

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CÁLCULO DE TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A 230 KV CON APLICACIÓN A LA LÍNEA QUEVEDO TOTORAS.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA ELÉCTRICA

PAMELA JESSICA SOLA PAZMIÑO

pames_128@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. LUIS RUALES CORRALES

lruales@transelectric.com.ec

Quito, Febrero 2010

DECLARACIÓN

Yo Pamela Jessica Sola Pazmiño, 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.

Pamela Jessica Sola Pazmiño

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Pamela Jessica Sola Pazmiño, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Ruales Corrales

AGRADECIMIENTOS

Te doy gracias Diosito por haberme bendecido abundantemente toda mi vida, por acabar una etapa de mi vida y empezar otra de la mano contigo, Tú que derramas sobre mi, tu amor y paz que sobrepasan todo entendimiento, se que en todo momento por más extraño que me pareciera, Señor, Tú me estabas bendiciendo en la manera que solo Tú puedes hacerlo.

Padre Celestial que me has dado el regalo más hermoso, mis Padres, esos seres que han formado mi vida con la abnegación más grande, ninguna meta hubiese sido alcanzada sin su apoyo. A mis ñaños Froy y Eve por hacer que cada momento compartido, sea especial. A mi mamita, por brindarme lo más valioso que ella me puede dar, sus bendiciones que siempre me acompañan. A mis queridas tías Rosario y Sarita por estar siempre dispuestas a brindarme todo su apoyo incondicional.

Mis más sinceros agradecimientos para Transelectric por haberme permitido desarrollar mi Proyecto de Titulación, donde tuve la oportunidad de conocer excelentes profesionales, con un don valiosísimo de gente, como la persona que muy acertadamente dirigió mi tesis con sus sabios conocimientos, esenciales para este trabajo, mi especial admiración y gratitud Ing Luis Ruales así como también a los Ingenieros Javier Guevara y Kleber Vásquez, quienes siempre estuvieron prestos a colaborar de una u otra manera a la culminación de este trabajo.

DEDICATORIA

Esta tesis esta dedicada a mi familia, quienes a pesar de atravesar momentos difíciles, su apoyo nunca me faltó, a ti Puchu querida, a ti querido Papi, ejemplos de perseverancia y dedicación, a mi ñaño Froy y a mi ñaña Eve, a cada uno de ellos que han aportado a mi vida momentos de infinita felicidad.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	Xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
GLOSARIO DE ELEMENTOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi

1. CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE.....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	2
1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	3
1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	3

2. CAPITULO II: DEFINICIONES GENERALES

2.1 TRANSTORIOS.....	4
2.1.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	4
2.1.2 TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	6
2.2 ONDAS VIAJERAS.....	12
2.2.1 REFLEXIONES Y REFRACCIONES DE ONDAS VIAJERAS.....	12

2.2.1.1 LÍNEA ABIERTA	14
2.2.1.2 LÍNEA EN CORTOCIRCUITO.....	15
2.2.2 DIAGRAMA DE LATTICE.....	16
2.3 SOBREVOLTAJES.....	18
2.3.1 SOBREVOLTAJES DE BAJA FRECUENCIA.....	19
2.3.1.1 SOBREVOLTAJES PERMANENTES.....	19
2.3.1.2 SOBREVOLTAJES TEMPORALES.....	19
2.3.1.2.1 PÉRDIDA SÚBITA DE CARGA.....	20
2.3.1.2.2 FALLAS A TIERRA.....	21
2.3.1.2.3 EFECTO FERRANTI.....	21
2.3.1.2.4 RESONANCIA Y FERRORESONANCIA.....	22
2.3.2 SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS.....	23
2.3.2.1 SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO.....	24
2.3.2.1.1 ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	24
2.3.2.1.2 RECIERRE DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	25
2.3.2.1.3 INICIO Y DESPEJE DE FALLAS.....	25
2.3.2.1.4 INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES INDUCTIVAS Y	26
CAPACITIVAS.....	26
2.3.2.2 SOBREVOLTAJES DE FRENTE RÁPIDO.....	29
2.3.2.3 SOBREVOLTAJES DE FRENTE MUY RÁPIDO.....	29
3. CAPITULO III: MODELACIÓN DE COMPONENTES	
3.1 MODELOS UTILIZADOS.....	30
3.1.1 FUENTES EQUIVALENTES DEL SISTEMA.....	30
3.1.2 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	31
3.1.2.1 MODELO JMARTÍ.....	32
3.1.3 INTERRUPTORES.....	34
3.1.4 TRANSFORMADOR.....	35
3.1.5 DESCARGADORES DE VOLTAJE O PARARRAYOS.....	37

4. CAPITULO IV: COMPONENTES DEL SISTEMA

4.1 EQUIVALENTES DE RED.....	40
4.2 LÍNEA DE TRANSMISIÓN	41
4.3 INTERRUPTORES.....	44
4.4 TRANSFORMADOR.....	44
4.5 DESCARGADORES DE VOLTAJE O PARARRAYOS.....	49

5. CAPITULO V. SIMULACIÓN DIGITAL

5. IMPLEMENTACIÓN DIGITAL.....	50
5.1. SOBREVOLTAJES TEMPORALES.....	51
5.1.1 EFECTO FERRANTI.....	51
5.1.2 FALLA FASE - TIERRA.....	53
5.1.2.1 SELECCIÓN DE PARARRAYOS.....	55
5.2. SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO O DE MANIOBRA.....	59
5.2.1 ENERGIZACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DESDE QUEVEDO A TOTORAS.....	
5.2.1.1 ENERGIZACIÓN DEL PRIMER CIRCUITO DE LA L/T DESDE QUEVEDO TOTORAS.....	60
5.2.1.2 ENERGIZACIÓN DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE QUEVEDO TOTORAS.....	61
5.2.2. ENERGIZACIÓN DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO.	
5.2.2.1 ENERGIZACIÓN DEL PRIMER CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO.....	61
5.2.2.2 ENERGIZACION DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO.....	62
5.2.3 RECIERRE DE LA L/T QUEVEDO A TOTORAS.....	62
5.2.3.1 RECIERRE DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE QUEVEDO A TOTORAS.....	64

5.2.3.2 RECIERRE DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO.....	65
5.3 ANÁLISIS DE SOBREVOLTAJES CONSIDERANDO ELEMENTOS DE CONTROL.....	65
5.3.1 RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	65
5.3.1.1 MANIOBRAS EN L/T DESDE QUEVEDO A TOTORAS CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	67
5.3.1.1.1 ENERGIZACIÓN DEL PRIMER CIRCUITO DE LA L/T DESDE QUEVEDO TOTORAS CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	67
5.3.1.1.2 ENERGIZACIÓN DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE QUEVEDO TOTORAS CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	67
5.3.1.1.3 RECIERRE DEL 2DO CIRCUITO DE LA L/T DESDE QUEVEDO CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	68
5.3.1.2 MANIOBRAS EN L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	69
5.3.1.2.1 ENERGIZACIÓN DEL PRIMER CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	69
5.3.1.2.2 ENERGIZACIÓN DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	69
5.3.1.2.3 RECIERRE DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	70
5.3.2 USO DE INTERRUPTORES CON MANDO SINCRONIZADO.....	71
5.3.2.1 MANIOBRAS EN L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON MANDO SINCRONIZADO.....	71
5.3.2.1.1 ENERGIZACIÓN DEL PRIMER CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON MANDO	71

SINCRONIZADO.....	
5.3.2.1.2 ENERGIZACIÓN DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON MANDO SINCRONIZADO.....	72
5.3.2.1.3 RECIERRE DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS CON MANDO SINCRONIZADO.....	73
5.3.2.2 MANIOBRAS EN L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN.....	73
5.3.2.2.1 ENERGIZACIÓN DEL PRIMER CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON MANDO SINCRONIZADO.....	73
5.3.2.2.2 ENERGIZACIÓN DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON MANDO SINCRONIZADO.....	74
5.3.2.2.3 RECIERRE DEL SEGUNDO CIRCUITO DE LA L/T DESDE TOTORAS CON MANDO SINCRONIZADO.....	74
5.4 RESUMEN RESULTADOS.....	75
6. CAPITULO VI: EVALUACIÓN DE RESULTADOS	
6.1 CONCLUSIONES.....	79
6.2 RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXO 1: CATÁLOGO DE PARARRAYOS.....	83
ANEXO 2: DATOS DE TRANSFORMADORES.....	87
ANEXO 3: ARCHIVO DE SALIDA DE LA LIBRERÍA SATURATION.....	91
ANEXO 4: ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1	Equivalentes de red en distintos puntos del sistema.....	40
Tabla 4.2	Parámetros de la línea de transmisión	44
Tabla 4.3	Valores nominales de los transformadores.....	44
Tabla 5.1	Voltajes en por unidad, por Efecto Ferranti, escenario Quevedo Totoras.....	52
Tabla 5.2	Voltajes en por unidad, por Efecto Ferranti, escenario Totoras Quevedo.....	52
Tabla 5.3	Característica del pararrayos.....	59
Tabla 5.4	Resultados estadísticos al energizar el primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras.....	60
Tabla 5.5	Resultados estadísticos al energizar el segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras.....	61
Tabla 5.6	Resultados estadísticos al energizar del primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.....	62
Tabla 5.7	Energizaciones del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.....	63
Tabla 5.8	Resultados estadísticos correspondientes al recierre del segundo de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras.....	64
Tabla 5.9	Recierre del segundo de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.....	65
Tabla 5.10	Energizaciones del primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.....	67
Tabla 5.11	Energizaciones del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.....	68
Tabla 5.12	Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.....	68

Tabla 5.13	Energizaciones del primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de Preinserción..	69
Tabla 5.14	Energizaciones del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo, con Resistencias de Preinserción.....	70
Tabla 5.15	Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de Preinserción	70
Tabla 5.16	Resultados estadísticos al energizar el primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Mando Sincronizado.....	72
Tabla 5.17	Resultados estadísticos al energizar el segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Mando Sincronizado.....	72
Tabla 5.18	Resultados estadísticos al recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Mando Sincronizado.....	73
Tabla 5.19	Resultados estadísticos al energizar el primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Mando Sincronizado.....	73
Tabla 5.20	Resultados estadísticos al energizar el segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Mando Sincronizado.....	74
Tabla 5.21	Resultados estadísticos al recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Mando Sincronizado.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Conectando un Circuito RLC.....	4
Figura 2.2	Comportamiento final del circuito.....	6
Figura 2.3	Circuito equivalente de línea con parámetros distribuidos.....	6
Figura 2.4	Características de una onda viajera en un punto de transición de dos líneas de diferente impedancia característica.....	13
Figura 2.5	Comportamiento de una onda viajera en el extremo de una L/T...	15
Figura 2.6	Características de una onda viajera en el punto de cortocircuito de una L/T.....	16
Figura 2.7	Diagrama de Lattice representando reflexiones sucesivas.....	17
Figura 2.8	Diagrama de Lattice para resistencias de preinserción.....	18
Figura 2.9	Rechazo de carga.....	20
Figura 2.10	Modelo pi de una línea de Transmisión.....	21
Figura 2.11	Interrupción de corrientes capacitivas.....	27
Figura 2.12	Circuito inductivo.....	28
Figura 2.13	Interrupción de corrientes inductivas.....	28
Figura 2.14	Reignición de Arco.....	29
Figura 3.1	Ventana de la fuente empleada.....	30
Figura 3.2	Ventana de datos para el equivalente de Thevenin trifásico.....	31
Figura 3.3	Parámetros generales de la línea.....	33
Figura 3.4	Ventana de la clase de interruptores.....	35
Figura 3.5	Datos del BCTRAN.....	36
Figura 3.6	Datos de prueba de cortocircuito.....	37
Figura 3.7	Parámetros de la resistencia no lineal "Type 92".....	38
Figura 4.1	Diagrama Unifilar del sistema modelado, visto desde Totoras a Quevedo.....	39
Figura 4.2	Diagrama Unifilar del sistema modelado, visto desde Quevedo a Totoras	40
Figura 4.3	Datos generales del modelo JMartí.....	41
Figura 4.4	Características principales configuración física de los conductores.....	42

Figura 4.5	Esquema de la Torre de Transmisión doble circuito a 230kV.....	43
Figura 4.6	Formato de la tarjeta de especificaciones.....	45
Figura 4.7	Archivo de salida (flujo y corriente).....	45
Figura 4.8	Parámetros generales del BCTRAN Quevedo.....	46
Figura 4.9	Parámetros generales del BCTRAN Totoras.....	47
Figura 4.10	Parámetros generales del BCTRAN Riobamba.....	48
Figura 5.1	Sistema modelado para la energización de la línea desde Quevedo a Totoras.....	50
Figura 5.2	Sistema modelado para la energización de la línea desde Totoras a Quevedo.....	51
Figura 5.3	Voltaje en Totoras, segundo circuito conectado, desde Quevedo.....	52
Figura 5.4	Voltaje en Quevedo, segundo circuito conectado, desde Totoras.....	53
Figura 5.5	Modelo del cortocircuito monofásico, escenario Totoras – Quevedo.....	54
Figura 5.6	Comportamiento del voltaje en la fase sana, al producirse una falla en Quevedo.....	54
Figura 5.7	Comportamiento del voltaje en la fase sana, al producirse una falla en Totoras.....	55
Figura 5.8	Curva característica ktov – tiempo.....	58
Figura 5.9	Modelo para la simulación del recierre del segundo circuito. Escenario Totoras Quevedo.....	64
Figura 5.10	Resistencias de preinserción.....	66
Figura 5.11	Sistema modelado para la energización empleando resistencias de preinserción.....	66
Figura 5.12	Secuencia de cierre de los polos del disyuntor.....	71

GLOSARIO DE ELEMENTOS

- ✓  Medidor de Voltaje
- ✓  Línea de transmisión
- ✓  Capacitor
- ✓  Interruptor estadístico
- ✓  Descargador de Voltaje o pararrayos
- ✓  Fuente de Voltaje
- ✓  Autotransformador trifásico
- ✓  Inductancia no lineal
- ✓  Resistencia

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia en condiciones transitorias pueden generar sobrevoltajes, sobrecorrientes, formas de onda anormales y transitorios electromecánicos.

