monofásica a 1 km de la S/E Tisaleo, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.25 y 5.26 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.25 y 5.26 para compensación de 60%, 65,34% y 80% el rencendido del arco secundario sería neutralizado para sus longitudes de línea de 200 y 205 km.

### 5.10.2 ANÁLISIS EN MÁXIMA ESTIAJE

***Falla Monofásica 1 km Chorrillos.***

*Para longitud 200 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

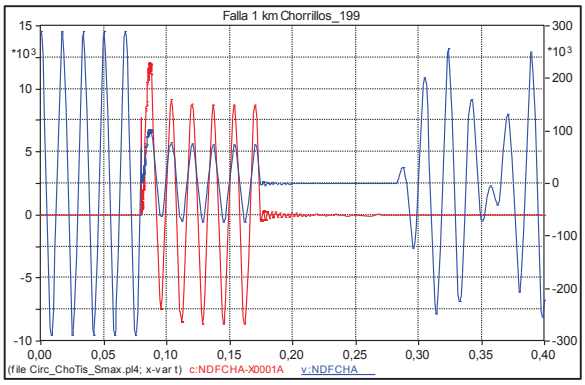



Figura 5.74. A

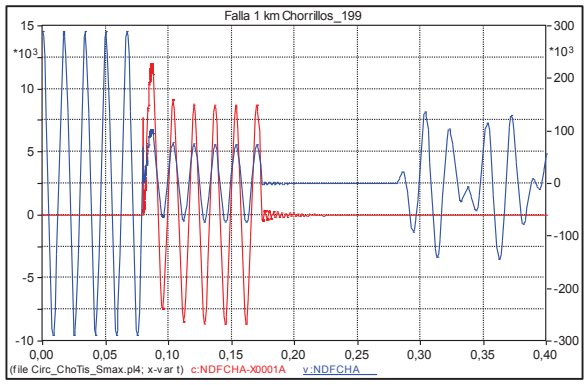



Figura 5.74. B

Figura 5.74. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Máxima Estiaje

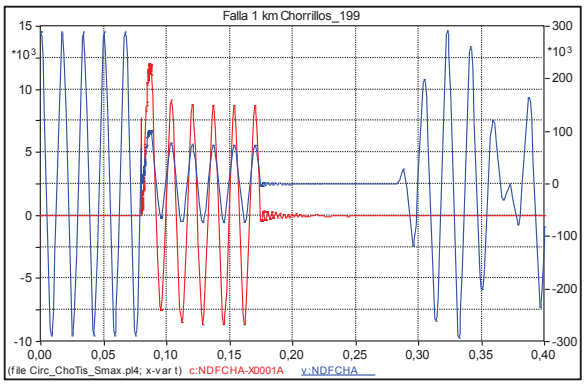



Figura 5.75. A

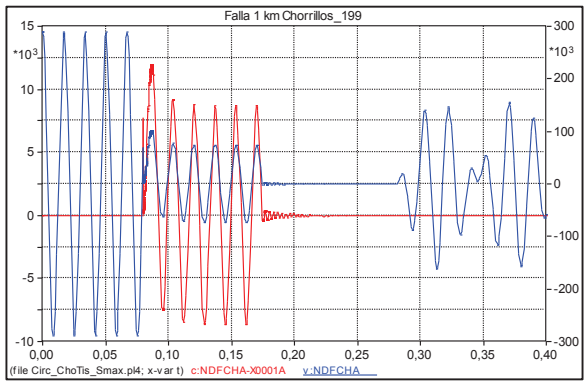



Figura 5.75. B

Figura 5.75. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos- Tisaleo 200 km, Máxima Estiaje

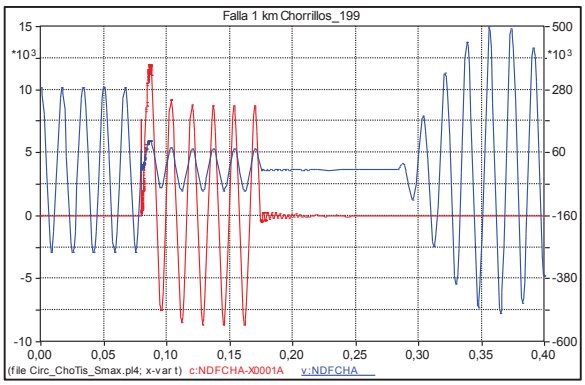



Figura 5.76. A

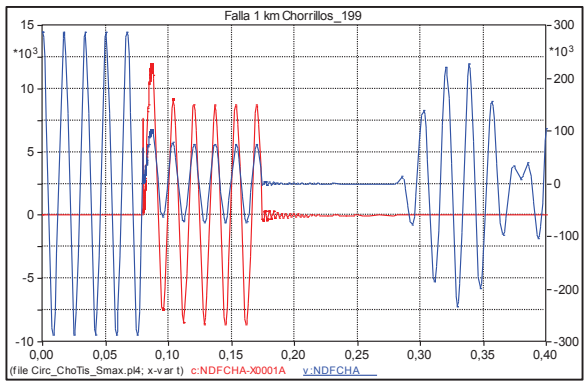



Figura 5.76. B

Figura 5.76. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Máxima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.74 a 5.76, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.27, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.27. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Máxima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 61,05 | 61,6 | 62,86 | 44,61 | 45,47 | 47,41 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 134,54 | 130,32 | 117,92 | 98,845 | 95,982 | 86,505 |

*Para longitud 205 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

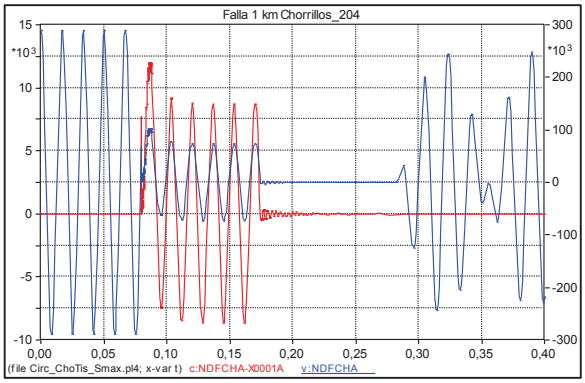



Figura 5.77. A

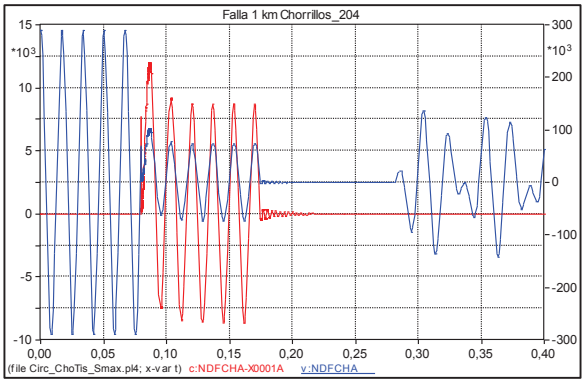



Figura 5.77. B

Figura 5.77. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Máxima Estiaje

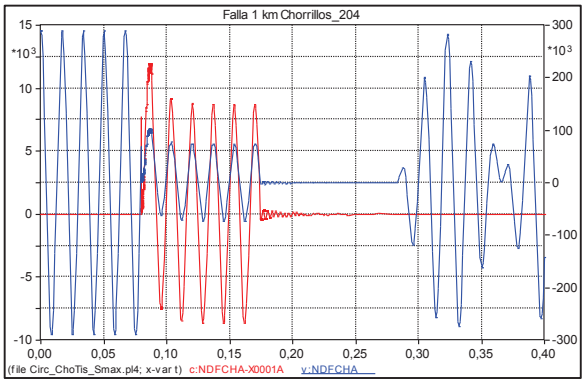



Figura 5.78. A

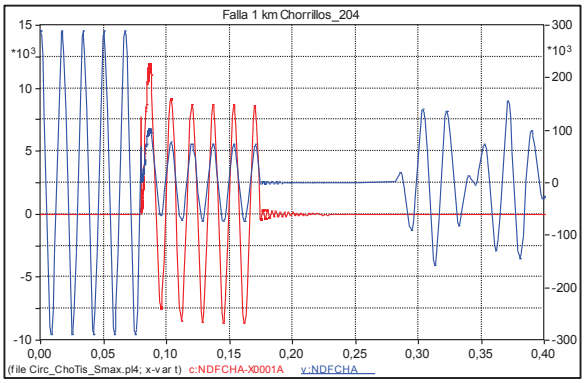



Figura 5.78. B

Figura 5.78. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos- Tisaleo 205 km, Máxima Estiaje

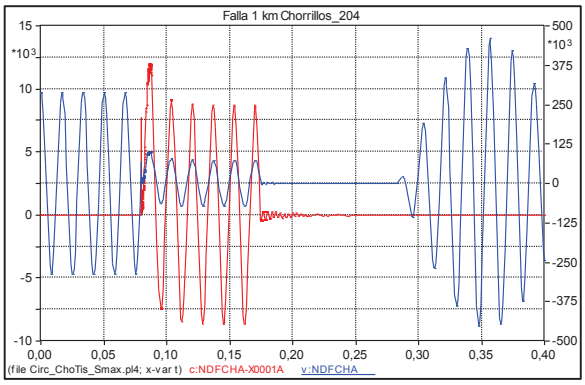



Figura 5.79. A

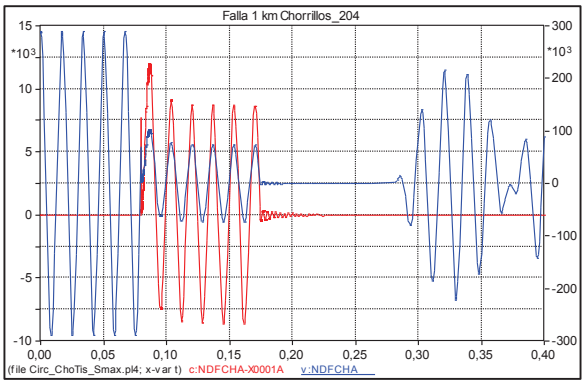



Figura 5.79. B

Figura 5.79. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Máxima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.77 a 5.79, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.28, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.28. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Máxima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 62,7 | 63,195 | 64,23 | 45,17 | 45,97 | 47,85 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 136,09 | 131,85 | 119,6 | 100,24 | 97,45 | 87,94 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.27 y 5.28 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

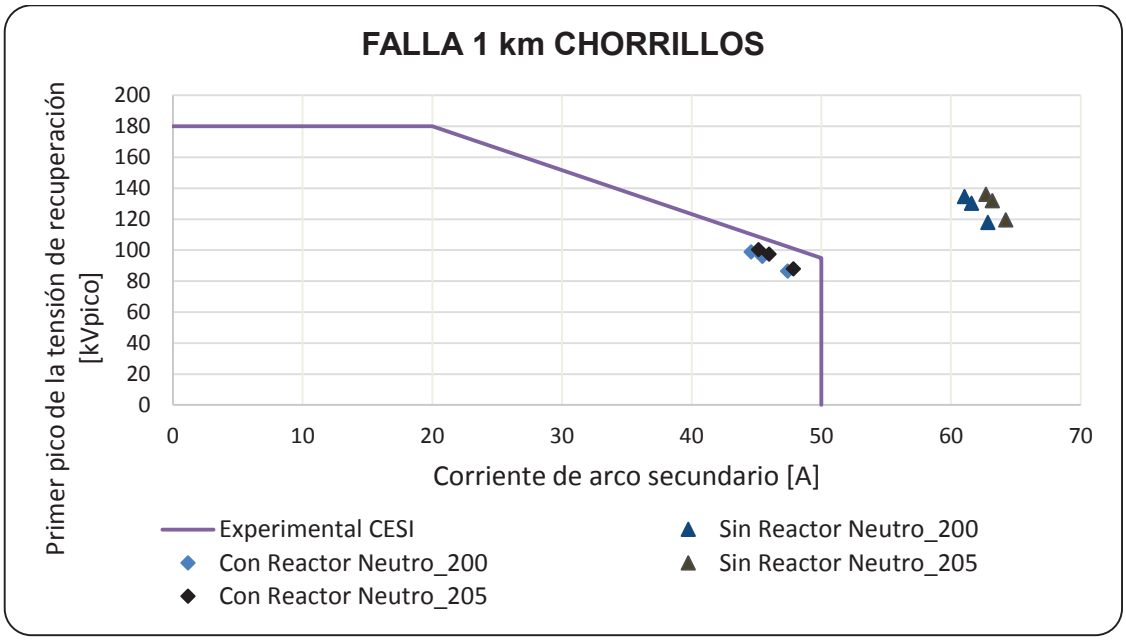



Figura 5.80. CESI 1 km Chorrillos, Máxima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.80 para falla monofásica a 1 km de la S/E Chorrillos, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.27 y 5.28 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.27 y 5.28 para compensación de 60%, 65,34% y 80% el rencendido del arco secundario sería neutralizado tanto para 200 y 205 km de longitud de línea.

## ***Falla Monofásica 1 km Tisaleo.***

*Para longitud 200 km, se obtuvo:*

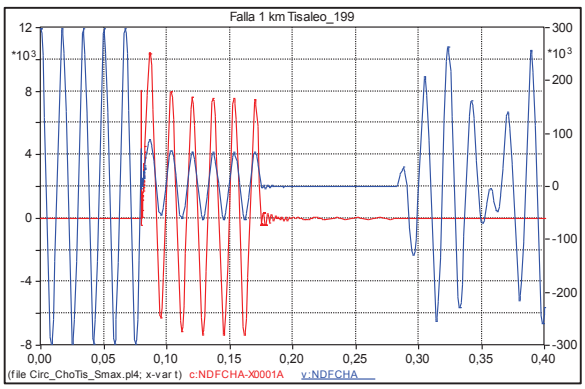



Figura 5.81. A

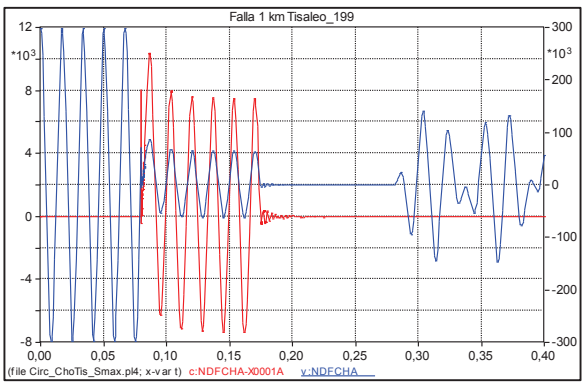



Figura 5.81. B

Figura 5.81. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Máxima Estiaje

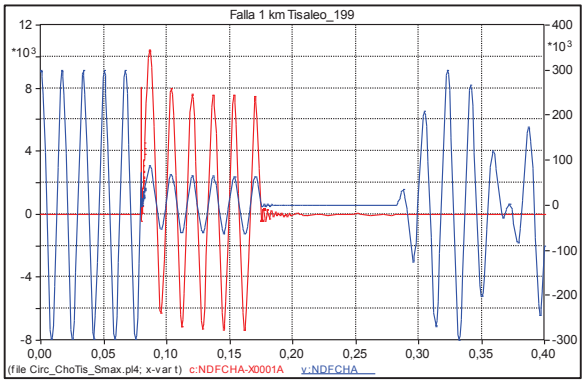



Figura 5.82. A

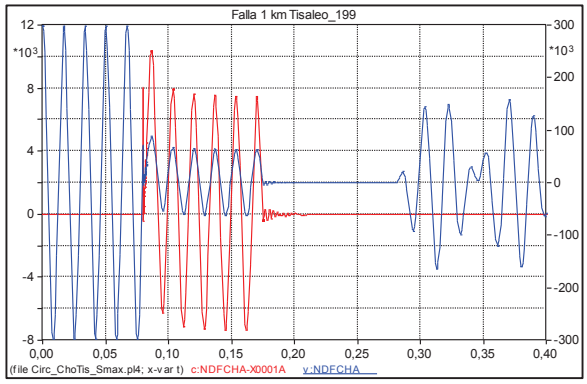



Figura 5.82. B

Figura 5.82. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Máxima Estiaje

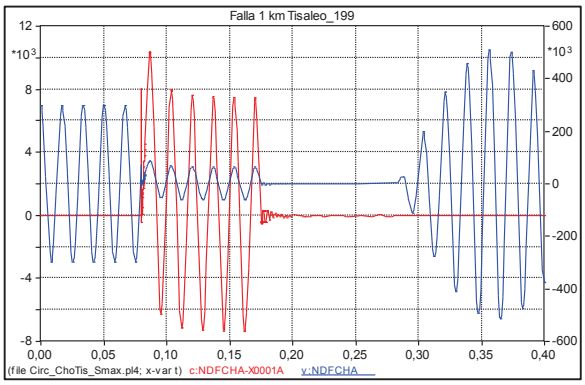



Figura 5.83. A

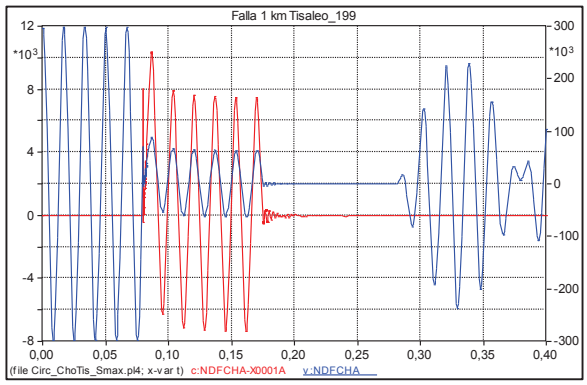



Figura 5.83. B

Figura 5.83. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Máxima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.81 a 5.83, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.29, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.29. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 61,6 | 62,32 | 63,97 | 45,07 | 46,066 | 48,48 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 131 | 126,9 | 114,88 | 94,56 | 91,829 | 82,596 |

*Para longitud 205 km, se obtuvo:*

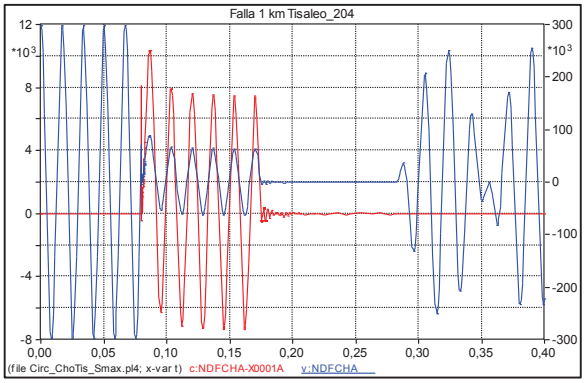



Figura 5.84. A

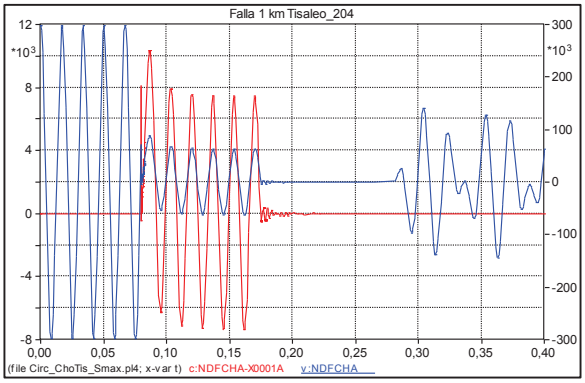



Figura 5.84. B

Figura 5.84. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Máxima Estiaje

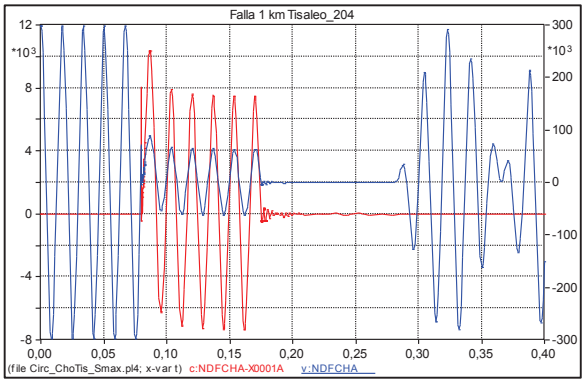



Figura 5.85. A

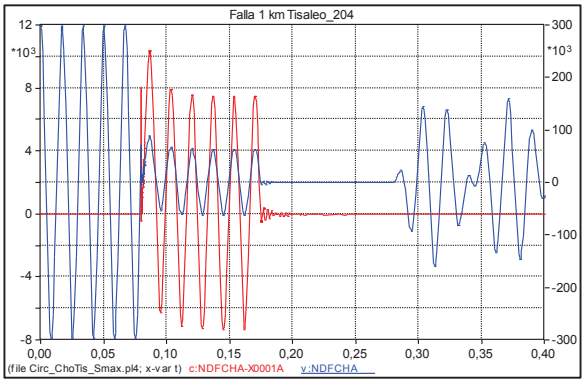



Figura 5.85. B

Figura 5.85. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Máxima Estiaje

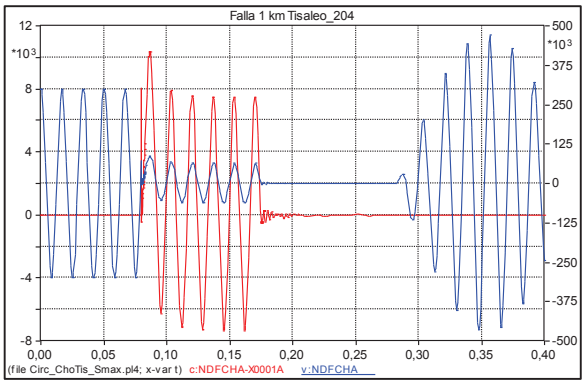



Figura 5.86. A

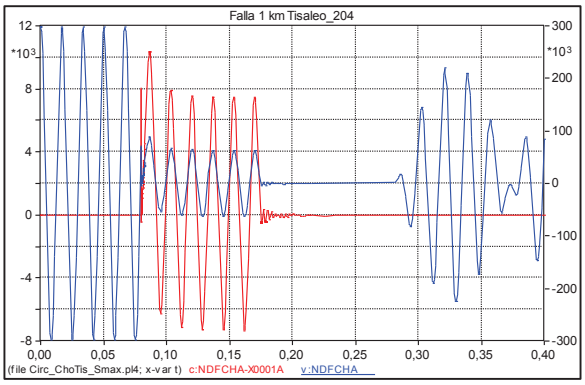



Figura 5.86. B

Figura 5.86. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Máxima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.84 a 5.86, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.30, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación máxima estiaje.

Tabla 5.30. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Máxima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Tiempo de apertura:** 120 ms | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 62,11 | 62,717 | 64,066 | 45,21 | 46,191 | 48,59 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 132,88 | 128,73 | 116,73 | 95,633 | 92,964 | 83,983 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.29 y 5.30 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

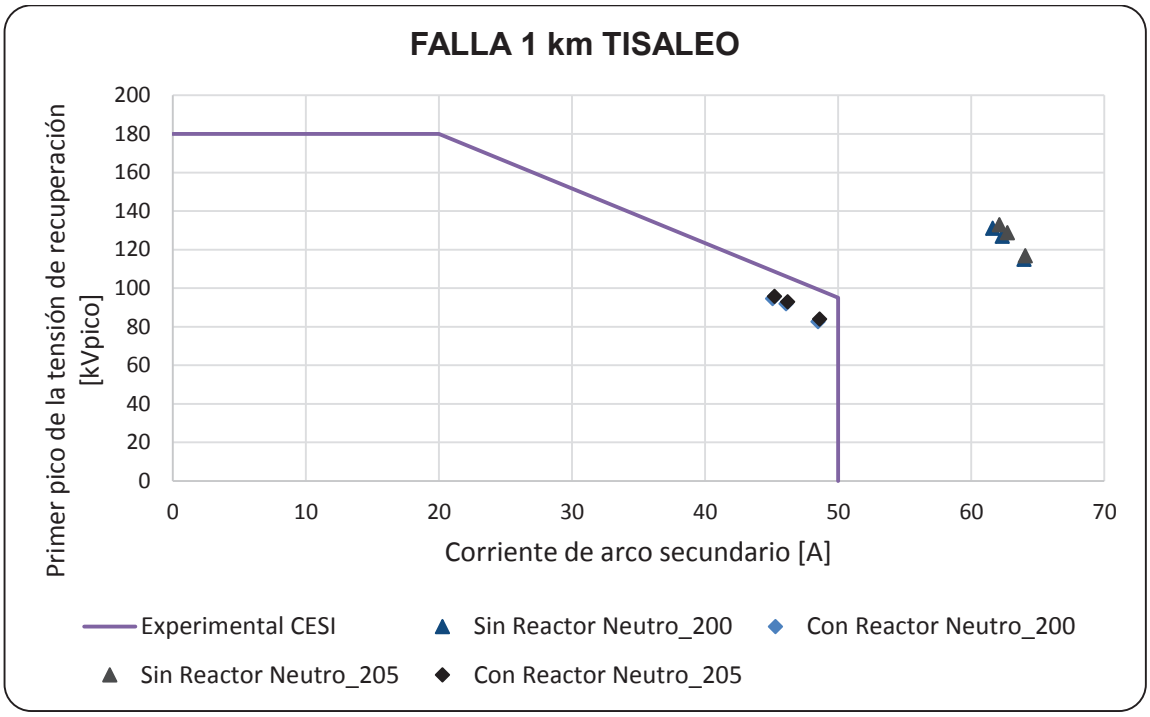



Figura 5.87. CESI 1 km Tisaleo, Máxima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.87 para falla monofásica a 1 km de la S/E Tisaleo, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.29 y 5.30 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.29 y 5.30 para compensación de 60%, 65,34% y 80% el rencendido del arco secundario sería neutralizado tanto para 200 y 205 km de longitud de línea.

### 5.10.3 ANÁLISIS EN MÍNIMA LLUVIOSO

***Falla Monofásica 1 km Chorrillos.***

*Para longitud 200 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

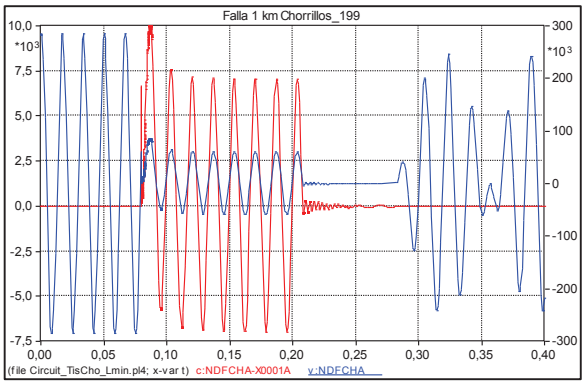



Figura 5.88. A

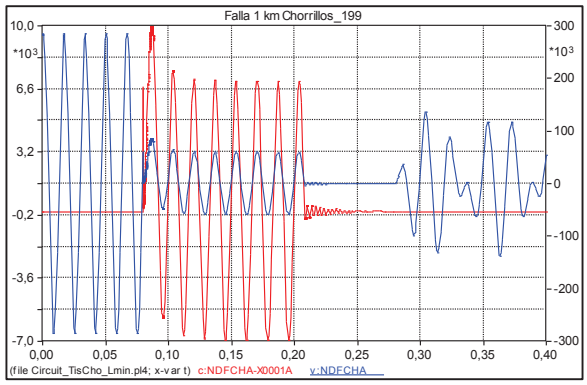



Figura 5.88. B

Figura 5.88. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Mínima Lluvioso

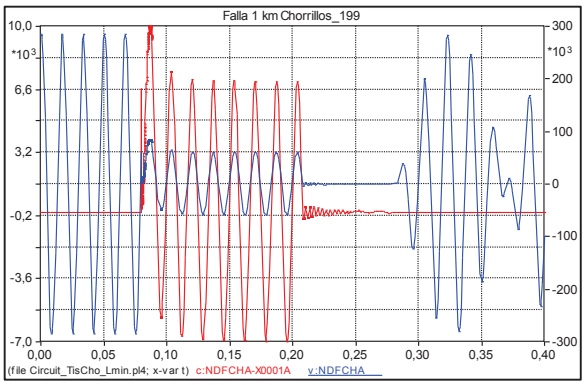



Figura 5.89. A

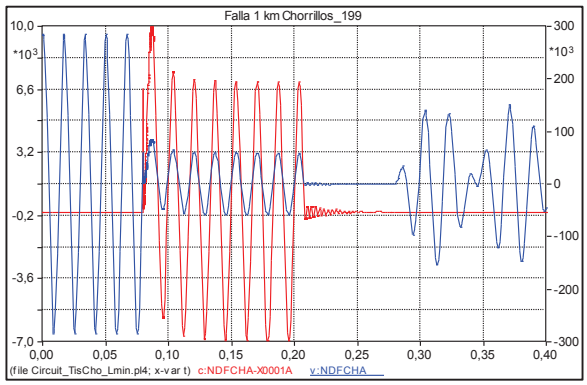



Figura 5.89. B

Figura 5.89. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos- Tisaleo 200 km, Mínima Lluvioso

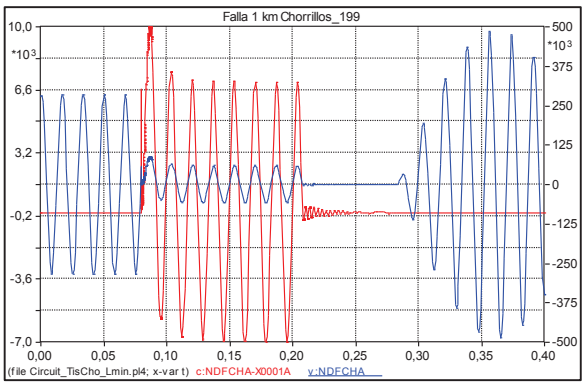



Figura 5.90. A

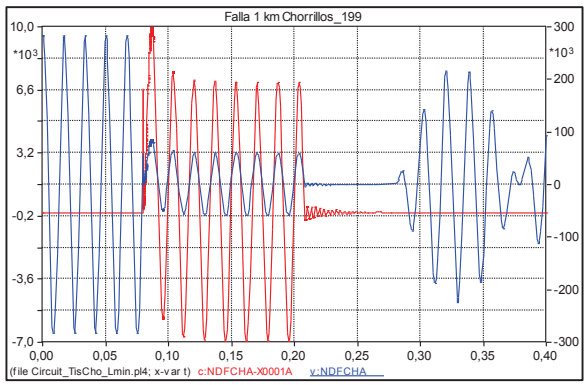



Figura 5.90. B

Figura 5.90. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Mínima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.88 a 5.90, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.31, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.31. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Mínima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 67,24 | 68,7 | 72,43 | 47,324 | 48,67 | 52,492 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 125,88 | 120,96 | 106,62 | 91,872 | 88,111 | 78,99 |