Un transitorio eléctrico es un cambio súbito de las magnitudes de corriente y voltaje originados por una manifestación externa (por ejemplo descarga atmosférica) o por una manifestación interna producida por un cambio repentino de condiciones del circuito, como cuando se abren o se cierran líneas o fallas ocurridas en el sistema.

El tiempo en que los sistemas pasan en condiciones transitorias es insignificante comparado con el tiempo en régimen permanente. Sin embargo, los períodos en que los sistemas pasan en condiciones transitorias son muy importantes, porque es en este período que los componentes del sistema sufren las mayores solicitaciones de corriente o de tensiones.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la magnitud de sobrevoltajes temporales y de maniobra en una línea de transmisión y analizar los medios de control de estos sobrevoltajes.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y calcular los sobrevoltajes temporales y de maniobra en una línea de transmisión de 230 kV.
- Modelar los elementos del sistema eléctrico en el programa computacional para Análisis de Transitorios Electromagnéticos ATP (Alternative Transient Program), para el posterior cálculo de los sobrevoltajes.
- Aplicar la modelación a la línea de transmisión Quevedo - Totoras de 230 kV y determinar el método más adecuado para controlar los sobrevoltajes.

1.3 ALCANCE

Analizar y calcular los sobrevoltajes temporales y de maniobra en una línea de transmisión y sus medios de control, haciendo uso del Programa para Análisis de Transitorios Electromagnéticos, ATP.

Se aplicara el modelo a la línea de transmisión Quevedo - Totoras de 230 kV incluyendo el análisis del uso de medios de control de sobrevoltajes.

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Los transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia pese a tener una corta duración, demandan a los elementos del sistema los mayores esfuerzos, teniendo una alta incidencia en la calidad del servicio al consumidor final.

Las magnitudes de los voltajes producidos por maniobras en un sistema eléctrico dependen de la naturaleza del elemento involucrado (transformador, línea de transmisión, capacitor, inductor, etc.), de la forma en la que se efectúa la maniobra (ángulo de cierre), de la configuración de la topología de la red y del

método de control utilizado (pararrayos, resistencias de preinserción, etc.). En función las magnitudes de los voltajes estarán el desempeño del sistema.

1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

El cálculo de sobrevoltajes se realiza por medio de simulaciones en el programa ATP modelando los parámetros.

Para determinar el uso de pararrayos en los extremos de la línea, se realiza su dimensionamiento, su modelación y luego la simulación correspondiente, para verificar la reducción del perfil de sobrevoltaje en los extremos de la línea de transmisión.

Se modelarán los elementos de control de los sobrevoltajes de maniobra: descargadores de sobrevoltajes (pararrayos), resistencias de preinserción, interruptores con mando sincronizado y se estudiará los efectos de la topología de la red en la magnitud de sobrevoltajes.

1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Los valores de los sobrevoltajes producidos por maniobras, en la Línea de Transmisión Quevedo - Totoras de 230 kV, obtenidos en el presente estudio, serán útiles en su correspondiente el diseño.

CAPÍTULO II

2. DEFINICIONES GENERALES

2.1. TRANSITORIOS

Los transitorios, sean de voltaje o de corriente, son la respuesta del sistema eléctrico de potencia a variaciones repentinas en el sistema, ocurriendo una redistribución de energía que no puede darse inmediatamente por dos razones:

- En un capacitor para variar rápidamente el voltaje debe fluir una corriente infinita.
- Para el caso de un inductor una modificación instantánea de corriente requiere un voltaje infinito para ocasionarlo.

2.1.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Para modelar el transitorio de un circuito RLC se establece las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema, esto usualmente se logra aplicando las leyes de Kirchhoff. Para ilustrar lo antes expresado, se considera el circuito de la Figura 2.1. [1]

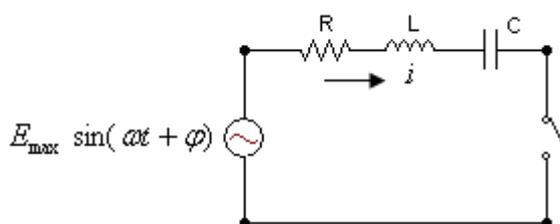


Figura 2.1 Conectando un circuito RLC

$$E_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.1)$$

Para hallar la respuesta natural de una ecuación de segundo orden se elimina el término independiente y se deriva respecto al tiempo.

$$0 = \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i \quad (2.2)$$

La solución general de la ecuación diferencial, puede expresarse como:

$$i_h(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2.3)$$

Donde λ_1 y λ_2 son las raíces de la ecuación característica, y C_1 , C_2 son constantes que toman un valor específico en la solución particular.

$$0 = \lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} \quad (2.4)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2.5)$$

El valor absoluto de la expresión $[(R/2L)^2 - (1/LC)]^{1/2}$ es más pequeño que $R/2L$. Cuando $(R/2L)^2 - (1/LC)$ es positivo, las raíces λ_1 y λ_2 son negativas. Por el contrario, cuando $(R/2L)^2 - (1/LC)$ es negativo, las raíces λ_1 y λ_2 son complejas.

Esto muestra que en la solución general, las funciones exponenciales serán cero para altos valores de tiempo y la solución particular puede ser escrita como:

$$i_p(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.6)$$

Las constantes A y B son determinadas por la ecuación anterior, luego se sustituyen en la ecuación 2.1 resultando la siguiente expresión:

$$i_p(t) = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \sin \left[\omega t + \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R} \right) \right] \quad (2.7)$$

La solución completa es la suma de la respuesta natural o, solución general y particular:

$$i(t) = (C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}) + \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \sin \left[\omega t + \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R} \right) \right] \quad (2.8)$$

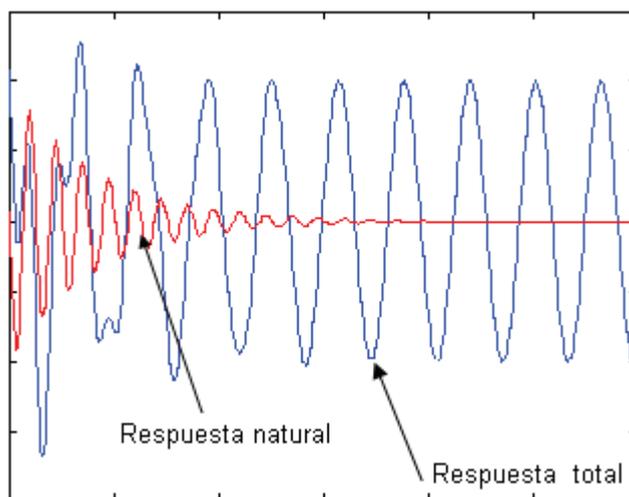


Figura 2.2 Comportamiento final del circuito.

2.1.2 TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

Inicialmente se plantean las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento del circuito indicado en la figura 2.3.

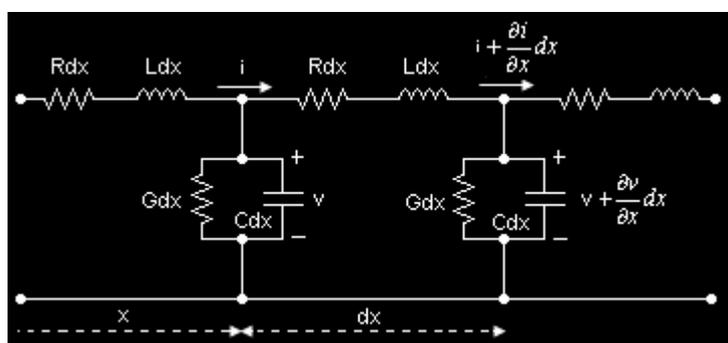


Figura 2.3. Circuito equivalente de línea con parámetros distribuidos

R → Resistencia por unidad de longitud

L → Inductancia por unidad de longitud

C → Capacitancia por unidad de longitud

G → Conductancia por unidad de longitud

Los parámetros de una línea de transmisión se encuentran debidamente distribuidos en cada metro de su longitud, de modo que los valores de voltaje y corriente son distintos en cada uno de los tramos de la línea. Por esta razón para análisis exactos se emplean parámetros distribuidos.

Sobre el elemento diferencial de línea se plantean ecuaciones de voltaje y de corriente de acuerdo a las leyes de Kirchoff.

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R\Delta x * i(x, t) + L\Delta x * \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.9)$$

Dividiendo por Δx en ambos miembros de la ecuación (2.9)

$$\frac{v(x, t) - v(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = R * i(x, t) + L * \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.10)$$

Tomando límites cuando $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = -R * i(x, t) - L * \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.11)$$

Planteando igualmente ley de corrientes:

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G\Delta x * v(x + \Delta x, t) + C\Delta x * \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (2.12)$$

Dividiendo por Δx en ambos miembros de la ecuación (4)

$$\frac{i(x, t) - i(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = G * v(x + \Delta x, t) + C * \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.13)$$

Tomando límites cuando $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -G * v(x + \Delta x, t) - C * \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.14)$$

Las ecuaciones (2.11) y (2.14) se deben resolver simultáneamente. Existen diferentes métodos para resolver las ecuaciones de la línea:

- El Metodo de D'Alembert
- El Metodo Clasico
- El Metodo mediante la Transformada doble de Laplace

Aplicando en este caso, la Transformada de Laplace a las ecuaciones (2.11) y (2.14) con respecto al tiempo:

$$\text{Laplace} \left[\frac{df(t)}{dt} \right] = sF(s) - f(t=0) \quad (2.15)$$

$$\frac{dv(x,s)}{dx} = -R * I(x,s) - sL * I(x,s) + Li(x,t=0) \quad (2.16)$$

En la ecuación (2.16) $i(x, t=0)=0$. Esta ecuación queda como:

$$\frac{dv(x,s)}{dx} = -(R + sL)I(x,s) \quad (2.17)$$

$$\frac{dI(x,s)}{dx} = -G * V(x,s) - sC * V(x,s) + C * V(x,t=0) \quad (2.18)$$

En la ecuación (2.18) el voltaje en $t=0$ es cero, ya que la onda no se ha propagado. La ecuación se reduce entonces a:

$$\frac{dI(x,s)}{dx} = -(G + sC) * V(x,s) \quad (2.19)$$

Derivando las ecuaciones (2.17) y (2.19) con respecto a x:

$$\frac{d^2V(x,s)}{dx^2} = (sL + R)(sC + G)V(x,s) \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2I(x,s)}{dx^2} = (sL + R)(sC + G)I(x,s) \quad (2.21)$$

Aplicando nuevamente la transformada de Laplace a la ecuación (2.20) con respecto a la variable desplazamiento x. $L[f(x)] = F(p)$

$$L\left[\frac{d^2 f(x)}{dx^2}\right] = p^2 F(p) - pf(x=0) - \frac{df(x=0)}{dx} \quad (2.22)$$

$$p^2 V(p, s) - pV(x=0, s) + (sL + R)I(x=0, s) = (sL + R)(sC + G)V(p, s) \quad (2.23)$$

Definiendo:

$$y^2 = (sL + R)(sC + G) \quad (2.24)$$

Despejando la variable voltaje $V(p, s)$:

$$V(p, s) = \frac{P}{p^2 - y^2(s)} V_1(s) - \frac{sL + R}{p^2 - y^2(s)} I_1(s) \quad (2.25)$$

Aplicando transformada inversa de Laplace a la ecuación anterior, con respecto a la variable x. $L^{-1}[F(p, s)] \rightarrow F(x, s)$

$$L^{-1}\left[\frac{P}{p^2 - a^2}\right] = \cosh(a, x); L^{-1}\left[\frac{P}{p^2 - a^2}\right] = \frac{1}{a} \sinh(a, x) \quad (2.26)$$

Y definiendo,

$$Z_c(s) = \sqrt{\frac{sL + R}{sC + G}} \text{ Impedancia Característica} \quad (2.27)$$

$$V(x, s) = V_1(s) \cosh(\gamma(s) * x) - Z_c(s) * I_1(s) \sinh(\gamma(s) * x) \quad (2.28)$$

Aplicando el mismo procedimiento se obtiene la ecuación para la corriente:

$$I(x, s) = I_1(s) \cosh(\gamma(s) * x) - \frac{V_1(s)}{Z_c(s)} * \sinh(\gamma(s) * x) \quad (2.29)$$

Las ecuaciones (2.28) y (2.29), al emplear las ecuaciones hiperbólicas, toman la siguiente forma:

$$V(x, s) = \frac{V_1(s) + Z_c(s)I_1(s)}{2} e^{-\gamma(s)x} + \frac{V_1(s) - Z_c(s)I_1(s)}{2} e^{\gamma(s)x} \quad (2.30)$$

$$I(x, s) = \frac{I_1(s) + V_1(s)/Z_c(s)}{2} e^{-\gamma(s)x} + \frac{I_1(s) - V_1(s)/Z_c(s)}{2} e^{\gamma(s)x} \quad (2.31)$$

Definiendo:

$$A = \frac{V_1(s) + Z_c(s)I_1(s)}{2} \quad (2.32)$$

$$B = \frac{V_1(s) - Z_c(s)I_1(s)}{2} \quad (2.33)$$

Las ecuaciones (22) y (23) serian:

$$V(x,s) = A * e^{-\gamma(s)x} + B * e^{\gamma(s)x} \quad (2.34)$$

$$I(x,s) = \frac{A}{Z_c(s)} e^{-\gamma(s)x} - \frac{B}{Z_c(s)} e^{\gamma(s)x} \quad (2.35)$$