*Para longitud 205 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

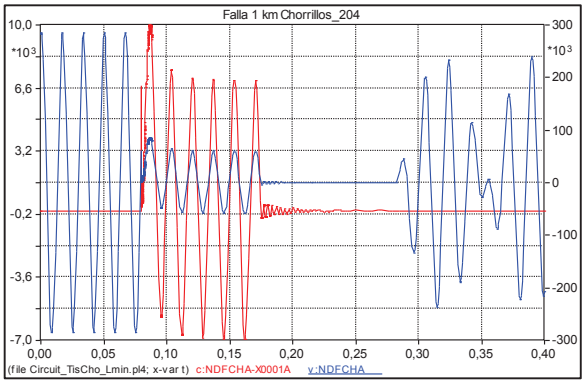



Figura 5.91. A

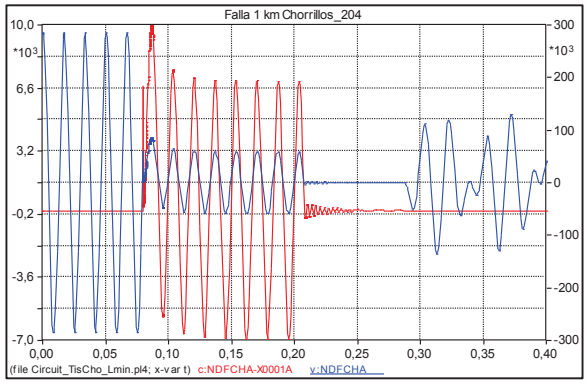



Figura 5.91. B

Figura 5.91. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Mínima Lluvioso

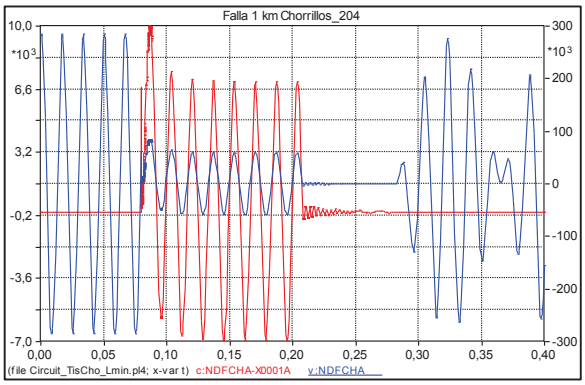



Figura 5.92. A

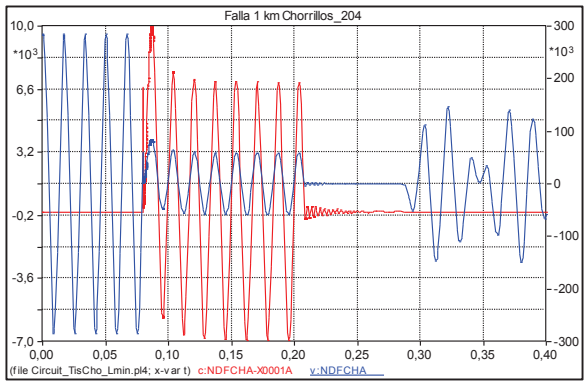



Figura 5.92. B

Figura 5.92. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos- Tisaleo 205 km, Mínima Lluvioso

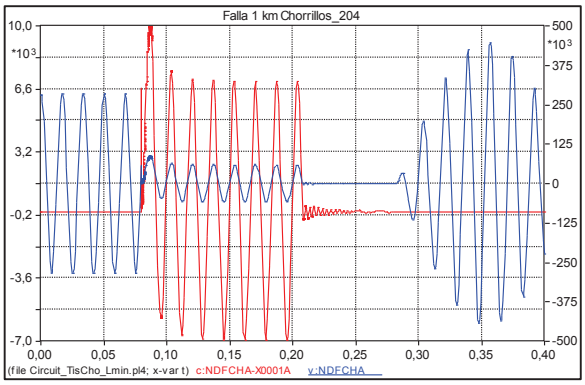



Figura 5.93. A

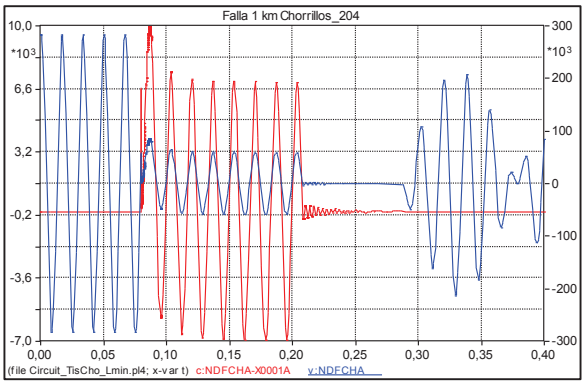



Figura 5.93. B

Figura 5.93. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Mínima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.91 a 5.93, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.32, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.32. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Mínima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 70,11 | 71,38 | 74,66 | 49,84 | 51,322 | 55,01 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 126,47 | 121,65 | 108,32 | 93,977 | 90,117 | 79,042 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.31 y 5.32 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

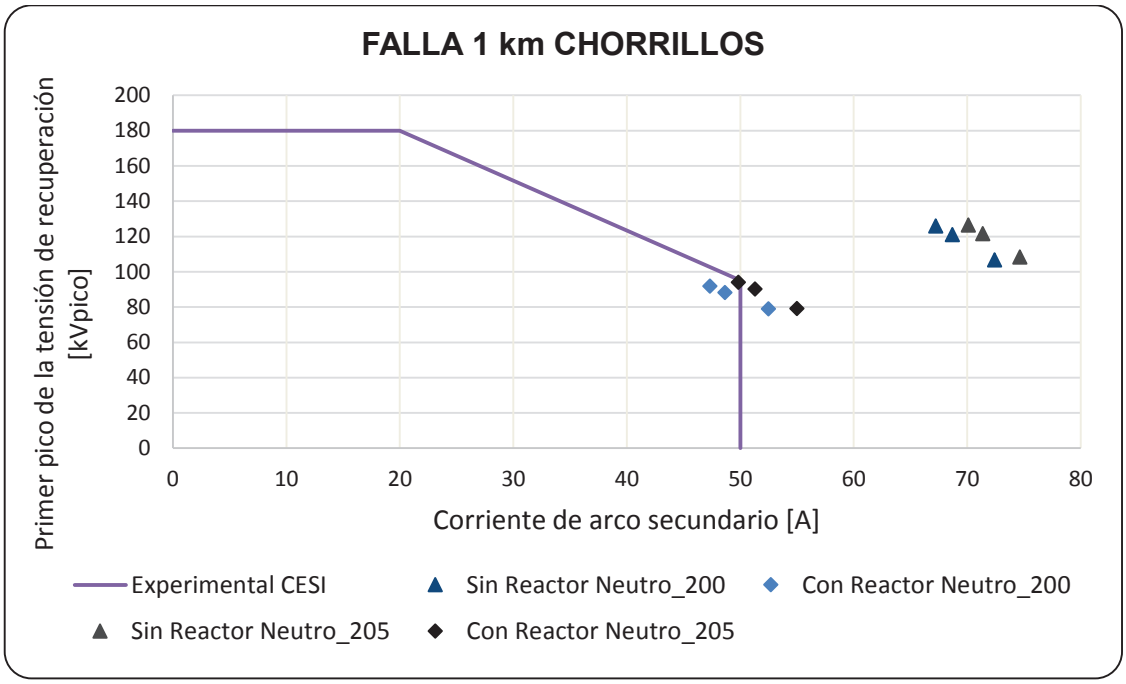



Figura 5.94. CESI 1 km Chorrillos, Mínima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.94 para falla monofásica a 1 km de la S/E Chorrillos, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.31 y 5.32 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.31 y 5.32 para compensación de 60% el rencendido del arco secundario sería neutralizado tanto para 200 y 205 km de longitud de línea, para 65,34% de compensación el arco secundario sería neutralizado para 200 km de longitud pero para 205 km no será posible la neutralización debido a que al tener un valor de 51,32 A de corriente de arco secundario estaría fuera de la zona de neutralización, en cambio para 80% de compensación el rencendido del arco secundario no será neutralizado porque se presenta valores de corriente de arco secundario de 52,5 A para 200 km y de 55 A para 205 km de longitud fuera de la zona de neutralización que, para corriente de arco secundario, su límite máximo es de 50 A.

***Falla Monofásica 1 km Tisaleo.***

*Para longitud 200 km, se obtuvo:*

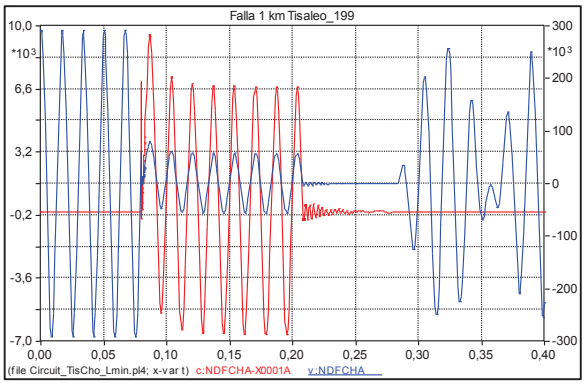



Figura 5.95. A

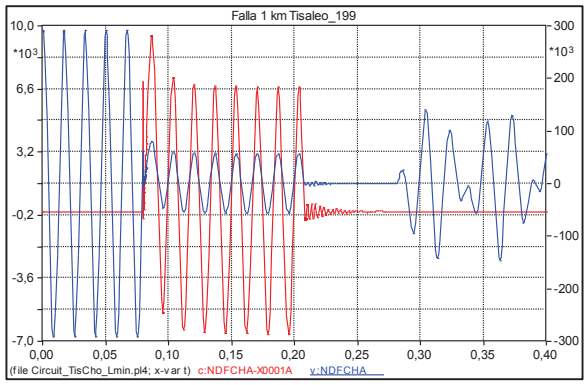



Figura 5.95. B

Figura 5.95. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Mínima Lluvioso

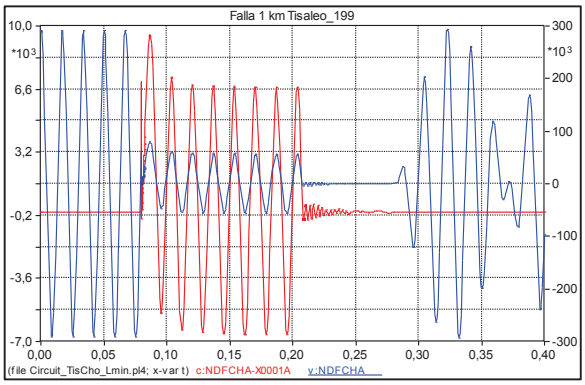



Figura 5.96. A

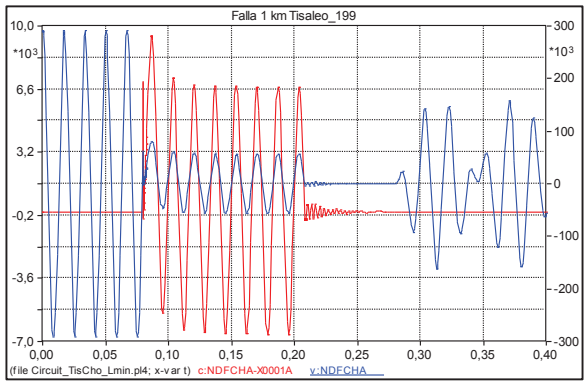



Figura 5.96. B

Figura 5.96. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Mínima Lluvioso

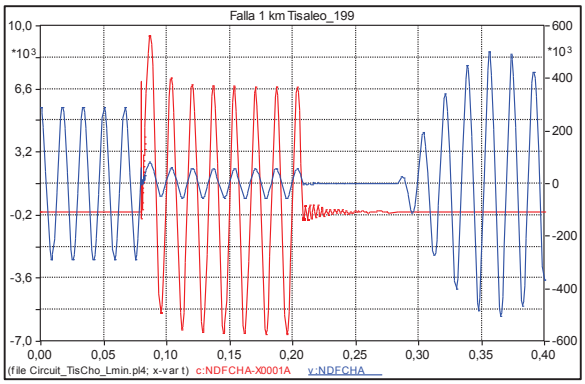



Figura 5.97. A

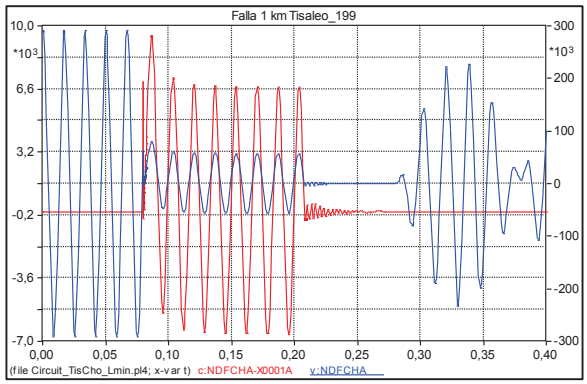



Figura 5.97. B

Figura 5.97. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Mínima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.95 a 5.97, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.33, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaelo y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.33. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 55,68 | 56,59 | 59,03 | 40,11 | 41,1 | 43,48 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 133,99 | 130,34 | 118,65 | 111,79 | 97,8 | 90,234 |

*Para longitud 205 km, se obtuvo:*

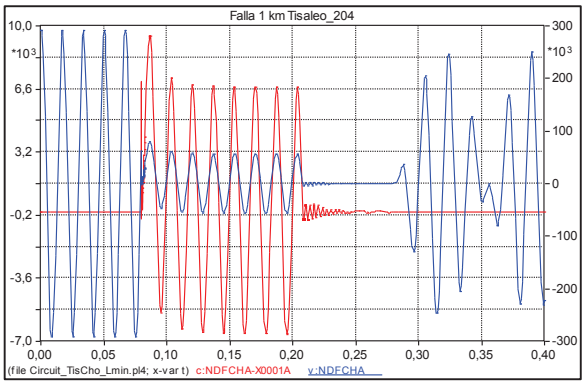



Figura 5.98. A

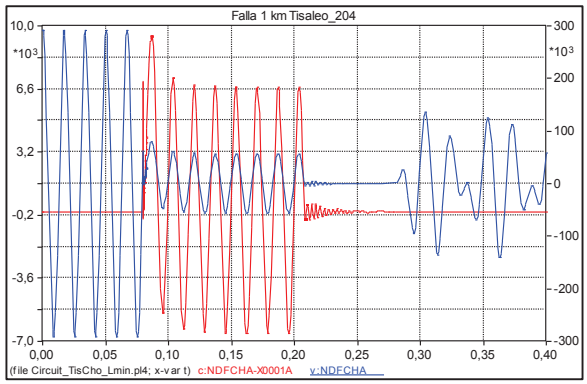



Figura 5.98. B

Figura 5.98. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Mínima Lluvioso

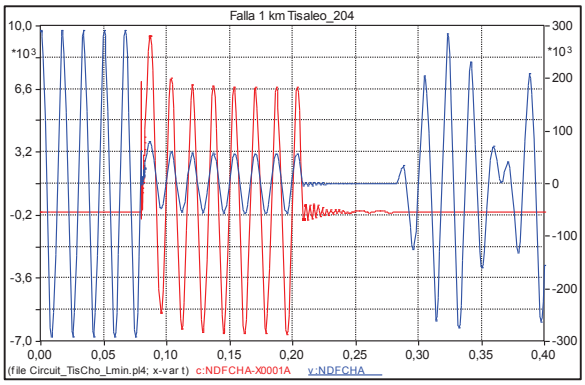



Figura 5.99. A

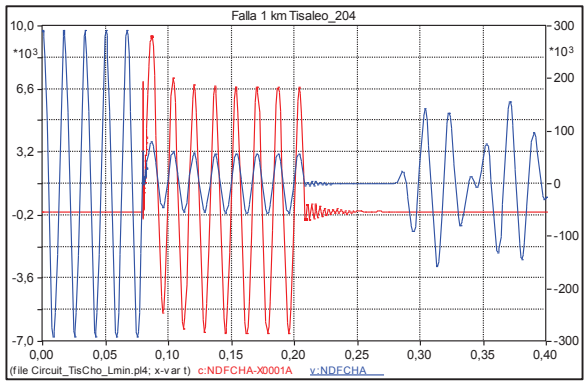



Figura 5.99. B

Figura 5.99. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Mínima Lluvioso

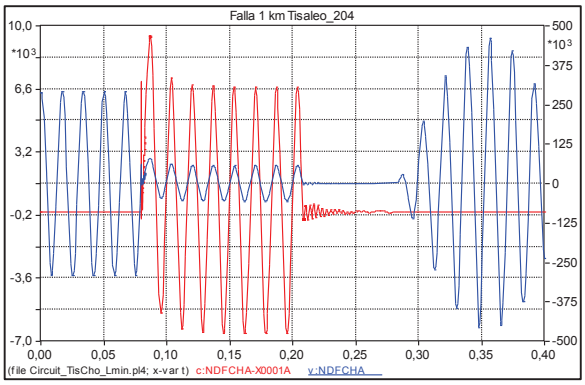



Figura 5.100. A

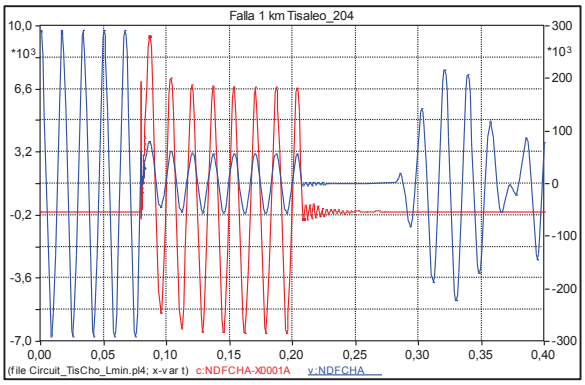



Figura 5.100. B

Figura 5.100. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Mínima Lluvioso

Como se observa en las figuras 5.98 a 5.100, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.34, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación mínima lluvioso.

Tabla 5.34. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Lluvioso, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 59,519 | 60,35 | 62,56 | 40,39 | 41,38 | 44,23 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 135,67 | 132 | 120,25 | 111,6 | 98,603 | 91,107 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.33 y 5.34 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

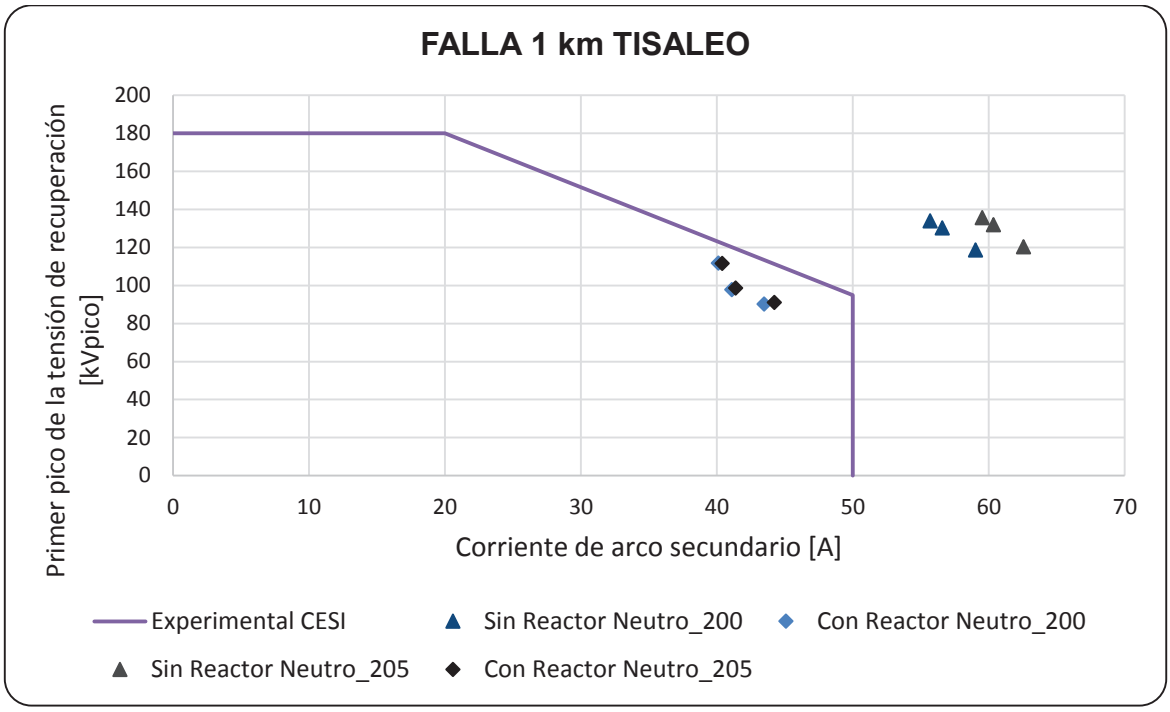



Figura 5.101. CESI 1 km Tisaleo, Mínima Lluviosa, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.101 para falla monofásica a 1 km de la S/E Tisaleo, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.33 y 5.34 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.33 y 5.34 para compensación de 60%, 65,34% y 80% el rencendido del arco secundario sería neutralizado tanto para 200 y 205 km de longitud de línea.

### 5.10.4 ANÁLISIS EN MÍNIMA ESTIAJE

***Falla Monofásica 1 km Chorrillos.***

*Para longitud 200 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

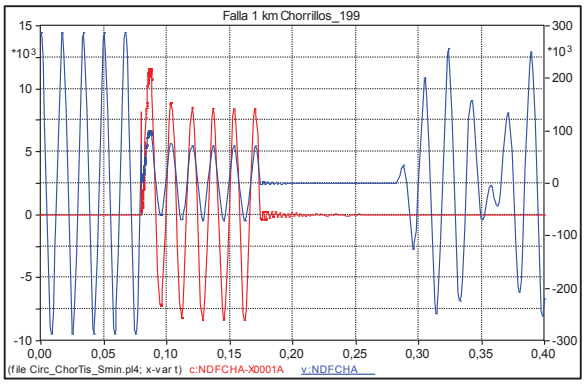



Figura 5.102. A

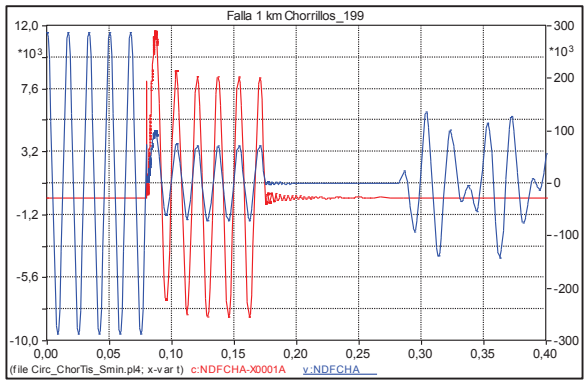



Figura 5.102. B

Figura 5.102. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Mínima Estiaje

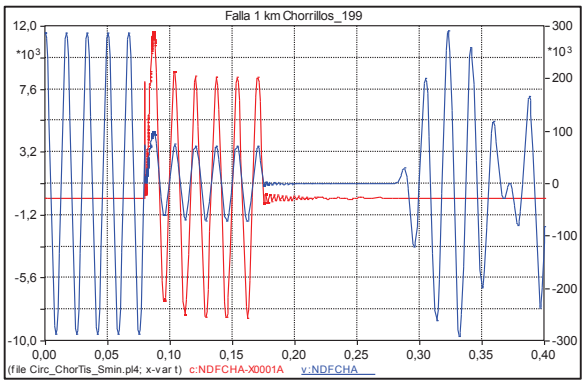



Figura 5.103. A

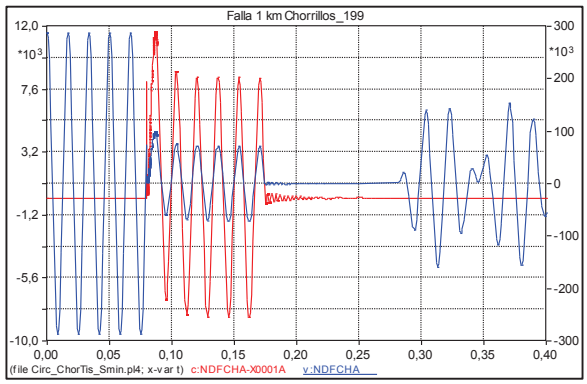



Figura 5.103. B

Figura 5.103. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos- Tisaleo 200 km, Mínima Estiaje

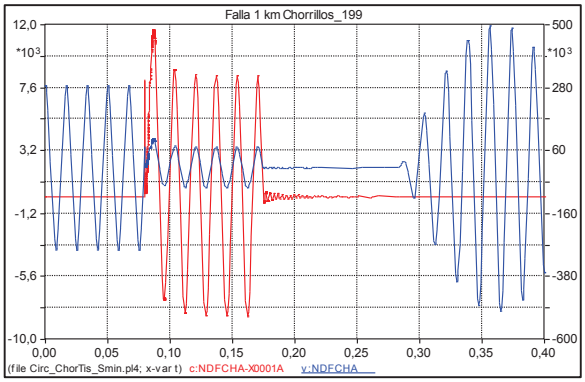



Figura 5.104. A

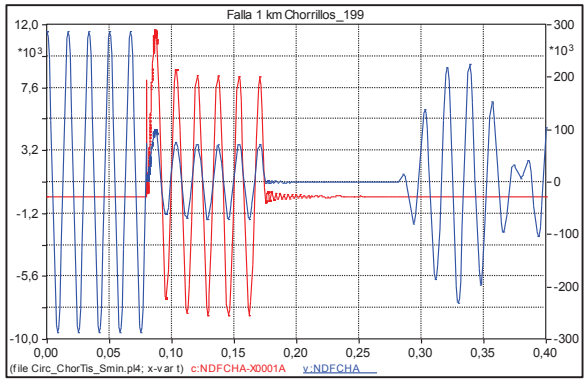



Figura 5.104. B

Figura 5.104. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 200 km, Mínima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.102 a 5.104, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.35, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.35. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Mínima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 68,604 | 70,096 | 73,936 | 48,024 | 49,28 | 53,135 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 123,66 | 118,59 | 104,54 | 92,15 | 88,704 | 77,781 |

*Para longitud 205 km, se obtuvo los siguientes resultados:*

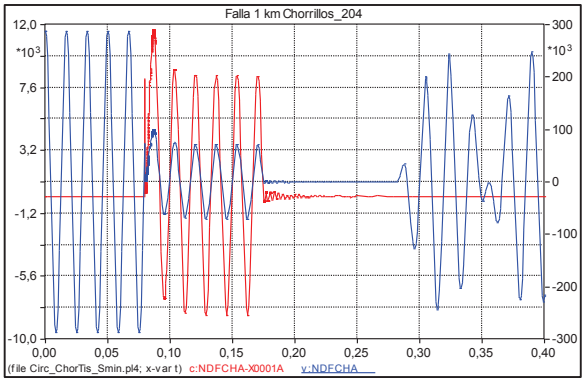



Figura 5.105. A

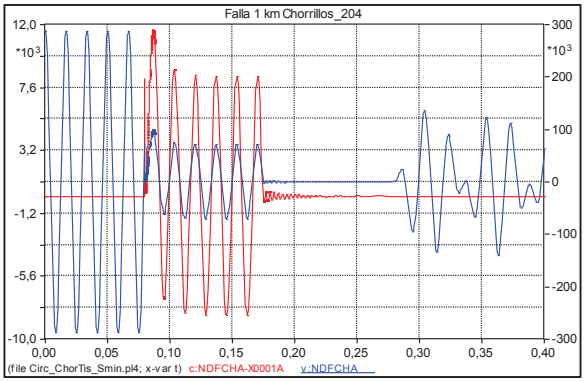



Figura 5.105. B

Figura 5.105. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Mínima Estiaje

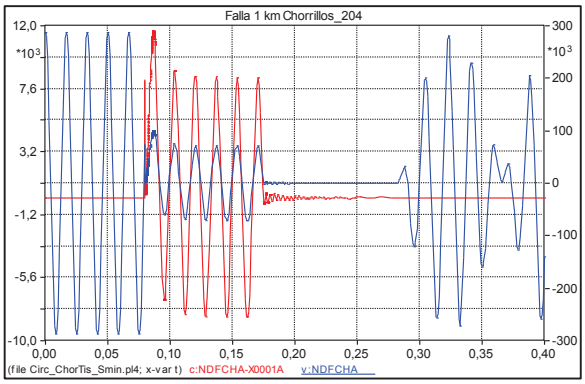



Figura 5.106. A

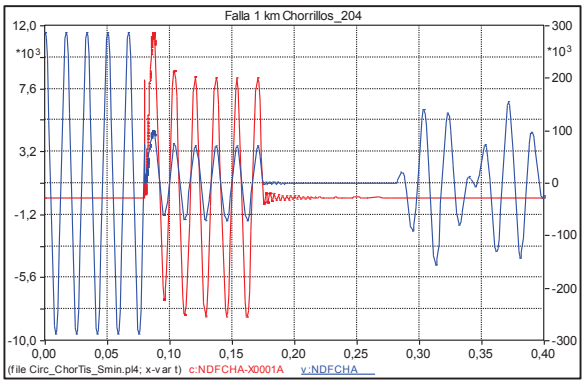



Figura 5.106. B

Figura 5.106. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos- Tisaleo 205 km, Mínima Estiaje