Para resolver finalmente las ecuaciones para voltaje y corriente en cualquier punto de la línea se debe evaluar los coeficientes A y B de las ecuaciones (2.34) y (2.35). Para evaluar estos coeficientes se plantean las siguientes 6 ecuaciones de borde:

$$Vf(s) = Z_1 I_1(s) + V_1(s) \quad (2.36)$$

$$V_2(s) = Z_2 I_2(s) \quad (2.37)$$

$$V_1(s) = A + B \quad (2.38)$$

$$V_1(s) = \frac{A + B}{Z_c} \quad (2.39)$$

$$V_2(s) = A e^{-\gamma(s)d} + B e^{\gamma(s)d} \quad (2.40)$$

$$I_2(s) = \frac{A e^{-\gamma(s)d} - B e^{\gamma(s)d}}{Z_c(s)} \quad (2.41)$$

De las ecuaciones (2.36), (2.38) y (2.39):

$$Vf(s) = \frac{Z_1 + Z_c}{Z_c} A + \frac{Z_c - Z_1}{Z_c} B \quad (2.42)$$

De las ecuaciones (2.38), (2.40) y (2.41):

$$B = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} A e^{-2\gamma(s)d} \quad (2.43)$$

Resolviendo las ecuaciones (2.42) y (2.43), las expresiones finales para A y B serian:

$$A = Vf(s) \frac{Z_c}{Z_c + Z_1} * \frac{1}{1 - r_1 r_2 e^{-\gamma(s)d}} \quad (2.44)$$

$$B = Vf(s) \frac{Z_c}{Z_c + Z_1} * \frac{r_2 e^{-2\gamma(s)d}}{1 - r_1 r_2 e^{-2\gamma(s)d}} \quad (2.45)$$

Donde,

$$r_1 = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_c + Z_1} \quad \text{Coeficiente de reflexión al inicio de la línea} \quad (2.46)$$

$$r_2 = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_c + Z_2} \quad \text{Coeficiente de reflexión al final de la línea} \quad (2.47)$$

Si $Vf(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \varphi)$

Donde:

$\omega \rightarrow$ Frecuencia angular

$\varphi \rightarrow$ Angulo de cierre

Aplicando Laplace a la anterior expresión, se obtiene:

$$L[Vf(t)] = \sqrt{2}V \frac{s \sin \varphi + \omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} = Vf(s) \quad (2.48)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.44), (2.45) y (2.48), en la ecuación (2.34):

$$V(x,s) = \sqrt{2}V \frac{s \sin \varphi + \omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} * \frac{Z_c}{Z_c + Z_1} * \frac{e^{-\gamma(s)x} + r_2 e^{-\gamma(s)(2d-x)}}{1 - r_1 r_2 e^{-\gamma(s)2d}} \quad (2.49)$$

Al dividir para $\cos \varphi$, la expresión dependiente del ángulo de cierre, y al aplicar a ésta el límite cuando $\varphi \rightarrow 0$, resulta:

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} \frac{s \tan \varphi + \omega}{s^2 + \omega^2} \cdot \frac{0}{\cos \varphi} = \frac{0}{\infty} = 0$$

Es decir, para ángulos de cierre aproximadamente cero, el valor del voltaje también tiende a reducirse.

Por otro lado, para analizar la dependencia de la ecuación (2.49), respecto a la longitud de la línea y , considerado previamente que el valor d es constante, se aplica el límite cuando $x \rightarrow \infty$, de la siguiente manera:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{e^{-\gamma(s)} + r_2 e^{-\gamma(s)*2d} * e^{\gamma(s)+x}}{1 - r_1 r_2 e^{-\gamma(s)*2d}} = \frac{0 + \infty}{1} \therefore \infty$$

Por lo tanto, el valor del voltaje de la ecuación 2.49, aumenta en función de la longitud de la línea.

2.2 ONDAS VIAJERAS

El efecto de un cambio súbito en el sistema, en un determinado punto de la línea de transmisión, no ocurre, en el mismo instante, en otra localización de la misma línea de transmisión. Un tiempo finito ocurre para que el disturbio sea transmitido de un punto donde se inicio para cualquier otro punto [3]. Consecuentemente, si ocurre cualquier variación de voltaje o corriente en cierto punto de la línea de transmisión, se originan lo que se conoce como ondas viajeras [4].

2.2.1. Reflexiones y Refracciones de Ondas Viajeras

Cuando una onda viajera alcanza una discontinuidad, o sea, un punto de transición en el cual existe una alteración brusca en los parámetros del circuito, como un terminal abierto o cortocircuitado, una unión con otra línea que involucre cambio de impedancia característica o un transformador, se genera una descomposición de dicha onda. La onda que llega a la discontinuidad es llamada onda incidente y las dos ondas que surgen de la discontinuidad, la que viaja hacia atrás superponiéndose a la incidente o viaja más allá de la discontinuidad, son las llamadas ondas reflejadas y refractadas, respectivamente.

En lo que sigue, se examinará lo que sucede cuando una onda viajera alcanza un punto de transición y, para mayor simplicidad, se considerarán ondas rectangulares, de frente completamente escarpado.

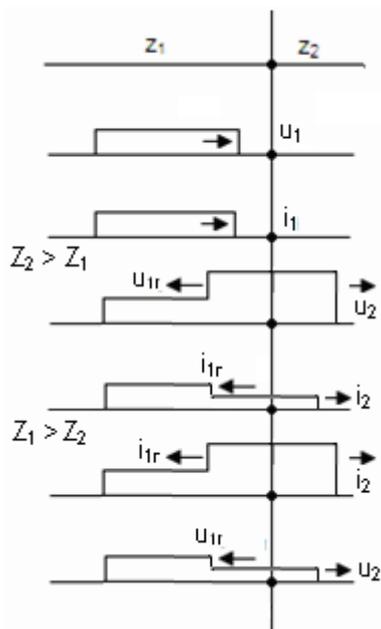


Figura 2.4 Características de una onda viajera al alcanzar el punto de transición de dos líneas de diferente impedancia característica

Cuando una onda de tensión u , se propaga por la línea de impedancia característica Z_1 y alcanza una línea de impedancia característica Z_2 , penetra en ella con la tensión u_2 que se expresa por la ecuación:

$$u_2 = u_1 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.50)$$

Mientras que la onda reflejada, tiene un valor:

$$u_{1r} = u_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.51)$$

En cuanto al valor de la corriente es:

$$i_2 = i_1 \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.52)$$

y la onda reflejada

$$i_{1r} = i_1 \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.53)$$

La interpretación de las fórmulas antes expresadas, demuestran que el paso de una línea de pequeña impedancia característica a una línea de elevada impedancia característica, provoca un aumento de la onda de voltaje y una disminución de la onda de corriente. Al contrario, el paso de una elevada impedancia característica a una impedancia característica menor, origina una reducción de la onda de tensión y un aumento de la onda de corriente; el caso más característico es el paso de una línea aérea de elevada impedancia característica a un cable aislado de baja impedancia característica.

2.2.1.1 Línea Abierta

Cuando el extremo de una línea de transmisión, está abierto, se aplican igualmente los principios de refracción y de reflexión.

$$i_2 = i_1 \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = i_1 \frac{\frac{2Z_1}{Z_2}}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} = 0 \quad (2.54)$$

Mientras que la onda de voltaje al final de la línea abierta, actúa como si se encontrase con otra onda de impedancia de igual magnitud, por lo tanto:

:

$$u_2 = u_1 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = u_1 \frac{2}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} \quad \therefore u_2 = 2u_1 \quad (2.55)$$

Esto significa que la corriente en el extremo de la línea resulta nula y el voltaje el doble. En esta extremidad las ondas incidentes son completamente reflejadas, la onda de voltaje con el mismo signo y la onda de corriente con signo contrario.

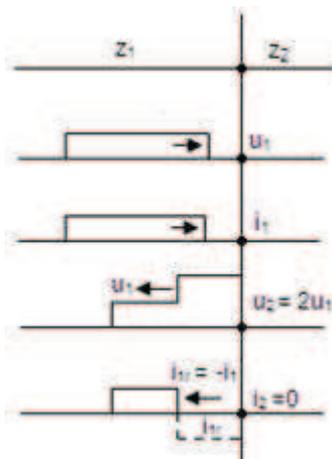


Figura 2.5 Comportamiento de una onda viajera en el extremo abierto de una L/T.

Como la corriente no puede seguir progresando, el valor de la onda de corriente cae a cero. El efecto es como si la onda viajera se encontrara con otra de la misma magnitud, avanzando en sentido opuesto y que la compensara.

2.2.1.2 Línea en Cortocircuito

Si se expresa el estado de cortocircuito por una impedancia característica Z_2 nula, la aplicación de las leyes da los siguientes resultados:

$$u_{1r} = u_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = u_1 \frac{\frac{Z_2}{Z_1} - 1}{\frac{Z_2}{Z_1} + 1} = -u_1 \quad (2.56)$$

y recordando que $Z_2 = 0$ el valor de u_{1r} , será $u_{1r} = -u_1$, por otro lado, el valor de la corriente reflejada será:

$$i_{1r} = i_1 \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = i_1 \frac{\frac{Z_1}{Z_2} - 1}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} = -i_1 \quad (2.57)$$

Es decir, que desde el extremo de la línea retornará una corriente

$$i_2 = i_1 + i_1 = 2 * i_1$$

valor que también podemos obtener directamente, a partir de la expresión :

$$i_2 = i_1 \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = i_1 \frac{2Z_1}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} = 2i_1 \quad (2.58)$$

por lo tanto, en el punto de cortocircuito, el voltaje es nulo y la corriente es dos veces más intensa, tal como se expresa gráficamente en la figura de abajo.

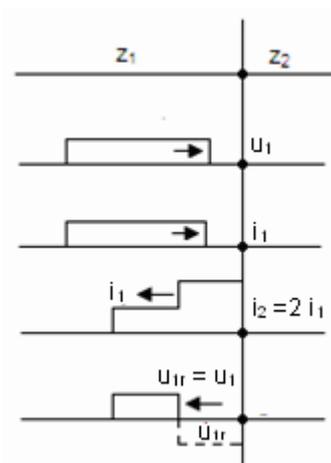


Figura 2.6 Características de una onda viajera en el punto de cortocircuito de una L/T.

2.2.2 Diagrama de Lattice

Para simplificar el problema complejo de reflexiones sucesivas, se emplea una técnica gráfica que muestra la posición y dirección de cada onda viajera en el tiempo, denominado diagrama Lattice.

La finalidad del diagrama de Lattice es proporcionar un medio gráfico que denote las relaciones tiempo espacio de ondas en una red con múltiples discontinuidades.

Para estimar las aplicaciones del diagrama en espacio y tiempo, se analiza que ocurre cuando en la Figura 2.7, el interruptor cierra y energiza una línea sin carga en serie con un transformador sin carga, cuya impedancia característica es baja.

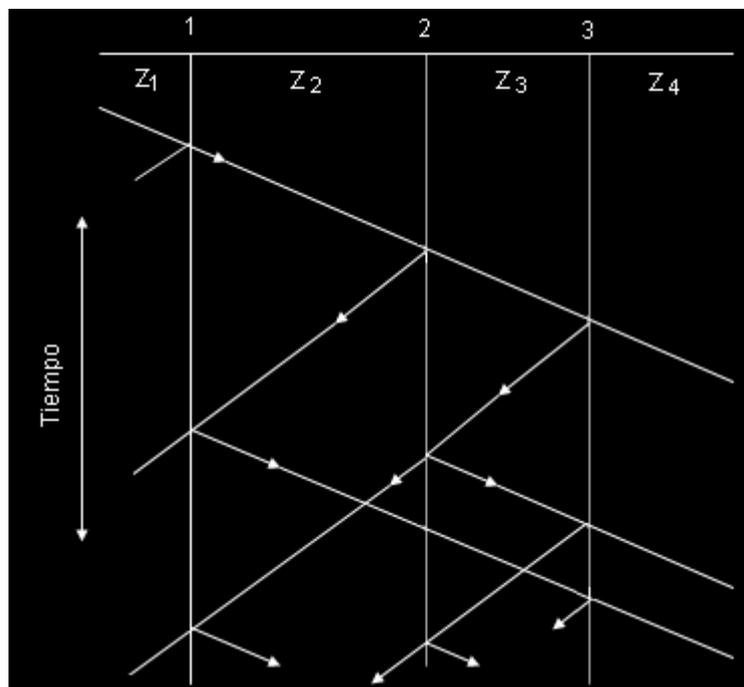


Figura 2.7 Diagrama de Lattice representando sucesivas reflexiones [4].

La inserción de resistencias es uno de los métodos más efectivos en la reducción de sobrevoltajes causados por maniobras en líneas de transmisión, su efecto puede ser analizado mediante la Teoría de Onda Viajera y Diagramas de Lattice, considerando que existe un punto de transición entre la línea de transmisión y las resistencias de preinserción. Para hallar el valor de voltaje transmitido y el voltaje reflejado, se considera las ecuaciones 2.50 y 2.51, tomadas del Capítulo Dos.