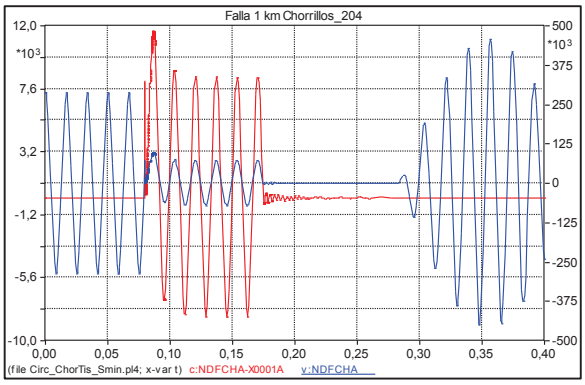



Figura 5.107. A

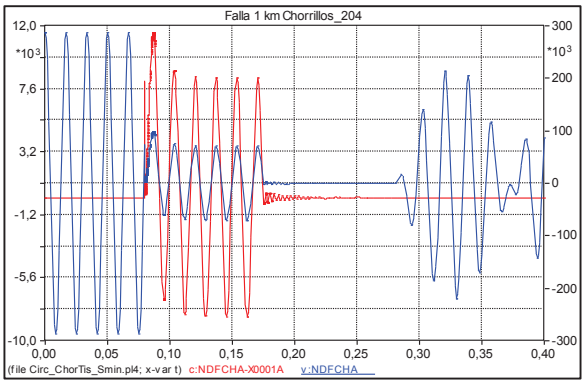



Figura 5.107. B

Figura 5.107. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Chorrillos-Tisaleo 205 km, Mínima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.105 a 5.107, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.36, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Chorrillos y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.36. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Chorrillos, Mínima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 70,443 | 71,782 | 75,203 | 50,04 | 51,41 | 55,132 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 124,23 | 119,25 | 107 | 94,606 | 90,963 | 80,573 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.35 y 5.36 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

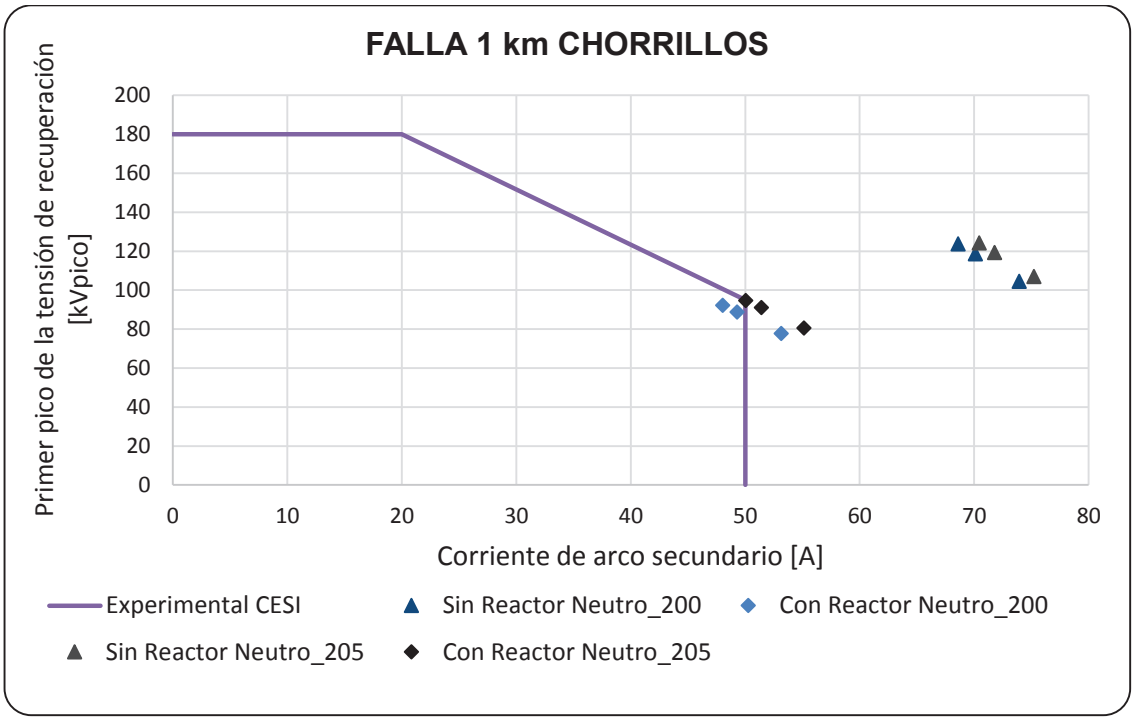



Figura 5.108. CESI 1 km Chorrillos, Mínima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.108 para falla monofásica a 1 km de la S/E Chorrillos, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.35 y 5.36 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.35 y 5.36 para compensación de 60% y 65,34% el rencendido del arco secundario sería neutralizado solo para 200 km de longitud de línea pero no será neutralizado para 205 km de longitud con 60% y 65.34% de compensación ya que se tiene valores de corriente de arco secundario de 50 A y 51 A respectivamente los cuales superan el límite máximo de corriente de arco secundario de 50 A; en cambio para 80% de compensación el rencendido del arco secundario no será neutralizado porque se presenta valores de corriente de arco secundario de 53,1 A para 200 km y de 55,1 A para 205 km de longitud los cuales están fuera de la zona de neutralización.

***Falla Monofásica 1 km Tisaleo.***

*Para longitud 200 km, se obtuvo:*

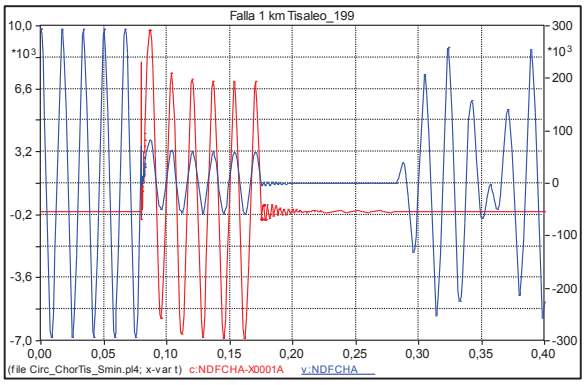



Figura 5.109. A

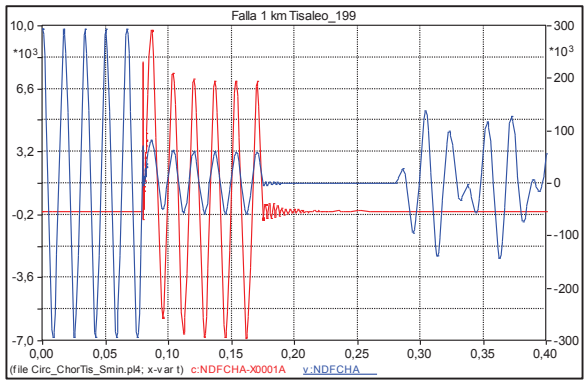



Figura 5.109. B

Figura 5.109. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Mínima Estiaje

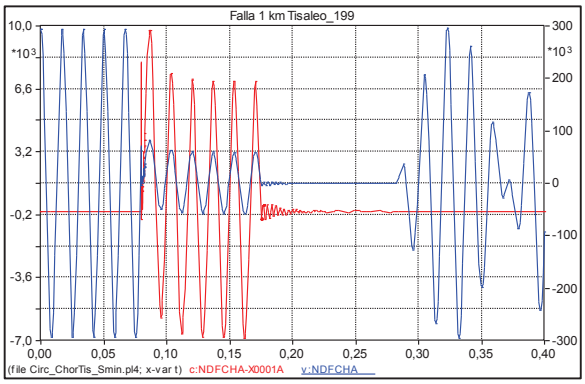



Figura 5.110. A

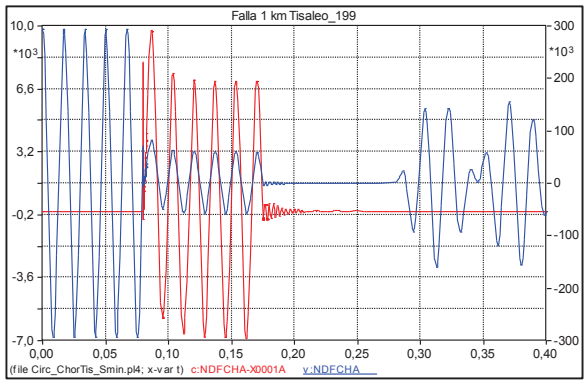



Figura 5.110. B

Figura 5.110. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Mínima Estiaje

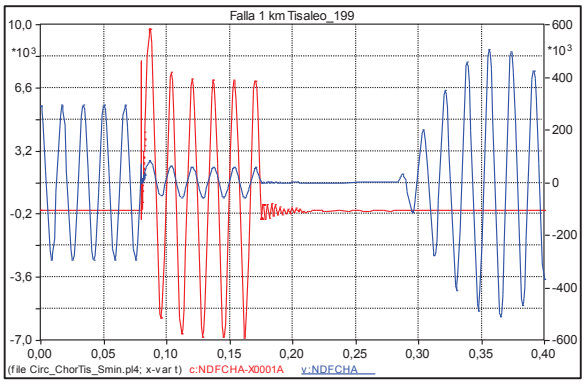



Figura 5.111. A

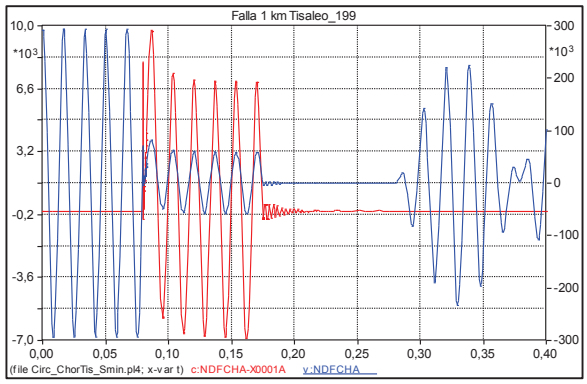



Figura 5.111. B

Figura 5.111. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km, Mínima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.109 a 5.111, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.37, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 200 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.37. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 200 km.

| Variables | % Compensación Sin Reactor Neutro | | | % Compensación Con Reactor Neutro | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 63,81 | 64,48 | 65,993 | 46,947 | 48,06 | 50,681 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 130,4 | 125,79 | 112,66 | 95,116 | 91,83 | 81,403 |

*Para longitud 205 km, se obtuvo:*

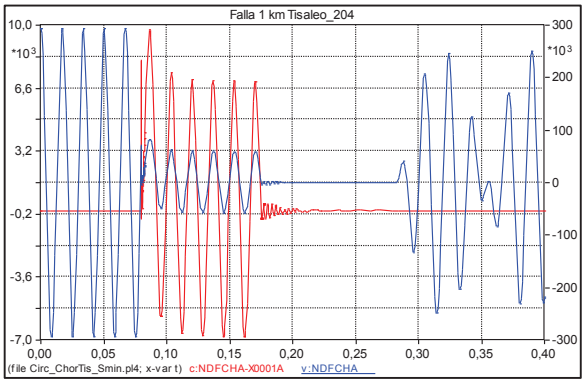



Figura 5.112. A

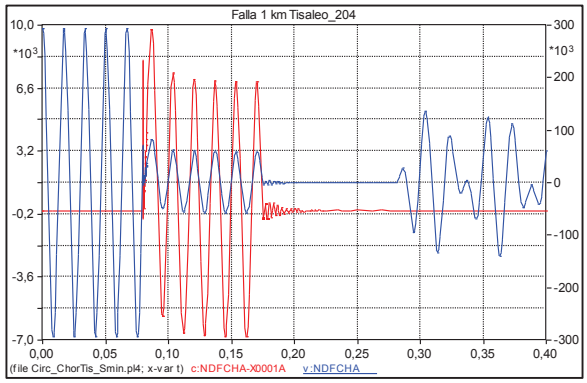



Figura 5.112. B

Figura 5.112. A. 60% Compensación Sin $R_N$. B. 60% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Mínima Estiaje

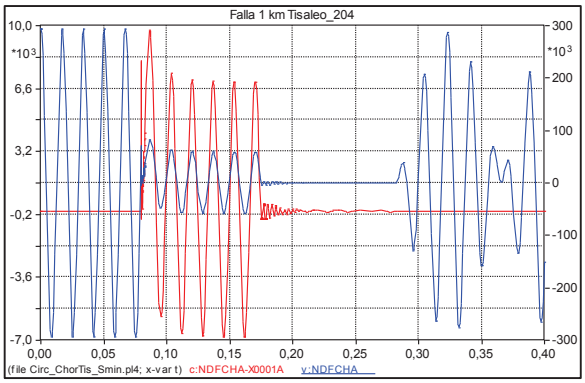



Figura 5.113. A

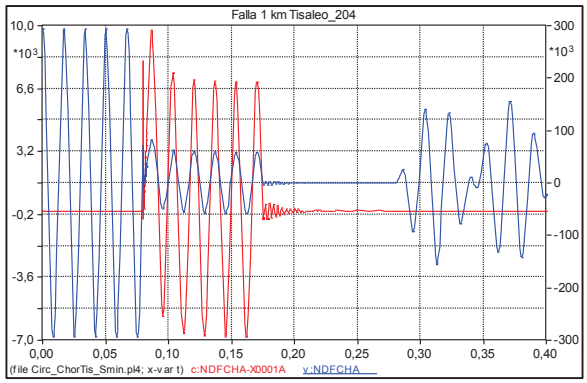



Figura 5.113. B

Figura 5.113. A. 65.34% Compensación Sin $R_N$. B. 65.34% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Mínima Estiaje

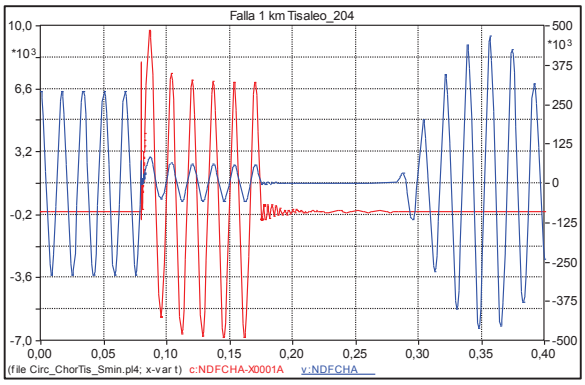



Figura 5.114. A

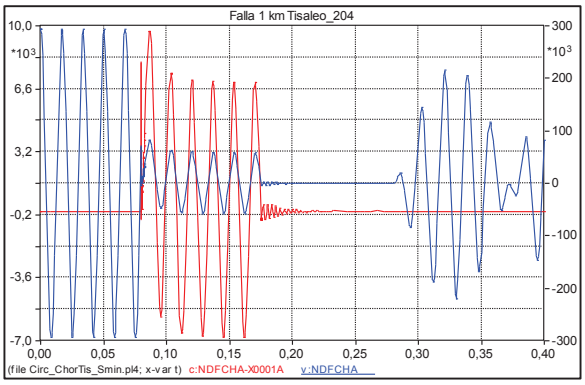



Figura 5.114. B

Figura 5.114. A. 80% Compensación Sin $R_N$. B. 80% Compensación Con $R_N$; L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km, Mínima Estiaje

Como se observa en las figuras 5.112 a 5.114, la tensión de recuperación presenta el mismo comportamiento de las figuras 5.4 a 5.6, el cual es entre más compensación reactiva en la línea se tenga, la tensión de recuperación presenta mayor amplitud en su forma de onda.

En la tabla 5.38, se presenta los valores que se obtuvieron de corriente de arco secundario y tensión de recuperación en la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, con 205 km de longitud, para falla monofásica a un 1 km de la S/E Tisaleo y en el escenario de operación mínima estiaje.