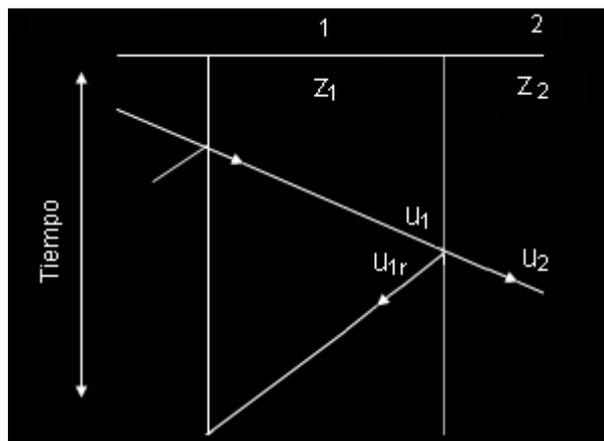


Figura 2.8 Diagrama de Lattice para resistencias de preinserción.

$$u_2 = u_1 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$u_{1r} = u_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Recordando que Z_1 es la impedancia característica de la línea, y Z_2 la impedancia característica en el punto de transición y asumiendo que Z_2 es igual a Z_1 , como en el caso de emplear resistencias de preinserción, las expresiones anteriores toman los siguientes valores:

$$u_2 = u_1 \frac{2Z_2}{2Z_2} = u_1$$

$$u_{1r} = u_1 \frac{0}{Z_2} = 0$$

Es decir, empleando resistencias de preinserción con impedancia característica igual a la de una línea de transmisión, e incorporando a esta, no existe voltaje reflejado y el valor del voltaje en el punto de crítico se conserva, sin ninguna variación.

2.3 SOBREVOLTAJES

Un transitorio sobre la red se manifiesta como una sobrecorriente o, un sobrevoltaje cuyo valor pico excede al pico máximo del voltaje de operación del

sistema. Según la Norma IEC 60071-4 [5], los sobrevoltajes se clasifican de acuerdo a su forma y duración en:

Sobrevoltajes de baja frecuencia:

- Sobrevoltajes Permanente
- Sobrevoltajes Temporal

Sobrevoltajes Transitorios:

- Sobrevoltajes de frente lento
- Sobrevoltajes de frente rápido
- Sobrevoltajes de frente muy rápido

2.3.1 SOBREVOLTAJES DE BAJA FRECUENCIA

Los sobrevoltajes de baja frecuencia ocurren debido a operaciones ordinarias en el sistema. El sobrevoltaje más importante es el originado en las dos fases restantes cuando la tercera se pone a tierra.

2.3.1.1 Sobrevoltajes permanentes

Estos sobrevoltajes se generan en estado estable, con frecuencia igual o cercana a la del sistema, son sostenidos por largo tiempo. Pueden resultar durante la puesta en servicio o fuera de servicio de una carga, sobre todo, cuando la red comprende líneas de gran longitud; también se incluyen en este grupo los sobrevoltajes permanentes provocados por las fallas a tierra.

2.3.1.2 Sobrevoltajes temporales

Sobrevoltaje temporal es un sobrevoltaje de duración relativamente larga, superior a decenas de milisegundos, débilmente amortiguado o no amortiguado.

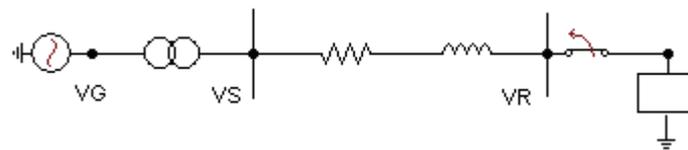
Generalmente son causados por:

- Maniobras, por ejemplo rechazo de carga.

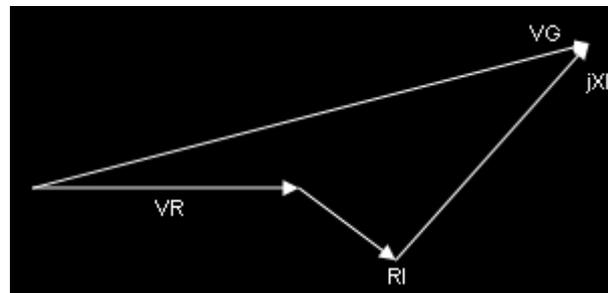
- Fallas, por ejemplo corto circuito monofásico.
- Efecto Ferranti.
- Resonancia y Ferroresonancia

2.3.1.2.1 Pérdida súbita de carga. [3]

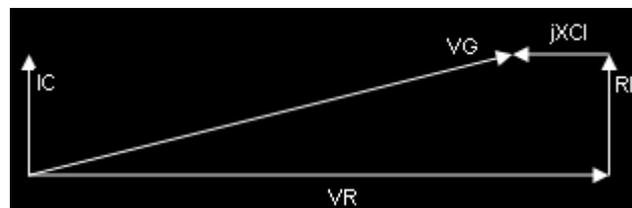
Cuando una línea de transmisión desconecta una carga significativa para el sistema, los generadores se acelerarán y el voltaje aumenta, por lo tanto, el efecto capacitivo de las líneas se acentúa y la caída de tensión de las impedancias se reduce, este hecho puede ser mejor visualizado a través de la Figura 2.9. con los respectivos diagramas vectoriales de las condiciones pre y post maniobra.



(a) Rechazo de carga en sistema radial



(b) Diagrama vectorial antes del Rechazo



(c) Diagrama vectorial después del Rechazo

Figura 2.9 Rechazo de Carga.

2.3.1.2.2 Fallas a tierra.

El tipo de falla más común en un sistema de transmisión es la falla monofásica a tierra, que produce, un aumento en los voltajes a tierra de las fases sanas los que dependen principalmente del factor de falla a tierra, definido como la razón entre el mayor voltaje de las dos fases sin falla, y el voltaje fase-neutro en el mismo punto del sistema, con la falla removida. Este fenómeno se calcula por métodos de componentes simétricas.

2.3.1.2.3 Efecto Ferranti.

El efecto Ferranti de una línea, corresponde al sobrevoltaje en el extremo receptor abierto de una línea energizada, debido al flujo de corriente capacitiva a través de la inductancia serie de la línea.

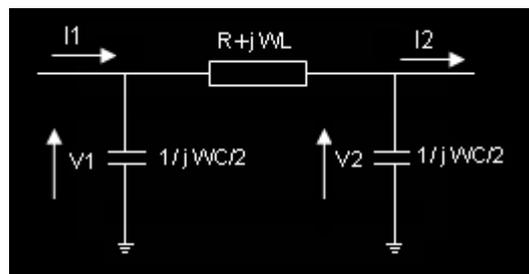


Figura 2.10 Modelo π de una línea de transmisión [6]

Al aplicar un divisor voltaje en el circuito de la Figura 2.10 se obtiene la relación entre los voltajes de ambos extremos el de sin carga y el de alimentación de la línea. Considerando que $R \ll \omega L$ y por el efecto capacitivo de la línea se obtendrá un valor mayor que uno.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\frac{1}{1/2j\omega C} + j\omega L} \quad (2.59)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2 LC}{2}} \quad (2.60)$$

Si $V_1 - V_2 = j\omega L$ y $V_2 = \frac{1}{j\omega \frac{C}{2}}$, entonces:

$$\frac{V_1 - V_2}{V_2} = \frac{j\omega L}{\frac{1}{j\omega \frac{C}{2}}} = -\omega^2 L \frac{C}{2} \quad (2.61)$$

$$\frac{\Delta V_{12}}{V_2} = -\omega^2 L \frac{C}{2} \quad (2.62)$$

$$\therefore V_1 - V_2 < 1$$

$$V_1 < V_2$$

2.3.1.2.4 Resonancia y Ferroresonancia.

La resonancia se produce en un circuito eléctrico cuando a una frecuencia dada, los valores de inductancia y capacitancia son iguales, por lo tanto, la reactancia total resulta nula si ambos elementos están en serie o infinita si están en paralelo [7].

Así en un circuito serie, compuesto únicamente por inductancias y capacitancias su impedancia será [8];

$$Z_s = j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = j * \left(L\omega - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.63)$$

Siendo X_s la reactancia del conjunto

$$Z_s = j * X_s \quad (2.64)$$

Si X_s es nula, existiendo un valor ω_0 para que esta condición se cumpla, entonces

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.65)$$

Si se considera que ω_0 pulsación de resonancia del circuito es:

$$\omega_0 = 2\pi * f_0 \quad (2.66)$$

La frecuencia de resonancia f_0 que origina una corriente infinitamente elevada será:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi * \sqrt{LC}} \quad (2.67)$$

Algunos eventos de resonancia ocurren en líneas de transmisión o cables aislados con alta capacitancia y reactores limitadores de corriente, o, entre inductancias lineales y la capacitancia de un sistema constituido por una línea de transmisión levemente cargada.

La ferroresonancia es un caso de resonancia que ocurre cuando los elementos del circuito son no lineales, principalmente inductancias saturables, lo cual es normal en casi todos los transformadores por tener núcleos ferromagnéticos, lo que provoca varios puntos de resonancia.

2.3.2 SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS

Sobrevoltaje de corta duración de algunos milisegundos o menos, oscilatorio o no oscilatorio, generalmente muy amortiguado [5]. Producidos por una maniobra en la red (interrupción de circuitos inductivos o capacitivos), o bien a las condiciones atmosféricas (caída de rayo directa en una instalación o en sus proximidades). Los sobrevoltajes transitorios se dividen en:

- a) Sobrevoltajes de frente-lento
- b) Sobrevoltajes de frente-rápido
- c) Sobrevoltajes de frente-muy rápido

2.3.2.1 Sobrevoltajes de frente-lento

Estas perturbaciones son de corta duración y están fuertemente amortiguadas. Principalmente se originan por acción de la maniobra de interruptores y pueden simularse, con respecto a los efectos que producen en los aislamientos, con impulsos de maniobra normalizados cuyo tiempo cresta oscila entre $20\mu\text{s}$ y $5.000\mu\text{s}$ y un tiempo al valor medio de cola menor que 20 ms.

Despeje de fallas, descargas atmosféricas, conmutación de corrientes inductivas, corte de corrientes capacitivas de bancos de condensadores, la apertura de los interruptores de vacío (que por no tener arco no cortan a corriente nula, provocando sobretensiones en las inductancias), energización de líneas y re energización después de una interrupción momentánea, son casos típicos que pueden producir sobrevoltajes de frente lento

2.3.2.1.1 Energización de una Línea de Transmisión.

Cuando se efectúa la energización de una línea de transmisión, el voltaje en terminal remoto dependerá del ángulo de cierre, la longitud de la línea de transmisión y de la topología de la red.

Si la línea termina en un circuito abierto, la onda reflejada se añadirá a la onda incidente, de modo que aparecerá un voltaje de aproximadamente dos por unidad.

Si la línea termina en cortocircuito, el voltaje en dicho punto de transición es nulo y la corriente es dos veces más intensa.

2.3.2.1.2 Recierre de una Línea de Transmisión.

En el caso de la desconexión de líneas de transmisión, la corriente es interrumpida cuando esta pasa por cero, mientras que el voltaje por su valor máximo, como consecuencia de dicha maniobra se produce una carga residual en la línea que permanecerá en esta, por un cierto tiempo. De esta forma, la línea se mantiene cargada con prácticamente su voltaje máximo, a menos que esta carga sea drenada por un transformador o un reactor. Si el interruptor recierra en un punto de la onda de voltaje con polaridad opuesta a la carga atrapada, el sobrevoltaje resulta muy elevado alcanzando hasta 5 pu [3].

Los sobrevoltajes de recierre monopolar son de la misma naturaleza de los originados por recierre tripolar, con la diferencia básica de que la carga residual encontrada en la fase a ser cerrada es establecida por el voltaje que aparece en esta fase luego de la extinción del arco, provocada por el acoplamiento entre fases. El instante del primer paso de la corriente por cero, después el momento en que la corriente pico es inferior a un valor predeterminado y el primer pico de voltaje residual son aspectos verificados cuando se estudia este tipo de recierre.

2.3.2.1.3 Inicio y despeje de fallas

Los sobrevoltajes originados por el inicio de falla se generan debido a la transición entre el voltaje normal a el sobrevoltaje temporal en las fases sanas. En el caso del despeje de falla ocurre una situación transitoria, que depende del grado de puesta a tierra del sistema o también conocido como factor de falla a tierra.

Los valores de sobrevoltajes dependen del factor de falla a tierra, expresado como la relación entre el valor máximo eficaz de voltaje fase – neutro a frecuencia industrial (U_E) de una fase no afectada durante una falla y el valor del voltaje fase neutro a frecuencia industrial en el mismo punto con la falla removida, como se expresa a continuación:

$$\delta = \frac{U_E}{\left[\frac{U_M}{\sqrt{3}} \right]} \quad (2.68)$$

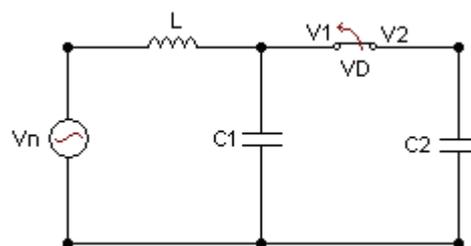
2.3.2.1.4 Interrupción de corrientes inductivas y capacitivas.

Algunos de los mayores sobrevoltajes de maniobra se registran cuando se interrumpen corrientes inductivas o capacitivas desde su cero, dichas corrientes están retrasadas o adelantadas 90° en relación al voltaje respectivamente, de modo que, si se interrumpe la corriente en su paso por cero, el voltaje esta pasando por su máximo valor, originando sobrevoltajes.

Corrientes capacitivas:

La interrupción de corrientes capacitivas, sean corrientes de carga de bancos de condensadores o corrientes en líneas de transmisión, puede producir un reencendido del arco, provocando altos niveles de voltaje.

Para complementar lo antes mencionado se analiza el circuito de la Figura 2.11 cuya corriente esta adelantada 90° respecto al voltaje debido a su naturaleza capacitiva.



(a) Circuito capacitivo

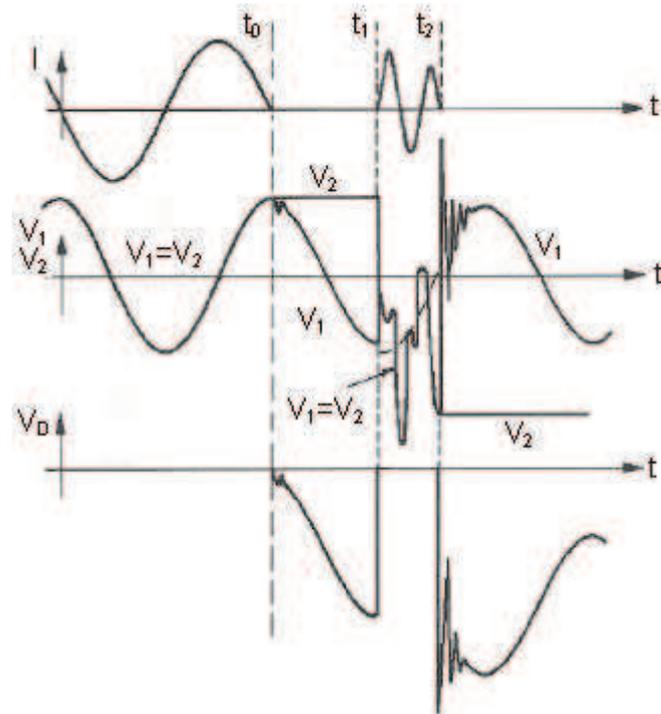


Figura 2.11 Interrupción de corrientes capacitivas

Cuando el interruptor recibe la orden de apertura, la interrupción de la corriente, se produce cuando pasa por cero, donde el arco pierde su conductividad y la corriente es efectivamente interrumpida mientras que el voltaje alcanza su máximo valor cargando el capacitor C2 con dicho voltaje. Conforme el voltaje de la fuente cambia de polaridad, el voltaje de reestablecimiento aumenta, (entendiéndose por voltaje de reestablecimiento al voltaje entre los polos del disyuntor), hasta que el voltaje de la fuente llega a la mitad del ciclo, es decir -1 pu, haciendo que el voltaje de reestablecimiento alcance alrededor de 2 pu y si el disyuntor no ha obtenido suficiente rigidez dieléctrica entre sus contactos, ocurrirá una reignición del arco.

Posterior al reencendido del arco, la corriente vuelve a cruzar por cero y el arco se extinguirá nuevamente dejando el capacitor cargado con valor de voltaje superior. Medio ciclo después puede darse una segunda reignición cuando el voltaje a través de los contactos del disyuntor alcance 4 pu. Teóricamente este proceso podría ser recurrente pero en la práctica, debido, probablemente a una falla de aislamiento este proceso se interrumpiría.

Corrientes Inductivas:

En la Figura 2.12 se ilustra el fenómeno que frecuentemente es observado al interrumpir una corriente inductiva. Si en el circuito, se admite que los contactos del disyuntor se separen antes del instante t , la corriente que esta atrasada respecto al voltaje 90° , será conducida a través del arco establecido entre los contactos, esto ocurre cuando los voltajes en los extremos del interruptor son máximos. Producto del intercambio de energía entre $L2$ y $C2$ aparecerá una oscilación de voltaje $U2$ y el voltaje de reestablecimiento crecerá rápidamente a su valor máximo.

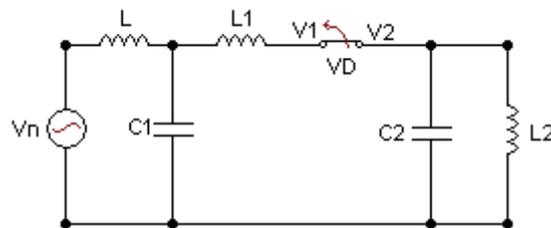


Figura 2.12 Circuito inductivo

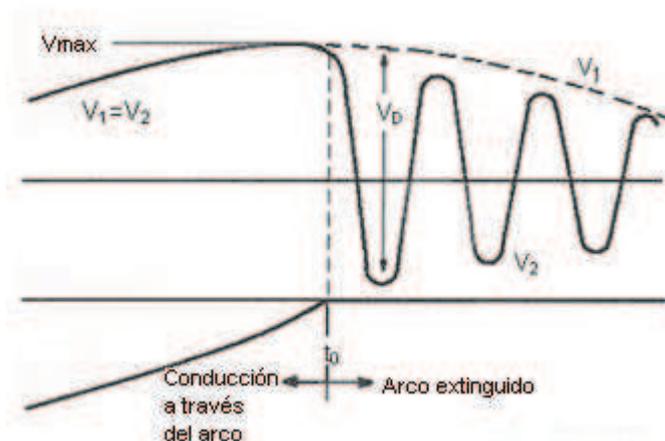


Figura 2.13 Interrupción de corrientes inductiva

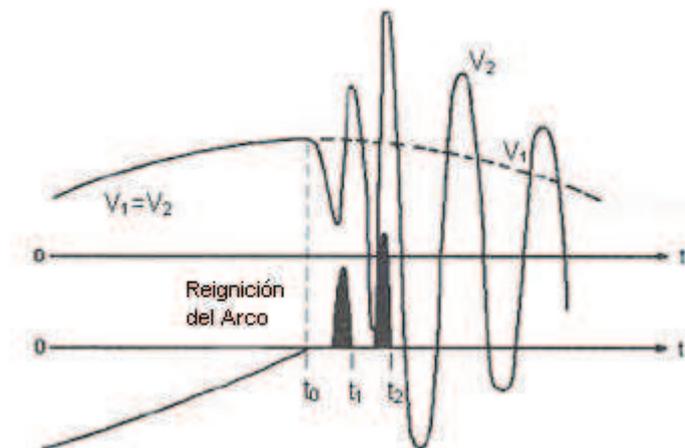


Figura 2.14 Re-ignición del Arco

Justo después que el arco se extinga, se pueden establecer condiciones para el reencendido de este, de ser este el caso, conforme la Figura 2.14, la corriente de arco pasa por cero consiguiendo extinguirse nuevamente en t_1 .

2.3.2.2 Sobrevoltajes de frente-rápido

Sobrevoltajes transitorios, generalmente unidireccionales, con un tiempo de subida hasta el valor de cresta, T_1 , comprendido entre $0,1 \mu\text{s}$ y $20 \mu\text{s}$, y tiempo de cola, T_2 , igual o inferior a $300 \mu\text{s}$. Estos sobrevoltajes son esencialmente producidos por descargas atmosféricas.

2.3.2.3 Sobrevoltajes de frente-muy rápido

Sobrevoltajes generalmente oscilatorios muy rápidos con tiempo a la cresta T_f menor a $0,1 \mu\text{s}$, duración total inferior a 3 ms , y con oscilaciones de frecuencias comprendidas entre 30 kHz . y 100 MHz .

El presente trabajo de todos los sobrevoltajes antes citados, calcula los ocurridos por maniobras y fallas.

CAPITULO 3:

MODELACIÓN DE COMPONENTES

3.1 MODELOS UTILIZADOS

3.1.1 FUENTES EQUIVALENTES DEL SISTEMA

Las fuentes equivalentes empleadas en la red, son equivalentes de cortocircuito (equivalente Thevenin), representadas por fuentes sinusoidales constantes, trifásicas y balanceadas Figura 3.1, acopladas al sistema a estudiarse, mediante parámetros R-L de secuencia, acoplados, estos elementos fueron calculados en base a las magnitudes de cortocircuito trifásico y monofásico en las barras correspondientes Figura 3.2.

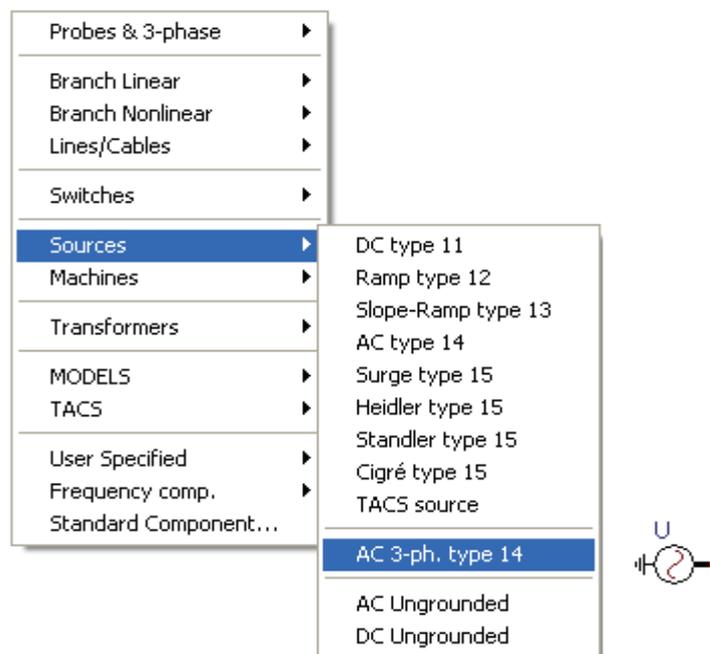


Figura 3.1 Ventana de la fuente empleada.

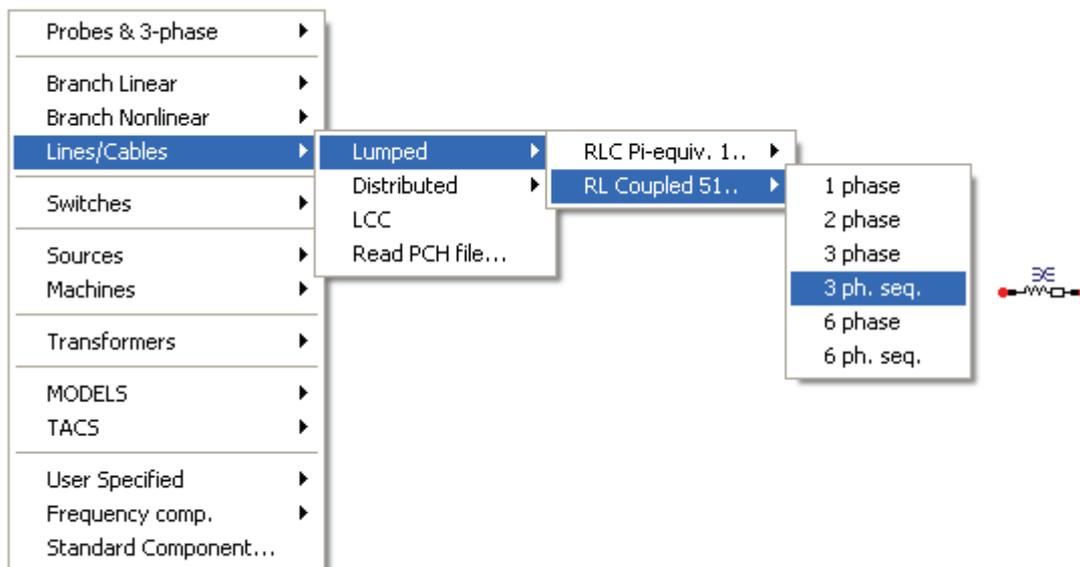


Figura 3.2 Ventana de datos para equivalente de Thevenin trifásico

3.1.2 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

El ATP dispone de modelos de líneas de transmisión de acuerdo al tipo de transitorios. Los circuitos π consideran parámetros concentrados y son una aproximación de los parámetros distribuidos y constantes, sin poder representar líneas con parámetros dependientes de la frecuencia, obteniendo una solución en estado estacionario exacta. El modelo K.C.Lee puede ser usado para obtener un modelo de línea transpuesta o no, con parámetros para una determinada frecuencia constante. El modelo Semlyen emplea aproximaciones de la impedancia característica y de la constante de propagación, originando inexactitudes, por lo que este modelo está considerado en desuso, como ha ocurrido con Weighting y Hauer.[12]

Los cálculos realizados en el modelo Taku Noda lo realiza en componentes de fase, sin recurrir a la matriz de transformación, el modelo Bergeron actúa igual que el modelo anterior, con la diferencia que se emplea para parámetros distribuidos. El modelo empleado para la presente simulación es JMartí que se particulariza en los párrafos siguientes.

3.1.2.1 Modelo JMartí

La impedancia característica y la función de propagación de ondas son obtenidas de características modales sobre un rango de frecuencia definido por la escala logarítmica, bajo la hipótesis de una matriz de transformación constante.

Luego los anteriores parámetros son sometidos a una función de alto orden racional de aproximación. En el dominio del tiempo, esta aproximación es representada por la suma de exponenciales reales, lo que permite el uso de métodos de convolución recursiva en el dominio del tiempo. El modelo JMartí considera parámetros dependientes de la frecuencia, siendo este modelo el más difundido para análisis de transitorios.

En el ATPDraw al escoger la opción del preprocesador LCC para implementar la línea, aparecen los datos correspondientes a las características principales de la línea y parámetros relacionados a la configuración física de los conductores de fase y guarda, respecto a la torre de transmisión, los mismos que se detallan a continuación [12]:

Rho: Resistividad del suelo en $\text{ohm}\cdot\text{m}$.

Freq. init Hz: Frecuencia inicial para la escala logarítmica.

Length: Longitud de la línea.

Datos específicos del modelo JMartí

- Decades: Número de décadas de la escala logarítmica.
- Freq. matrix Hz: Frecuencia a la cual se calcula la matriz de transformación.
- Points/Dec: Número de puntos de frecuencia por década.
- Freq. SS Hz: Frecuencia en estado estable.

Parámetros del tipo de sistema

1. Transposed: Se señala para los casos de líneas transpuestas.
2. Auto bundling: Si esta marcada indica si que se trabaja por conductor no por fase.
3. Seg. ground: Segmentación de cables de guarda. Si esta activada la opción se asume que el cable de guarda esta constantemente aterrado.
4. Skin effect: Si el icono esta activado se considera el efecto piel.
5. Real trans. matrix: Recomendado para simulación de transitorios.

Figura 3.3 Parámetros generales de la línea.