Tabla 5.38. Resultados de Arco Secundario Falla 1 km Tisaleo, Mínima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos 205 km.

| **Variables** | **% Compensación Sin Reactor Neutro** | | | **% Compensación Con Reactor Neutro** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** | ***60*** | ***65,34*** | ***80*** |
| **I Arco Sec [A]** | 65,758 | 66,482 | 68,089 | 47,85 | 48,84 | 51,168 |
| **Pico de T. [kVpico]** | 131,86 | 127,21 | 114,54 | 96,607 | 93,283 | 82,961 |

Aplicando lo mencionado en (5.7), los valores de las tablas 5.37 y 5.38 se los compara con la curva experimental CESI obteniendo los siguientes resultados:

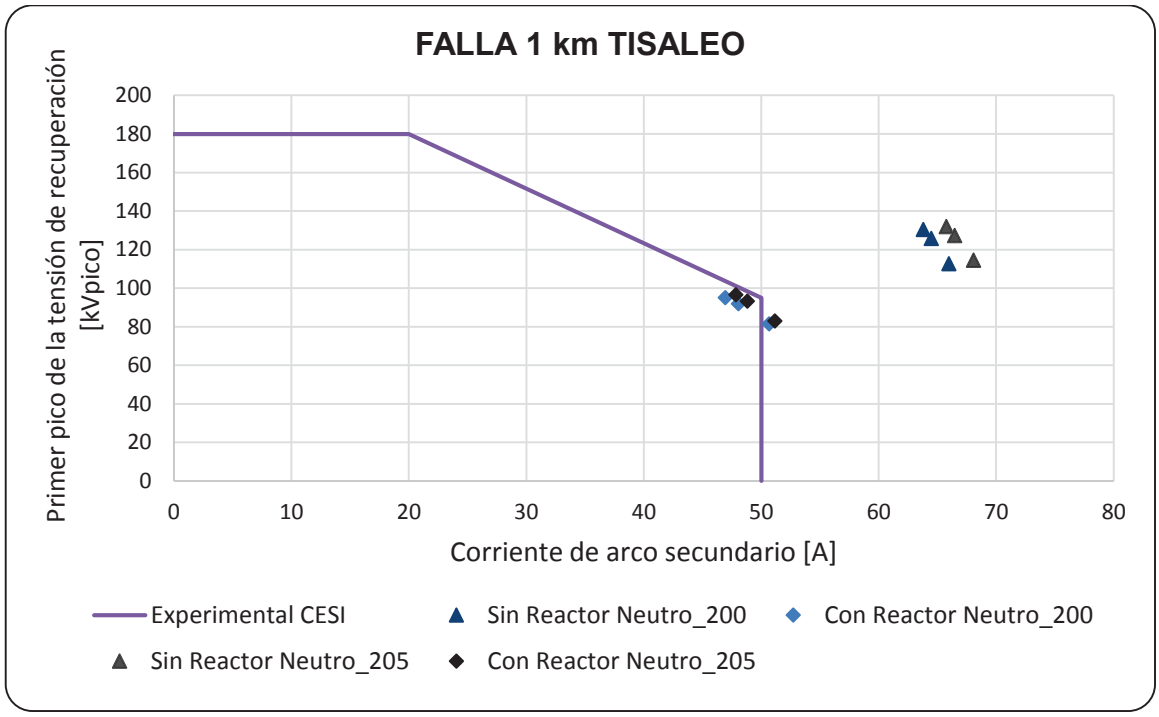



Figura 5.115. CESI 1 km Tisaleo, Mínima Estiaje, L/T Tisaleo-Chorrillos.

De acuerdo a la figura 5.115 para falla monofásica a 1 km de la S/E Chorrillos, sin el uso de reactores de neutro todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.37 y 5.38 se encuentran fuera de la curva CESI, por lo tanto el rencendido del arco no será neutralizado; con el uso de reactores de neutro los valores obtenidos de corriente de arco secundario y tensión de recuperación de las tablas 5.37 y 5.38 para compensación de 60% y 65,34% el rencendido del arco secundario sería neutralizado para 200 km y 205 km de longitud de línea; en cambio para 80% de compensación el rencendido del arco secundario no será neutralizado porque se presenta valores de corriente de arco secundario de 50,68 A para 200 km y de 51,1 A para 205 km de longitud los cuales están fuera de la zona de neutralización.

## 5.11 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se pudo apreciar en los resultados obtenidos de las tablas 5.7 a 5.117, se tiene que para compensación de 80% se presenta valores mayores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación con respecto a los valores de 60% y de 69,69% de compensación para la línea El Inga-Tisaleo y para 65,34% de

compensación para la línea Tisaleo-Chorrillos, por lo que no se recomendaría llegar a este porcentaje de compensación para aquellas líneas.

Para los escenarios simulados de la línea de transmisión El Inga-Tisaleo, se concluye que para longitud de 150 km y 155 km el reencendido del arco secundario será neutralizado para compensación de 60% y 69,69% con la utilización de reactores de neutro, pero con 80% de compensación y con la utilización de reactores de neutro se presenta que para el escenario de demanda mínima el reencendido del arco secundario no será neutralizado; es así que para neutralizar el rencendido del arco secundario se recomienda no sobrepasar el 70% de compensación en la línea (120 MVAr) y con valor recomendable de reactor de neutro de 924,05 Ω para el reactor de línea en el lado de la S/E El Inga y con valor de reactor de neutro de 2772,12 Ω para el reactor de línea en el lado de la S/E Tisaleo.

Para la línea de transmisión Chorrillos - Tisaleo, el reencendido del arco secundario será neutralizado para 200 km de longitud con el 60% y 65,34% de compensación y con la utilización de reactores de neutro; en cambio, para 205 km de longitud y con el escenario de demanda mínima el reencendido del arco secundario no será neutralizado.

Para 80% de compensación con longitud de línea de 200 a 205 km y con el empleo de reactores de neutro se presenta que para el escenario de demanda mínima el reencendido del arco secundario no será neutralizado; por lo tanto, para neutralizar el reencendió del arco secundario se recomienda no sobrepasar el 66% de compensación en la línea (150 MVAr) y con valor recomendable de reactor de neutro de 791,92 Ω para el reactor de línea en el lado de la S/E Chorrillos y con valor de reactor de neutro de 3167,68 Ω para el reactor de línea en el lado de la S/E Tisaleo.

# CAPITULO 6

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 6.1 CONCLUSIONES

- El análisis muestra que para la apertura monopolar en los terminales de las líneas en estudio, a causa de una falla monofásica a tierra, el uso de reactores de neutro sintonizados conjuntamente con los reactores de compensación es necesario para la neutralización del fenómeno del arco secundario, no obstante, existen valores de corriente de arco secundario que, a pesar del uso de reactores de neutro, se encuentran fuera del límite establecido por la curva experimental CESI.

- En los escenarios simulados, se observa que sin el uso de reactores de neutro, todos los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación se encuentran fuera de lo establecido por CESI, por lo tanto el reencendido del arco secundario no será neutralizado y como consecuencia no se podrá efectuar un recierre monopolar.

- Con la variación del porcentaje de compensación shunt se tiene que; los valores de corriente de arco secundario se incrementan cuando se tiene una compensación que se va acercando a su 100 por ciento, pero en cambio, los valores de primer pico de tensión de recuperación decrecen cuando la compensación está acercándose a su 100 por ciento; además, con el aumento en la longitud de las líneas, los valores de corriente de arco secundario y tensión de recuperación presentan un incremento, este incremento se debe a que a mayor longitud en las líneas de transmisión se presenta un mayor acoplamiento capacitivo.

- Con respecto al recierre o reconexión monopolar, los resultados del estudio muestran que el tiempo de despeje de falla de 120 ms, corresponde a un tiempo máximo para la neutralización del arco secundario, debido a que

algunos valores de corriente de arco secundario, inclusive utilizando los reactores de neutro, se encuentran fuera del límite establecido por la curva CESI.

- Con la simulación en todos los escenarios de operación se muestra que el efecto del arco secundario tiene más impacto en los escenarios de demanda mínima, obteniéndose en estos, valores mayores de corriente de arco secundario con respecto a los obtenidos en los escenarios de demanda máxima.

- Para la línea Inga – Tisaleo se obtienen valores de corriente de arco secundario elevados, cuando la falla sucede a 1 km de la S/E Inga; así también, para la línea Tisaleo – Chorrillos se presenta valores elevados de corriente de arco secundario para falla a 1 km de la S/E Chorrillos.

- Observando el desempeño de los reactores de neutro para las dos líneas en estudio, se observa que un adecuado valor de reactor de neutro es cuando se tiene en la línea un 60 por ciento de compensación en derivación, es decir, el efecto de neutralización del arco secundario será mejor cuando se tiene menor compensación por parte de los reactores de línea asociados.

- A pesar de que el método aplicado para la determinación de reactores de neutro sintonizados con los reactores de compensación está propuesto para líneas que tienen igual valor de compensación en sus terminales, los resultados obtenidos para las líneas en estudio muestran valores aceptables en la neutralización del reencendido del arco secundario pese a que en estas líneas, se tienen valores diferentes de compensación en sus terminales tales como, en la línea El Inga – Tisaleo se dispone de 90 MVAr en el terminal El Inga y de 30 MVAr en el terminal Tisaleo y como en la línea Chorrilos - Tisaleo que dispone de 120 MVAr en el terminal Chorrillos y de 30 MVAr en el terminal Tisaleo.

- Para la línea Inga – Tisaleo, se observa que el comportamiento de los reactores de neutro adecuados para la neutralización del fenómeno del arco

secundario corresponden a valores cercanos a un 60 por ciento de compensación de línea y con valores de reactor de neutro de 1486,505 Ω aproximadamente para la compensación en El Inga y de 4459,515 Ω aproximadamente para la compensación en Tisaleo.

- Para la línea Tisaleo – Chorrillos, el comportamiento de los reactores de neutro adecuados para la neutralización del arco secundario corresponden a valores cercanos del 60 por ciento de compensación de línea y con valores de reactor de neutro de aproximadamente 1045,198 Ω para compensación en Chorrillos y de 4180,796 Ω aproximadamente en la compensación de Tisaleo.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Para una mejor neutralización del arco secundario, se recomienda realizar el estudio de una disminución del porcentaje de compensación en derivación o shunt de las líneas El Inga – Tisaleo y Chorrilos - Tisaleo, pero que esa disminución de compensación no implique cambios drásticos en el nivel de tensión en los terminales de línea.

- Si por algún motivo se piensa realizar un aumento de longitud de las líneas en análisis, se recomienda realizar el estudio de reactores de línea y de neutro que dispongan de cambiadores taps, con el fin de que en la nueva topología de la red se produzca la neutralización del fenómeno del arco secundario.

- Se recomienda realizar un estudio considerando que los reactores de línea tengan el mismo valor de compensación en los dos terminales de la línea, con el objeto de observar si se produce una mejor neutralización del reencendido del arco secundario.

- Como lo valores obtenidos en este proyecto son del análisis en la etapa de apertura del interruptor, se recomienda realizar estudios de tiempos para la etapa de cierre del interruptor, con el fin de encontrar un tiempo muerto adecuado para que conjuntamente con el tiempo de neutralización del arco secundario se pueda realizar un recierre exitoso.

- Una vez que se hayan dimensionados los reactores de neutro, se recomienda realizar algún estudio para el dimensionamiento de los descargadores tanto para los reactores de neutro como para los reactores de línea.

# BIBLIOGRAFÍA


[1] CONELEC, Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022.

[2] CELEC EP Unidad de Negocio Transelectric, Plan de Expansión de Transmisión 2014 - 2023

[3] GRAINGER John J., STEVENSON William D. Jr., Análisis de Sistemas de Potencia, México: Editorial McGraw Hill, 1996.

[4] BASLER ELECTRIC COMPANY, Automatic Reclosing Transmission Line Applications and Considerations, Illinois U.S.A, S/A.

[5] LARA ESTEBAN A., Estudios de Recierre Tripolares y Monopolares para la Línea de Transmisión El Inga – Yaguachi de 500 kV, Tesis de Grado EPN, Noviembre 2010.

[6] Centro De Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central Chile, Estudios de Parámetros Mínimos para la Reconexión Tripolar y Monopolar - Tiempos de Reconexión Automática y Estabilidad Transitoria, Chile Octubre 2011.

[7] BAINA He, YUNWEI Zhao, The Research of Secondary Arc Spectrum Characteristics on UHV, Indonesian Journal of Electrical Engineering, October 2012.

[8] ZINI Humberto, MOMBELLO Enrique, Estudios de Transitorios Electromagnéticos, TRANSENER S.A - Instituto de Energía Eléctrica IEE, Octubre 2007.

[9] IEEE COMMITTE REPORT, Single Phase Tripping and Auto Reclosing of Transmission Lines, Transactions on Power Delivery Vol. 7, Enero 1992.

[10] GOLDSWORTHY D. L., KASIBAR R. M., Single Pole Switching on BPA'S 500 kV System, Portland – Oregon, Agosto 2004.

[11] KIM C, AHN S, The simulation of High Speed Grounding Switches for the Rapid Secondary Arc Extinction on 765 kV Transmission Lines, International Conference on Power Systems Transients, Junio 1999

[12] SIEGERT Luis A, Alta Tensión y Sistemas de Transmisión, México Editorial Limusa S.A, 2002.

[13] ALAMOS Juan A., SEGUEL Geter H., “Seminario de Distribución Industrial de Energía Eléctrica” Universisdad del Bio Bio, Chile 2010.

[14] GREENWOOD Allan, Electrical Transient in Power Systems, Segunda Edidción, Estados Unidos 1991.

[15] SAILEMA K, PROAÑO X., Análisis de Sobrevoltajes a Frecuencia Industrial y por Maniobra en Líneas de Transmisión a nivel de 500 kV, Tesis de Grado EPN, Octubre 2010.

[16] CHAJ EDGAR E., Análisis de Sobretensiones Debido a Transitorios por Maniobras en Sistemas Eléctricos de Potencia Mayores de 300 kV, Trabajo de Graduación Universidad De San Carlos de Guatemala, Abril 2008.

[17] DIgSILENT GmbH, DIgSILENT Power Factory User’s Manual, Online Edition.

[18] Alternative Transient Program Rule Book, K.U. Leuven EMTP Center.

[19] HOIDALEN Hans Kristian, ATP DRAW User’s Manual, November 2009.

[20] DI SALVO J H., VILLAR R. R., Estudio de Arco Secundario en Líneas de Extra Alta Tensión de Gran Longitud, Asociación Electrotécnica Argentina, Agosto 1997.

[21] ISA, MUÑANTE A. Alberto, Operación de los Sistemas de Transmisión en 500 kV, Simposium: Ingenieria de los Sistemas de Transmisión en 500 kV, Perú Abril 2011.

[22] ANALISIS DE TRANSITORIOS, Apuntes de Clase Ing. Roberth Saraguro, EPN 2010.

[23] KIMBARK E. W., Suppression of Ground Fault Arcs on Single Pole Switched EHV Lines by Shunt Reactors, IEEE, Marzo 1964.

[24] CENTELSA, Catalogo de Conductores para Líneas Aéreas.

# ANEXOS

# ANEXO A.

## ***HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL PROGRAMA COMPUTACIONAL ATP*** [16] [18]

### FUENTES EQUIVALENTES DEL SISTEMA

La fuente utilizada en el programa ATP es del tipo de onda sinusoidal, trifásica y balanceada conectada al sistema mediante parámetros RL, en los cuales se ingresará la red secuencia obtenida en la reducción del sistema con la ayuda del programa DigSILENT.

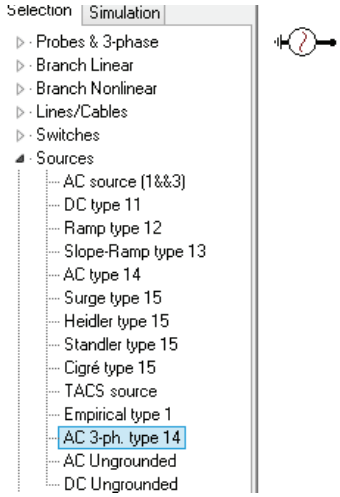



Figura A.1. Fuente Equivalente de Voltaje Tipo 14

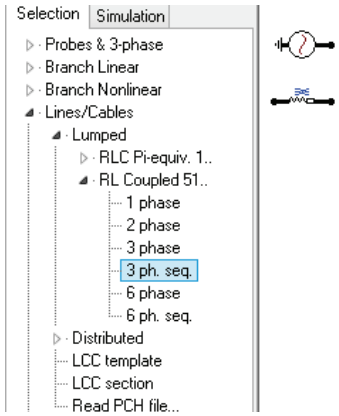



Figura A.2. Parámetros de Secuencia para Red Trifásica

### TRANSFORMADORES

Los datos utilizados para los trasformadores corresponden a la base de datos utilizada en el programa DigSILENT; para lo cual se utilizará el tipo de transformador hibrido el cual permite ingresar solo los datos que se necesitan.

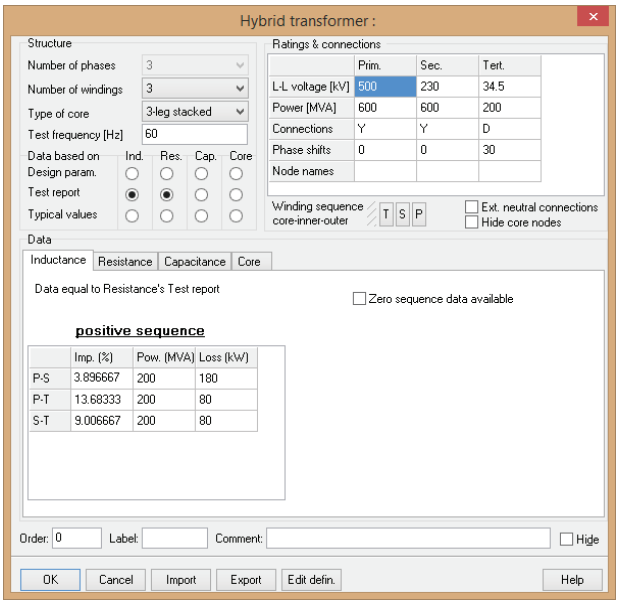



Figura A.3. Cuadro de Dialogo de la Herramienta Transformador Tipo Hibrido

**Donde:**

**L-L**, voltaje nominal en kV.
**Power**, potencia aparente en cada lado del transformador.
**Connections**, tipo de conexión de cada lado del transformador.
**Phase shifts**, ángulo de desfasamiento de la conexión.
**Number of windings,** numero de devanados del transformador.

## LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

El programa ATP permite modelar las líneas de transmisión dependiendo del estudio que se quiera realizar, mediante la componente LCC se puede escoger un modelo de línea y automáticamente calcula sus parámetros a partir de la geometría de la línea y de las propiedades de los conductores que la conforman.

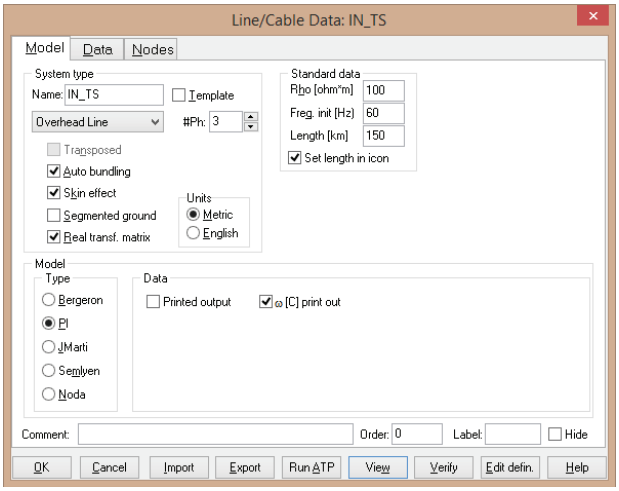
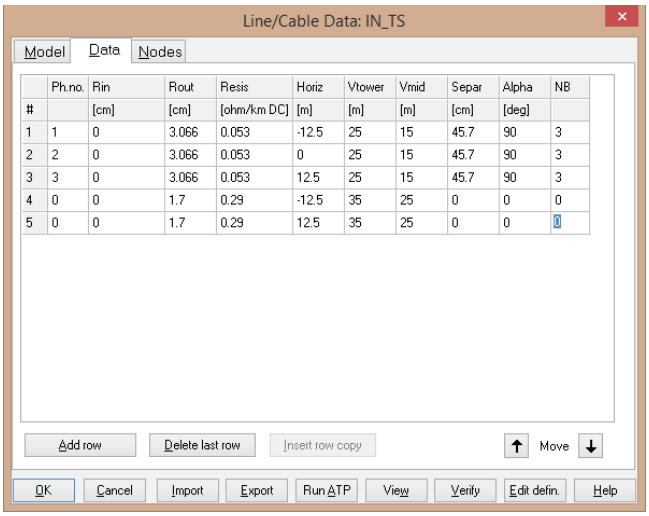



Figura A.4. Cuadro de Dialogo de la Herramienta Línea de Transmisión

**Donde:**

**Transposed**, indica si la línea está transpuesta.
**Auto bunding**, indicar si se trabaja por conductor o por fase.
**Skin effect**, indica si se tiene en cuenta el efecto piel.
**Segmented ground**, indica si la conexión a tierra es continua.
**Real transf. matrix**, indica si los elementos de la matriz de transformación se modifican.
**Rho**, es la resistividad del suelo.
**Freq. init [Hz]**, frecuencia a la que se calculan los parámetros constantes, o frecuencia inferior para el cálculo de los parámetros dependientes de la frecuencia.
**Lenght**, longitud de la línea.




| # | Ph.no. | Rin [cm] | Rout [cm] | Resis [ohm/km DC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Separ [cm] | Alpha [deg] | NB |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 3.066 | 0.053 | -12.5 | 25 | 15 | 45.7 | 90 | 3 |
| 2 | 2 | 0 | 3.066 | 0.053 | 0 | 25 | 15 | 45.7 | 90 | 3 |
| 3 | 3 | 0 | 3.066 | 0.053 | 12.5 | 25 | 15 | 45.7 | 90 | 3 |
| 4 | 0 | 0 | 1.7 | 0.29 | -12.5 | 35 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1.7 | 0.29 | 12.5 | 35 | 25 | 0 | 0 | 0 |

Figura A.5. Cuadro de Dialogo para la Geometría de la Línea de Transmisión

**Donde:**

**Ph.no.** número de fases del conductor, 0 para los hilos de guarda.

**Rin**, radio interno del conductor.

**Rout**, radio externo del conductor.

**Resis**, cuando se considera el efecto piel se debe colocar el valor de la resistencia DC del conductor.

**Horiz**, es la distancia horizontal entre los centros de conductor o del conjunto de conductores en haz.

**Vtower**, es la altura vertical del centro del conductor o del conjunto de conductores en haz medido desde la torre hasta el suelo.

**Vmid**, es la altura vertical del centro del conductor o del conjunto de conductores en haz medida desde el medio vano hasta el suelo.

**Separ**, es la distancia de separación entre los centros de dos conductores adyacentes de un conjunto de conductores en haz.

**Alpha**, es la posición angular del centro a uno de los conductores del conjunto de conductores en haz.

**NB**, es el número de conductores que forman parte del conjunto de cables en haz

## CARGAS Y REACTORES

Tanto las cargas y los reactores ubicados en las líneas de transmisión de 500 kV se los modela como elementos lineales.

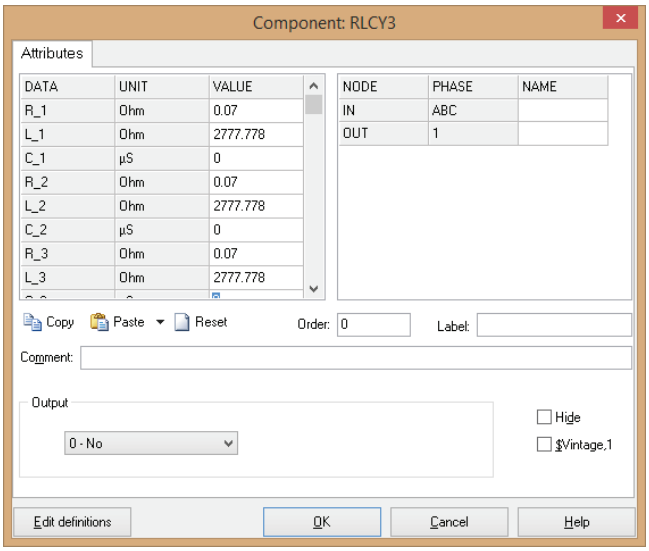



Figura A.6. Cuadro de Dialogo para Componentes Lineales

**Donde:**

**R,** componente resistiva para cada fase.
**L,** componente inductiva para cada fase.
**C,** componente capacitiva para cada fase.

# ANEXO B.

***CALIBRE DE CONDUCTORES*** [24]

| ***TIPO*** | ***Unidad*** | ***Valor*** |
|---|---|---|
| Calibre | kcmil | 1100 |
| Radio medio geométrico | mm | 13,95 |
| Numero de alambres | mm | 18/19 |
| Diámetro hilos de aleación de aluminio | mm | 4,38 |
| Diámetro total | mm | 30,96 |
| Peso total aprox. | kg/km | 1533 |
| Carga a la rotura | kg-f | 12571 |
| Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C | Ohm/m | 0,0556 |
| Capacidad de corriente | kA | 64,5 |

Tabla B.1. Calibre Conductor ACAR 1100 para L/T 500 kV.

| ***TIPO*** | ***Unidad*** | ***Valor*** |
|---|---|---|
| Calibre | kcmil | 1113 |
| Radio medio geométrico | mm | 12,69 |
| Numero de alambres | mm | 45/7 |
| Diámetro hilos de acero | mm | 2,66 |
| Diámetro hilos de aluminio | mm | 3,99 |
| Diámetro total | mm | 31,96 |
| Peso total aprox. | Kg/km | 1872 |
| Carga a la rotura | kg-f | 13528 |
| Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C | Ohm/m | 0,051 |
| Capacidad de corriente | kA | 84,7 |

Tabla B.2. Calibre conductor ACSR 1113 para L/T 230 kV.

| ***TIPO*** | ***Unidad*** | ***Valor*** |
|---|---|---|
| Número y tamaño de cables | AWG | 7 No. 8 |
| Diámetro Nominal | mm | 3,264 |
| Carga a la rotura | kg-f | 7,226 |
| Peso total aprox. | kg/km | 389,6 |
| Diámetro hilos de aluminio | mm | 3,99 |
| Sección transversal | $mm^2$ | 58,56 |
| Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C | Ohm/m | 1,463 |

Tabla B.3. Calibre cable de guardia Alumoweld 7 No 8

# ANEXO C.

## ***CONFIGURACIÓN O DISPOSICIÓN DE TORRES*** [15]

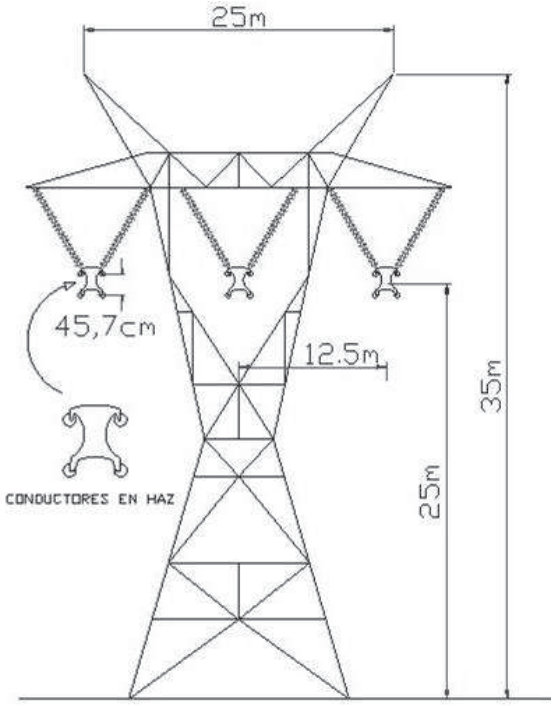



Figura C.1. Estructura de Torre para L/T a 500 kV

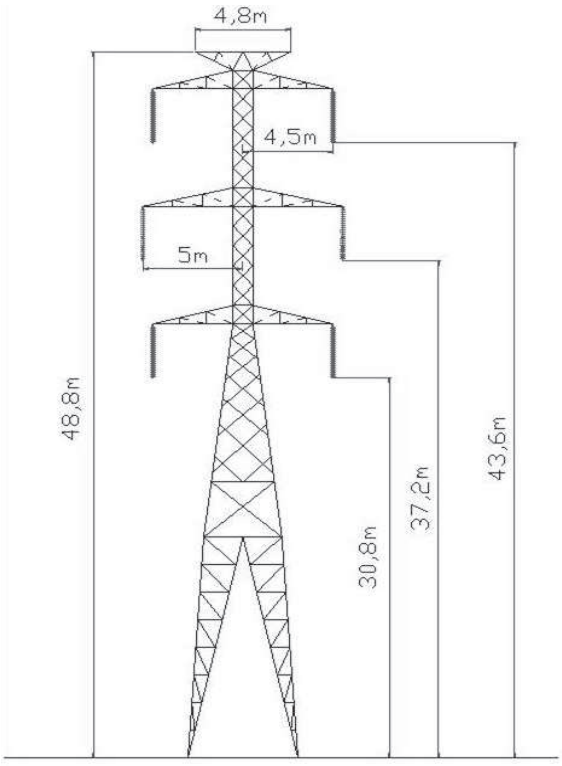



Figura C.2. Estructura de Torre para L/T a 230 kV

# ANEXO D.

“FALLA MONOFÁSICA A TIERRA EN L/T INGA TISALEO”