Datos de conductores:

- a) R_{in} : Radio interno del conductor (cm o inch).
- b) R_{out} : Radio externo del conductor (cm o inch).
- c) R_{resis} : Resistencia continua dc (ohm*km u ohm/mile).
- d) H_{horiz} : Distancia horizontal del centro del conductor a la referencia (m o feet).
- e) V_{tower} : Altura vertical del conductor en la torre (m o feet).
- f) V_{mid} : Altura vertical del conductor a medio vano (m o feet).

3.1.3 INTERRUPTORES

En el programa ATP existe varios modelos de interruptores como los controlados por tiempo o por voltaje, interruptores estadísticos, interruptores sistemáticos y de medición.

Para los interruptores controlados por tiempo las maniobras de cierre y apertura son realizadas una única vez y son determinadas por el tiempo especificado por el usuario.

Los interruptores estadísticos operan de acuerdo a los tiempos de cierre generados por una distribución estadística normal o uniforme, para considerar las distintas condiciones de operación con respecto al ciclo de la onda de voltaje [13].

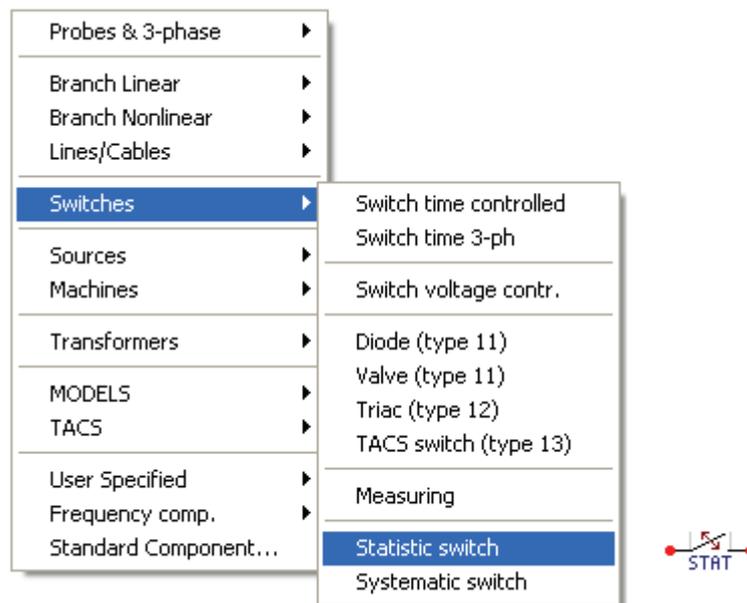


Figura 3.4 Ventana de la clase de interruptores

Los interruptores sistemáticos cierran en tiempos sistemáticamente variados, en incrementos iguales.

La secuencia de operación de los interruptores controlados por voltaje cierra en un tiempo mayor al especificado y la apertura se efectúa después de un intervalo de tiempo determinado igualmente por el usuario.

Los interruptores controlados por señales son aquellos que reciben señales provenientes de TACS (transients analysis control systems) para simular diodos y tiristores.

3.1.4 TRANSFORMADOR

Se ha optado por la rutina BCTRAN debido a que trabaja para cualquier número de devanados, y para unidades tanto monofásicas como trifásicas. Como muestra la Figura 3.6 es necesario especificar el número de fases, el número de bobinados, el tipo de núcleo y la frecuencia de ensayo. El cuadro de diálogo de formato se adapta el número de bobinados y fases. En virtud de las conexiones,

el cambio de fase de este menú se adapta a la configuración de todos los tipos desfase.

The screenshot shows the BCTRAN software interface with the following sections:

- Structure:**
 - Number of phases: 1
 - Number of windings: 3
 - Test frequency [Hz]: 60
 - AR Output
- Ratings:**

	HV	LV	TV
Voltage [kV]			
Power [MVA]			
Connections	A	A	A
- Factory tests:**
 - Open circuit | Short circuit
 - Performed at: LV | Connect at: LV
 - positive sequence**

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
- Positive core magnetization:**
 - Linear internal
 - External Lm
 - External Lm || Rm
- View/Copy:**
 - Rm
 - Lm-rms
 - Lm-flux
- Order:** 0 | **Label:** | **Factory test data** | Hide
- Comment:** [Text area]

Buttons at the bottom: OK, Cancel, Import, Save As, Run ATP, View +, Copy +, Help

Figura 3.5 Datos del BCTRAN

En los datos de la prueba de circuito abierto, el usuario puede especificar en que devanado se realiza la prueba y donde conectar la rama de excitación. El voltaje y la corriente son expresados en porcentaje y las perdidas en kW. En el caso de la prueba de corto circuito, es necesario indicar los valores de impedancia (%), potencia (MVA) y perdidas (kW) entre los devanados, como indica el cuadro de diálogo indicado en la Figura 3.6.

Factory tests

Open circuit | Short circuit

Performed at Connect at Zero sequence data available

positive sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)

Figura 3.6 Datos de prueba de corto circuito

3.1.5 DESCARGADORES DE VOLTAJE O PARARRAYOS

Para la representación del pararrayos se emplean resistencias no lineales para cumplir las condiciones de operación de un pararrayos, es decir, que en operación normal se comporte como una resistencia alta, y como una resistencia baja durante sobrevoltajes.

El modelo más difundido para la simulación de pararrayos es la resistencia no lineal con característica exponencial “Type 92” [14].

Para caracterizar la operación del descargador, se requiere ingresar los siguientes datos:

1. NFLASH:
 - 1: Gap descarga una vez y permanece cerrado.
 - 0: Gap se cierra y se abre tantas veces como sea necesario.
 - 1: Gap se cierra y abre una vez, luego se borra.
2. RLIN: resistencia lineal en ohms.
3. Vflash: Voltaje por contorno en el gap.
4. Vzero: Voltaje inicial en la iteración de Newton. En la mayoría de casos cero esta bien.

Component: NLRES92.SUP

Attributes | Characteristic

DATA	VALUE
NFLASH	0
RLIN	0
Vflash	-1
Vzero	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Order: Label:

Comment:

Output: Hide Lock



Figura 3.7 Parámetros de la resistencia no lineal “type92”

CAPITULO IV

4. COMPONENTES DEL SISTEMA

A continuación se indican los diagramas unifilares modelados, bajo ambos escenarios de la línea de transmisión Quevedo Totoras.

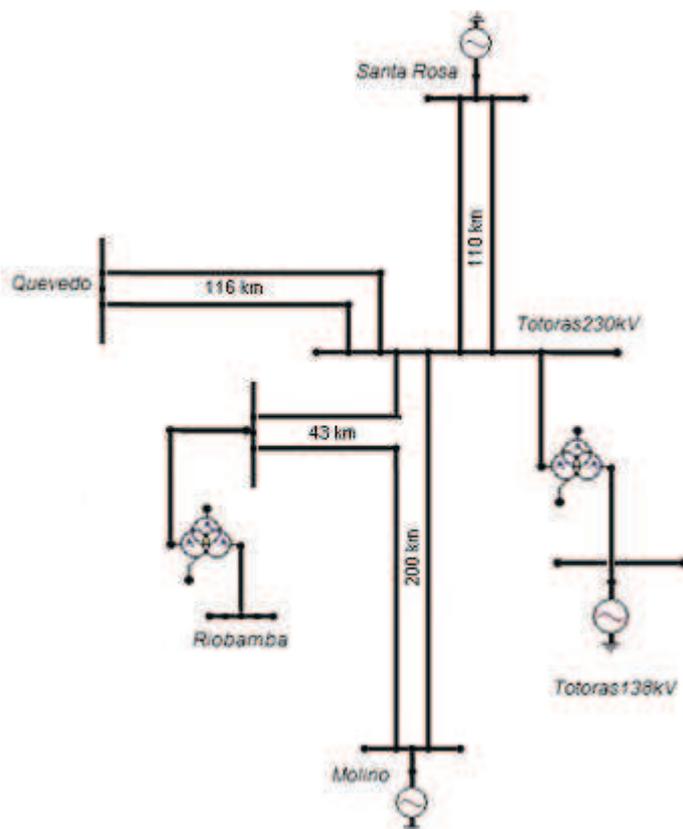


Figura 4.1 Diagrama Unifilar del sistema modelado, visto desde Totoras a Quevedo.

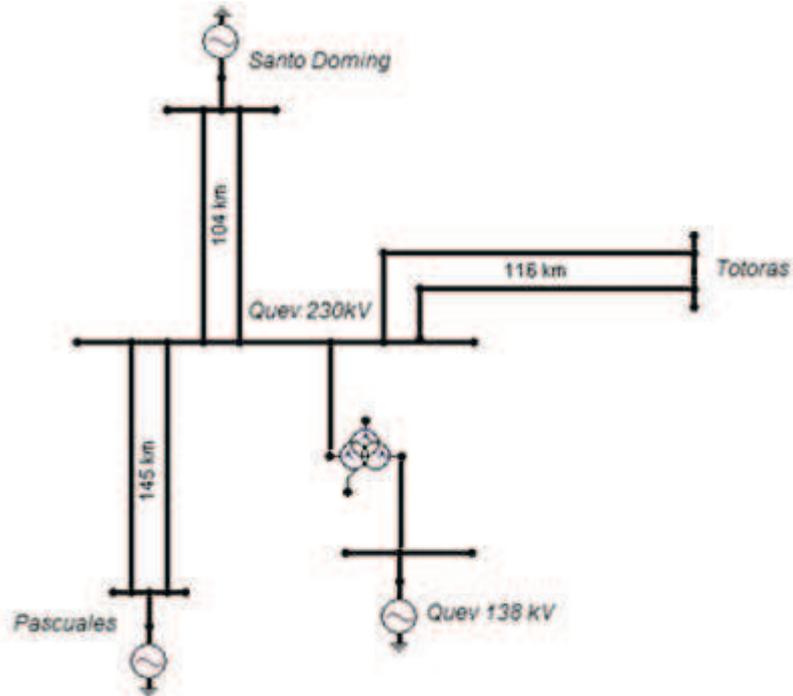


Figura 4.2 Diagrama Unifilar del sistema modelado, visto desde Quevedo a Totoras.

4.1 EQUIVALENTES DE RED

Mediante el empleo del software DigSilent Power Factory 13.2, se calculó los valores de resistencia e inductancia equivalente en distintas barras del sistema:

Parámetros equivalentes (Ω/m)	Santo Domingo 230 kV	Santa Rosa 230 kV	Pascuales 230 kV	Molino 230 kV	Quevedo 138 kV	Totoras 138 kV
Rsec 0	1,144	0,710	0,534	0,080	1,722	2,128
Rsec +	5,240	3,196	1,323	0,241	3,241	2,159
Lsec 0	27,590	12,651	8,528	4,696	18,511	15,934
Lsec +	79,464	34,568	27,823	10,134	29,112	19,201

Tabla 4.1 Equivalentes de red en distintos puntos del sistema.

Debido a que en el ATP el voltaje se ingresa en términos pico y por fase, el valor en la fuente trifásica será calculado de la siguiente manera [16]:

$$V_{p_{f-n}} = \frac{V_{rms} * \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Para el caso de 230 kV:

$$V_{p_{f-n}} = \frac{230 * \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 187.794kV$$

4.2 LÍNEA DE TRASMISIÓN

Los parámetros generales para la modelación como los datos estándares, tipo tanto del sistema como de la línea, unidades y datos correspondientes a la escala logarítmica se indican en la Figura 4.3

Figura 4.3 Datos generales del modelo JMarti.

La escala logarítmica de frecuencias tiende a comprimir los datos y poner énfasis a las características predominantes, cuando las frecuencias de los puntos extremos guardan una razón de 10:1 se denomina década a cada intervalo. Típicamente ambos valores de las décadas y puntos por década para un estudio transitorio son de 10. Entre tanto, la frecuencia a la cual se realizan los cálculos en estado estable, es la misma que la indicada en la fuente de voltaje, mientras que la frecuencia matriz generalmente para líneas aéreas es de 50kHz.

El tipo de conductor utilizado para las fases de la línea Quevedo Totoras, es el ACAR 1200 18/19 y el conductor de guarda empleado es de acero galvanizado 3/8", sus características principales (radio interno, radio externo, resistencia) y los datos que describen su geometría en la torre se muestran en la Figura 4.4.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	1.14	1.6	0.0513	1	38.4	21.5
2	2	1.14	1.6	0.0513	0	32.2	14.5
3	3	1.14	1.6	0.0513	1	26	7.5
4	4	1.14	1.6	0.0513	8.5	38.4	21.5
5	5	1.14	1.6	0.0513	9.5	32.2	14.5
6	6	1.14	1.6	0.0513	8.5	26	7.5
7	0	0	0.45	3.75	2.5	43.4	37.5
8	0	0	0.45	3.75	7	43.4	37.5

Figura 4.4 Características principales y configuración física de los conductores.