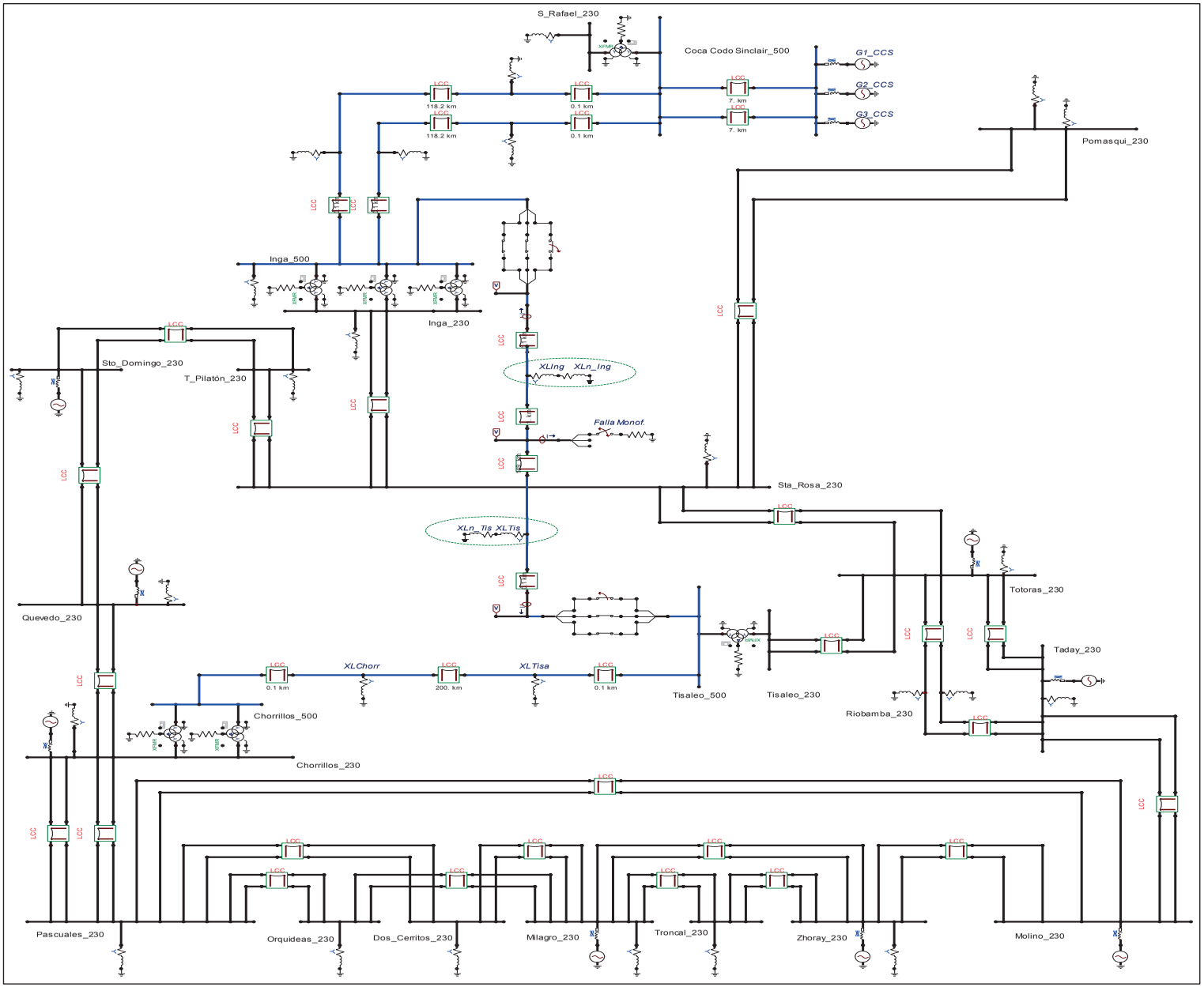



Figura D.1. Falla Monofásica a Tierra, 1 km Inga, L/T Inga – Tisaleo.

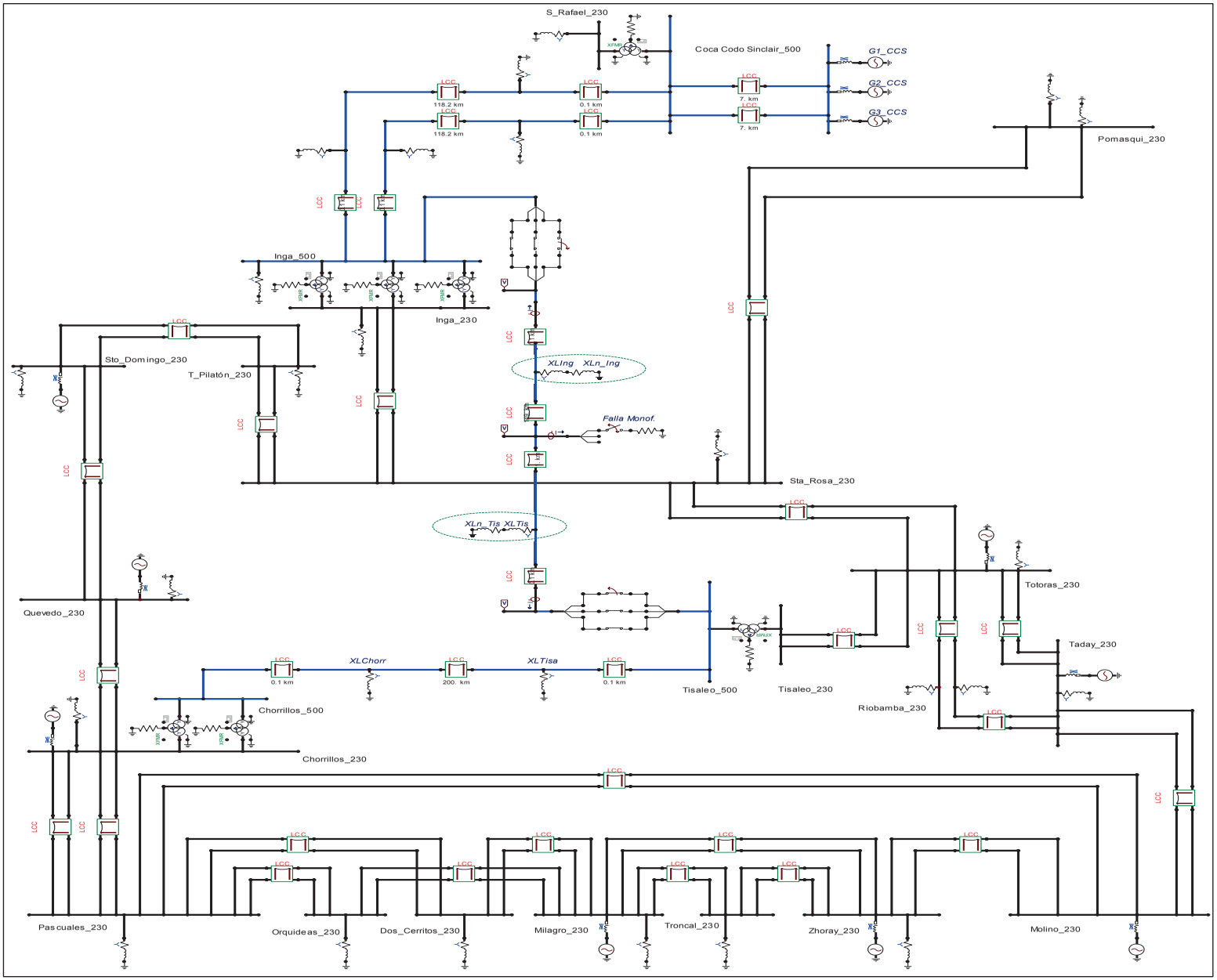



Figura D.2. Falla Monofásica a Tierra, 1 km Tisaleo, L/T Inga – Tisaleo.

# ANEXO E.

"FALLA MONOFASICA A TIERRA EN L/T TISALEO - CHORRILLOS"

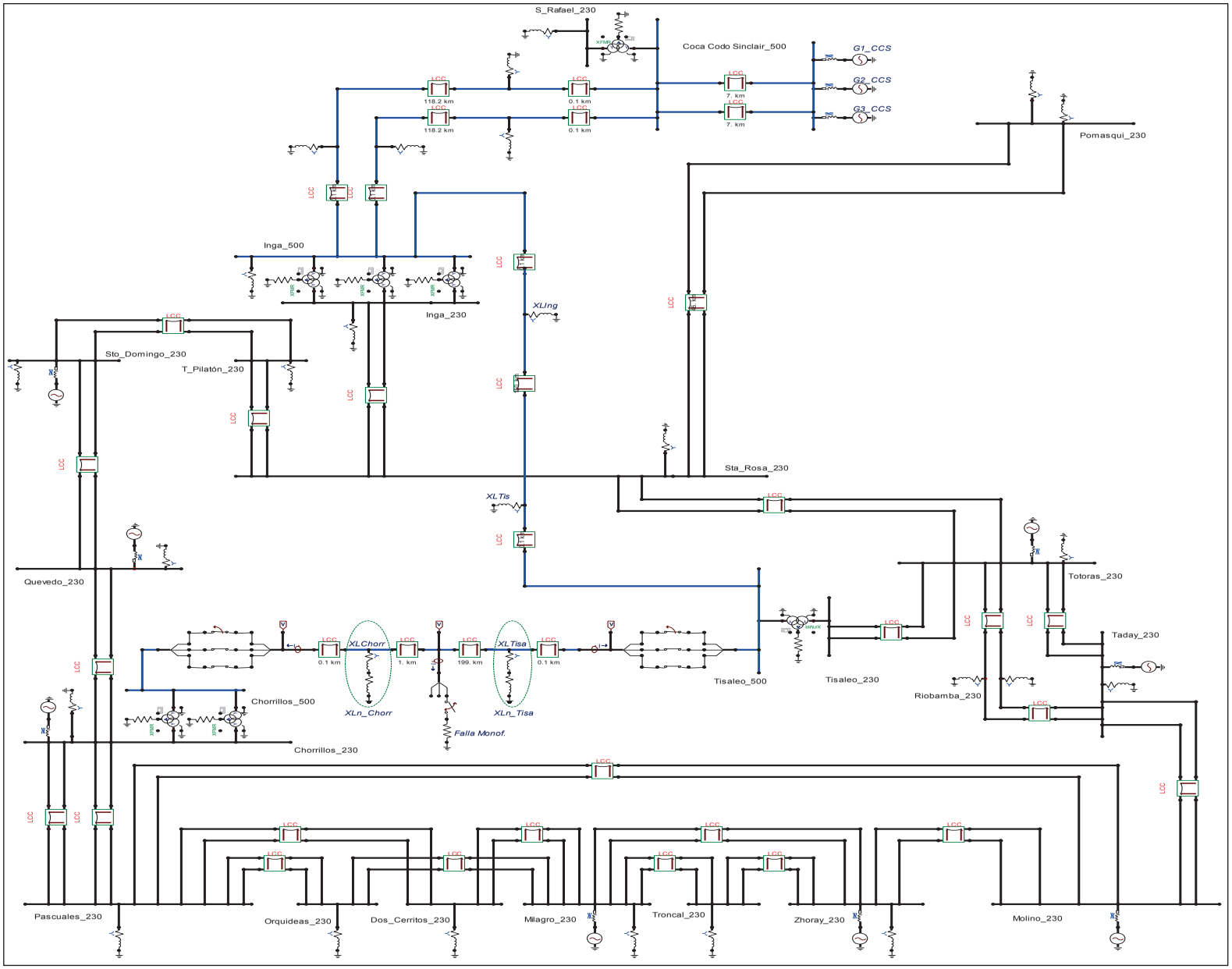



Figura E.1. Falla Monofásica a Tierra, 1 km Chorrillos, L/T Tisaleo - Chorrillos.

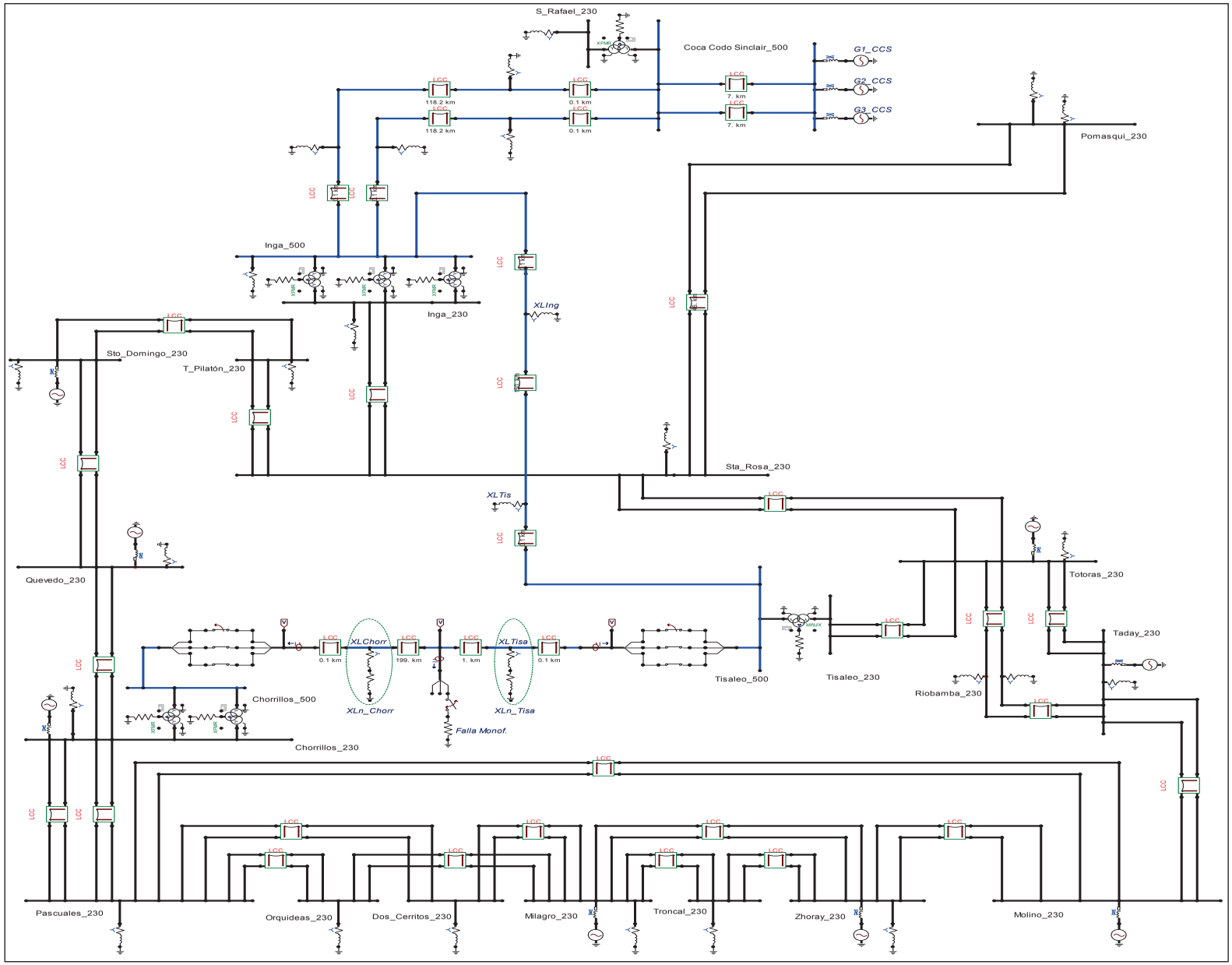



Figura E.2. Falla Monofásica a Tierra, 1 km Tisaleo, L/T Tisaleo - Chorrillo