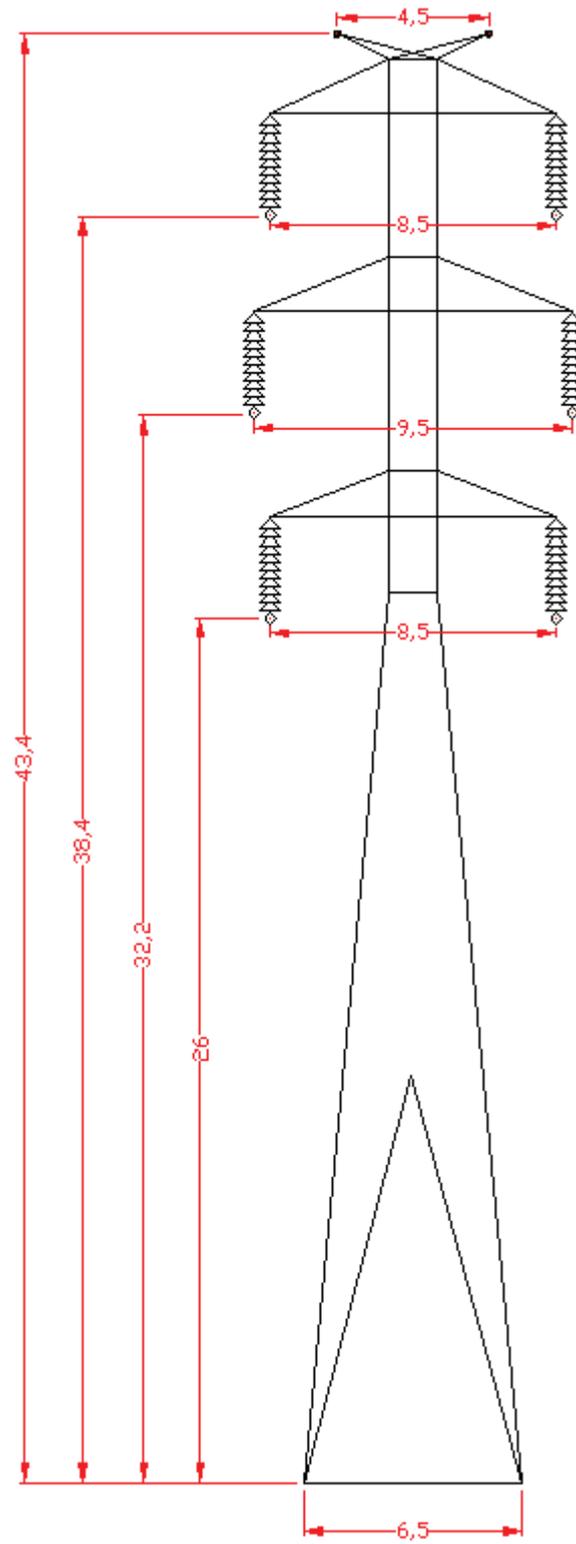


Figura 4.5 Esquema de la Torre de Transmisión doble circuito a 230 kV.

Línea de Transmisión	Longitud (km)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Quevedo - Totoras	116	120
Quevedo - Santo Domingo	104	40
Quevedo - Pascuales	145	70
Totoras - Santa Rosa	110	300
Totoras - Molino	200	300
Totoras - Riobamba	43	200

Tabla 4.2 Parámetros de Líneas de Transmisión.

4.3 INTERRUPTORES

El interruptor seleccionado es el estadístico, para conseguir representar la operación real del interruptor, se consideran tiempos de actuación aleatorios. Los tiempos de operación son generados de acuerdo a la distribución estadística de tipo normal, resultante del tiempo medio y la desviación estándar normal, cuyos valores son 6 ms y 1.33 ms, respectivamente, estimados de acuerdo a estudios realizados en múltiples maniobras [16]. Una restricción de este interruptor, es que no contempla su característica dieléctrica, es decir, no muestra la existencia de la Reignición del Arco, cuando la tensión de reestablecimiento supera la rigidez dieléctrica existente entre polos del interruptor.

4.4 TRANSFORMADOR

Los parámetros generales para la modelación del transformador, en base a BCTRAN y los datos de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito, proporcionados en los reportes de pruebas, se muestran en las figuras siguientes.

La curva de saturación, está conectada al terciario, consiste de una rama no lineal Type 98 [14], que simula la característica antes referida del transformador. En el inductor no lineal es necesario ingresar los datos de flujo y corriente obtenidos previamente como resultado de la transformación de los datos de voltaje y corriente, a través de la librería SATURATION Figura 4.6, bajo un formato preestablecido de posiciones desarrollado según el Rule Book del programa ATP.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1 2 3 4 5 6 7 8	9 0 1 2 3 4 5 6	7 8 9 0 1 2 3 4	5 6 7 8 9 0 1 2	3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
FREQ	VBASE	SBASE	PUNCH	KTHIRD				

Figura 4.6 Formato de la tarjeta de especificaciones.

- **FREQ:** Frecuencia (Hz) de la fuente de voltaje
- **VBASE:** Voltaje (kV) del devanado al cual se refirió las pruebas de circuito abierto.
- **SBASE:** Potencia del devanado al cual se refirió las pruebas de circuito abierto.
- **IPUNCH:** Parámetro de inclusión de la curva.
 - 0: Si la curva no será considerada en el archivo de salida.
 - 1: Si la curva es considerada en el archivo de salida punch.
- **KTHIRD:** Parámetro de control del tipo de salida.
 - 0: Sólo primer cuadrante la curva de salida.
 - 1: Gráfico de salida en el primer y tercer cuadrante.

```

SAT_QUEVEDO - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
C <++++++> Cards punched by support routine on 05-Feb-09 11.03.36 <++++++>
C SATURATION
C $ERASE
C 60 13.8 5 1 1
C 0.007010 0.9
C 0.012779 1.0
C 0.034141 1.1
C 9999
-2.85985787E+01 -5.69450070E+01
-9.69658359E+00 -5.17681882E+01
-3.59189749E+00 -4.65913694E+01
3.59189749E+00 4.65913694E+01
9.69658359E+00 5.17681882E+01
2.85985787E+01 5.69450070E+01
9999

```

Figura 4.7 Archivo de salida (flujo y corriente).

BCTTRAN: ATT1queve

Structure

Number of phases: 1

Number of windings: 3

Test frequency [Hz]: 60

AR Output Auto-add nonlinearities

Ratings

	HV	LV	TV
Voltage [kV]	230	138	13.8
Power [MVA]	55.55	55.55	15
Connections	A	A	A

Ext. neutral connections

Factory tests

Open circuit **Short circuit**

Performed at: TV Connect at: TV

positive sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
110	0.307	33.50
100	0.115	22.90
90	0.063	17.80

Positive core magnetization:

Linear internal External Lm External Lm || Rm

View/Copy:

Rm Lm-rms Lm-flux

Order: 0 Label: Hide

Comment:

OK Cancel Import Export Run ATP View + Copy + Edit defin. Help

Figura 4.8 a) Parámetros generales del modelo BCTTRAN, para el transformador de Quevedo 230/138 kV.

positive sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
HV-LV	0.15702	9	18.6
HV-TV	0.20556	9	17
LV-TV	0.1511	9	11.5

Figura 4.8 b) Datos de la prueba de cortocircuito

Figura 4.8 Datos de BCTTRAN de Quevedo.

BCTTRAN: ATT1toto

Structure

Number of phases: 1

Number of windings: 3

Test frequency [Hz]: 60

AR Output Auto-add nonlinearities

Ratings

	HV	LV	TV
Voltage [kV]	230	138	13.8
Power [MVA]	55.55	55.55	15
Connections	A	A	A

Ext. neutral connections

Factory tests

Open circuit: Short circuit:

Performed at: TV Connect at: TV

positive sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
110	0.322	39.5
100	0.110	24.70
90	0.081	18.90

Positive core magnetization

Linear internal External Lm External Lm || Rm

View/Copy

Rm Lm-rms Lm-flux

Order: 0 Label:

Comment:

OK Cancel Import Export Run ATP View + Copy + Edit defin. Help

Figura 4.9 a) Parámetros generales del modelo BCTTRAN, para el transformador de Totoras 230/138 kV.

positive sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
HV-LV	0.1423	9	20.3
HV-TV	0.2216	9	17.7
LV-TV	0.1408	9	10.4

Figura 4.9 b) Datos de la prueba de cortocircuito.

Figura 4.9 Datos de BCTTRAN de Totoras.

BCTRAN: ATT1riob

Structure

Number of phases: 1

Number of windings: 3

Test frequency [Hz]: 60

AR Output Auto-add nonlinearities

Ratings

	HV	LV	TV
Voltage [kV]	230	69	13.8
Power [MVA]	33.33	33.33	10
Connections	A	A	A

Ext. neutral connections

Factory tests

Open circuit **Short circuit**

Performed at: TV Connect at: TV

positive sequence

Volt (%)	Curr (%)	Loss (kW)
110	1.47	38.92
100	0.25	23.70
90	0.11	17.54

Positive core magnetization

Linear internal External Lm External Lm || Rm

View/Copy

Rm Lm-rms Lm-flux

Order: 0 Label: Hide

Comment:

OK Cancel Import Export Run ATP View + Copy + Edit defin. Help

Figura 4.10 a) Parámetros generales del BCTRAN Riobamba.

positive sequence

	Imp. (%)	Pow. (MVA)	Loss (kW)
HV-LV	9.93	20	43.33
HV-TV	16.9	20	58.11
LV-TV	5.16	20	44.44

Figura 4.10 b) Datos de la prueba de cortocircuito
Figura 4.10 Datos del transformador de Riobamba.

4.5 DESCARGADORES DE VOLTAJE O PARARRAYOS

El uso de pararrayos en los terminales de la línea es una alternativa para el control de los sobrevoltajes, debido a que gracias a su no linealidad se comportará como un aislador en condiciones normales, mientras que, en la presencia de altos de voltajes, aparece la conducción de corriente de descarga, y consecuentemente la reducción de voltaje.

En el programa ATP el pararrayos es representado con la rama no lineal MOV Type-92 que contiene la característica corriente voltaje, extrapolada en forma exponencial.

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN DIGITAL

5. IMPLEMENTACIÓN DIGITAL

Seguido a la implementación del modelo, es necesario considerar los eventos más representativos, los sobrevoltajes originados por maniobras y por fallas, para puntualizar las simulaciones a realizarse, se citan, a continuación, estos casos.

Para el análisis de los voltajes de maniobra en la línea de transmisión Quevedo – Totoras de 230 kV desde la subestación Totoras se ha simulado el sistema eléctrico que se indica en la figura 5.1, mientras que para el análisis de los voltajes producidos en la misma línea pero al realizar las maniobras en la subestación Quevedo se ha modelado el sistema que se indica en la figura No. 5.2

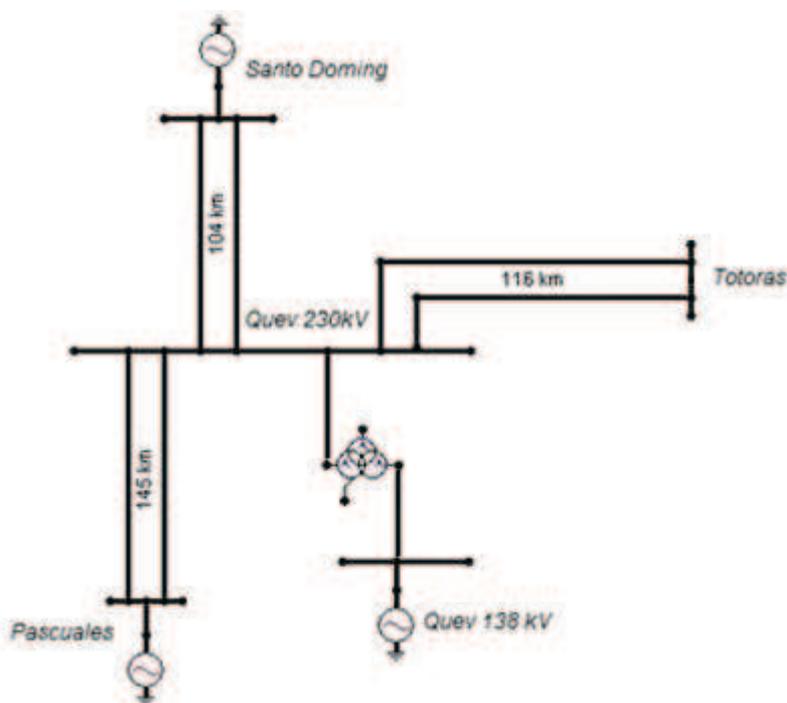


Figura 5.1 Sistema modelado para la energización del segundo circuito de la línea desde Quevedo a Totoras.

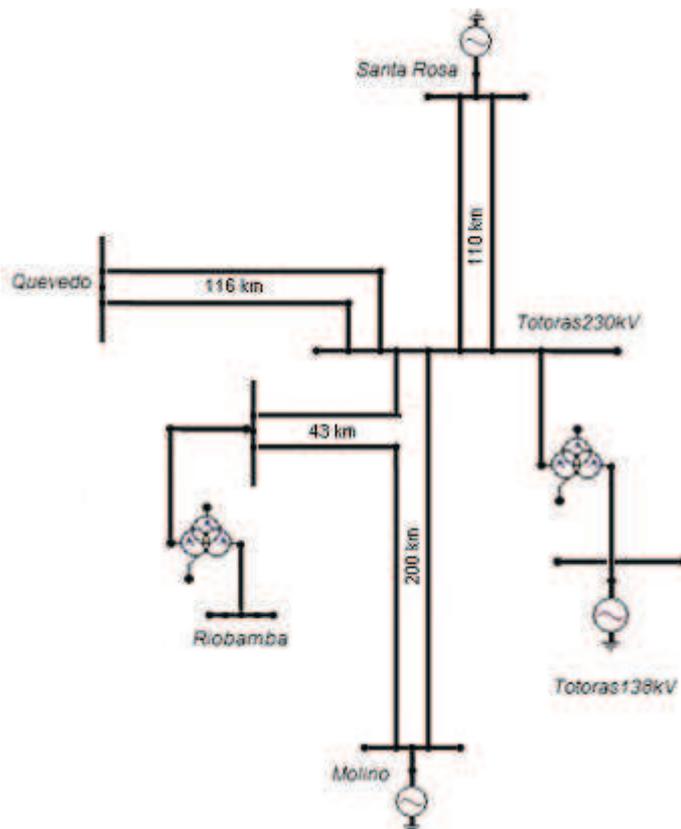


Figura 5.2 Sistema modelado para la energización del segundo circuito de la línea desde Totoras a Quevedo.

5.1. SOBREVOLTAJES TEMPORALES

A continuación se calcula los sobrevoltajes por efecto ferranti y por falla fase a tierra, este último de utilidad para el dimensionamiento de los descargadores de sobretensiones (pararrayos).

5.1.1. Efecto Ferranti

Para corroborar lo escrito en el capítulo dos, con relación al efecto Ferranti, se puede observar en las tablas 5.1 y 5.2 y en las figuras 5.3 y 5.4, el aumento de voltaje al permanecer un extremo de línea de transmisión abierto.

Voltaje base para el sistema: $230\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV

Voltaje pu	Quevedo	Totoras
1er Circuito	1,046	1,057
2do circuito	1,054	1,064

Tabla 5.1 Voltajes en por unidad, por Efecto Ferranti, escenario Quevedo Totoras

Voltaje pu	Quevedo	Totoras
1er Circuito	1,059	1,045
2do circuito	1,061	1,059

Tabla 5.2 Voltajes en por unidad, por Efecto Ferranti, escenario Totoras Quevedo

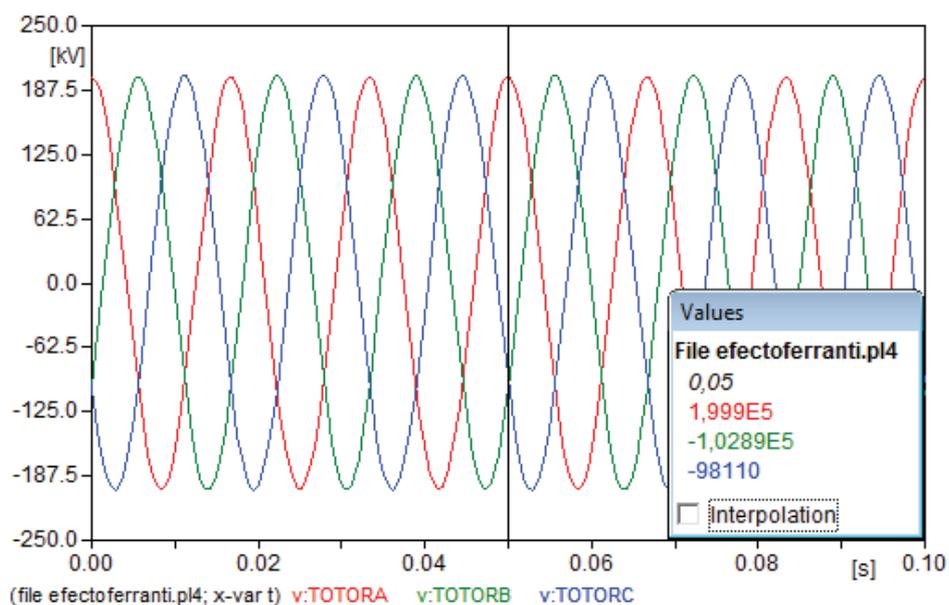


Figura 5.3 Voltaje en Totoras, segundo circuito conectado, desde Quevedo.

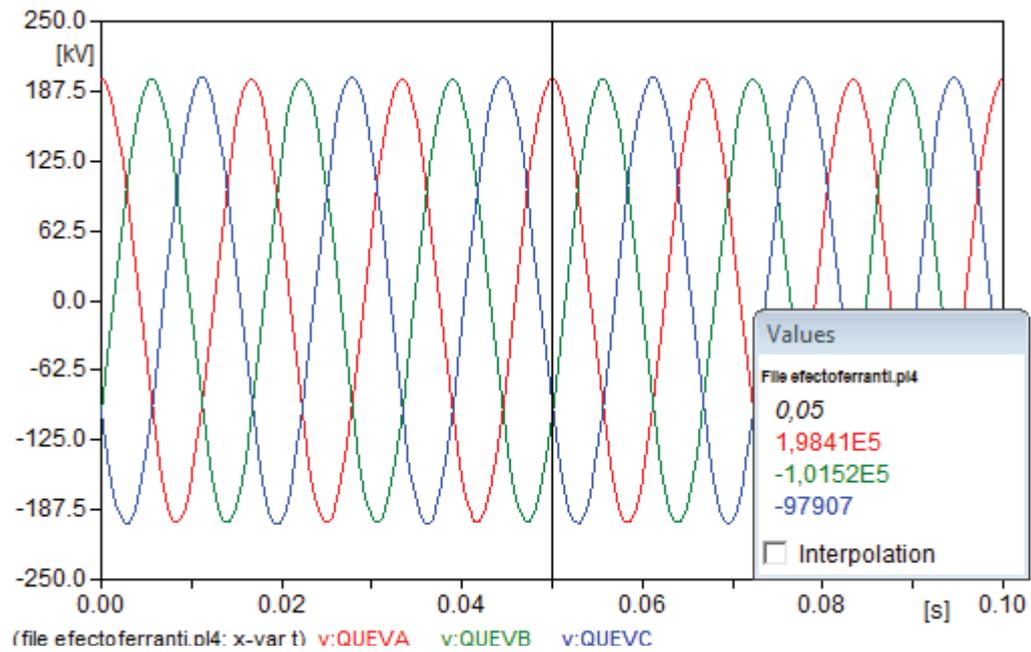


Figura 5.4 Voltaje en Quevedo, segundo circuito conectado, desde Totoras.

5.1.2. Falla fase - tierra

Un falla fase - tierra origina un aumento de voltaje en las fases sanas, este fenómeno se observa claramente, en la Figura 5.6 al provocar una falla fase - tierra en el extremo de Quevedo, y en la Figura 5.7, cuando se presenta una falla fase - tierra en el extremo de Totoras.

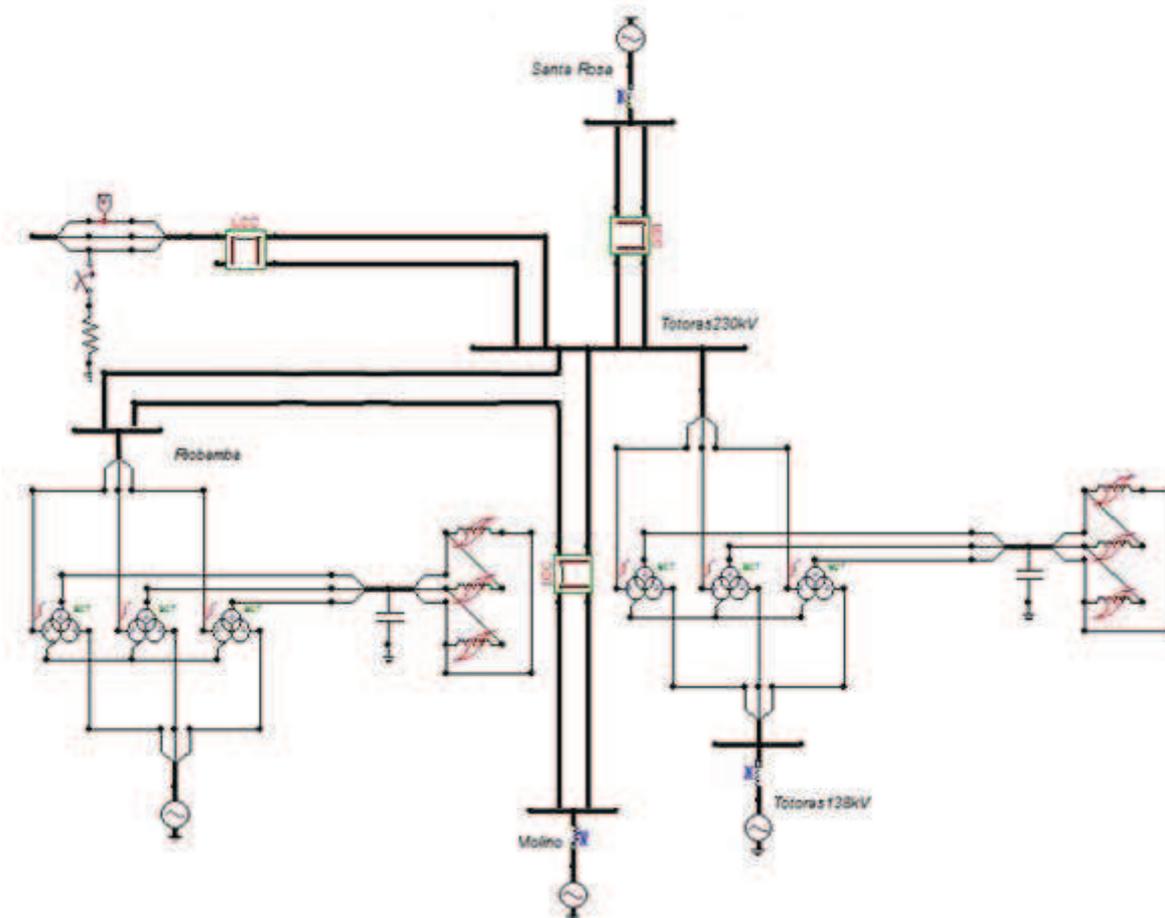


Figura 5.5 Modelo del cortocircuito monofásico, escenario Totoras - Quevedo

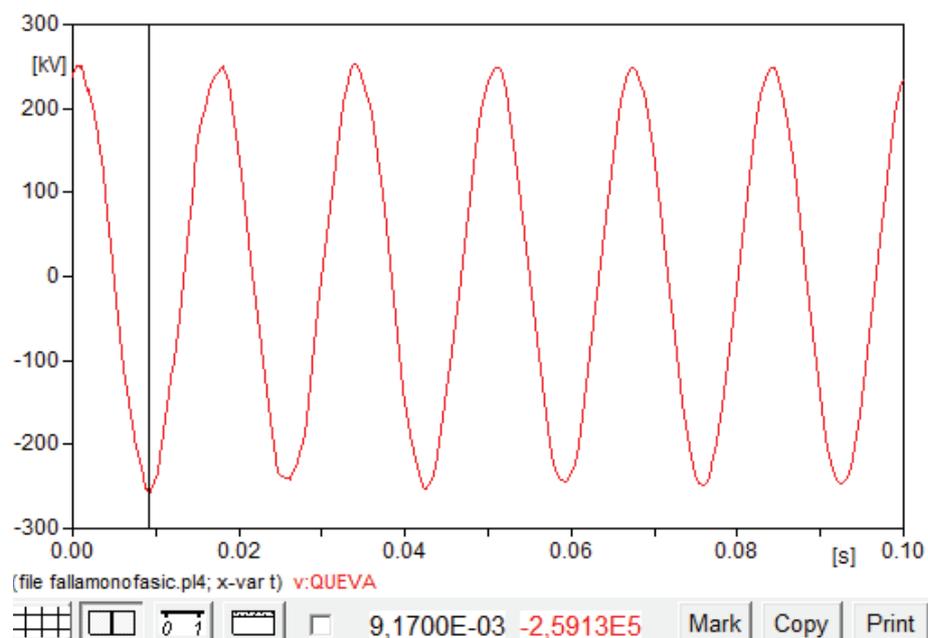


Figura 5.6 Comportamiento del voltaje en la fase sana, al producirse una falla en Quevedo.

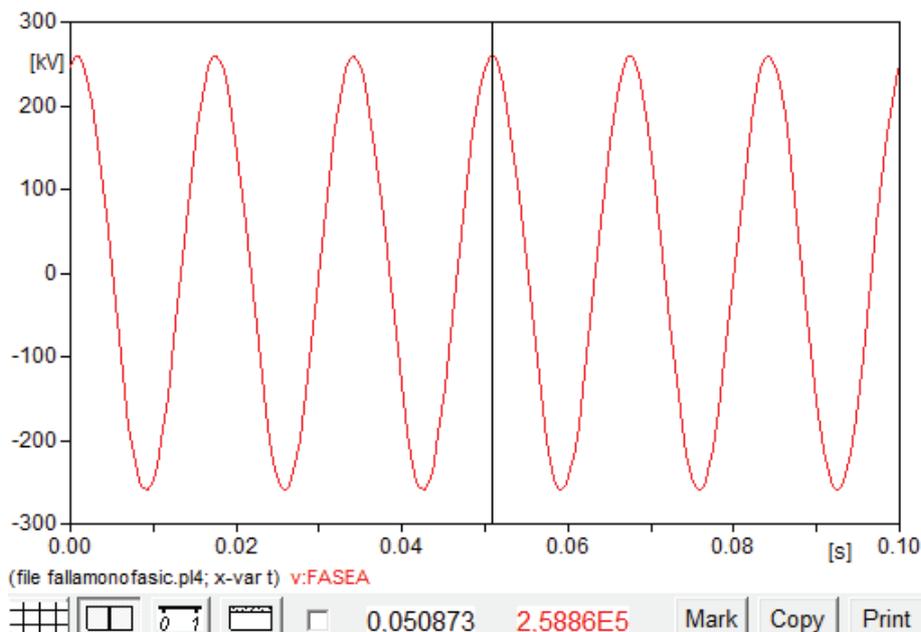


Figura 5.7 Comportamiento del voltaje en la fase sana, al producirse una falla en Totoras.

Con los valores antes obtenidos se puede calcular el factor de falla a tierra, explicado en el Capítulo 2, ítem 2.3.2.1.3, bajo ambos escenarios Quevedo Totoras y viceversa

$$\delta_{\text{QUEVEDO-TOTORAS}} = \frac{|U_{E_{\text{TOTORAS}}}|}{\left[\frac{U_M}{\sqrt{3}} \right]} = \frac{258860}{187794} = 1.378$$

$$\delta_{\text{TOTORAS-QUEVEDO}} = \frac{|U_{E_{\text{QUEVEDO}}}|}{\left[\frac{U_M}{\sqrt{3}} \right]} = \frac{259130}{187794} = 1.379$$

5.1.3 Selección del Pararrayos

La selección del pararrayos se hace efectiva calculando los parámetros anteriores, correspondientes a los sobrevoltajes temporales y comparándolos con los dados en catálogos de fabricante ABB mostrados en los anexos respectivos.

- *Voltaje de operación continua del pararrayos (V_c)*

Es el valor máximo admisible de voltaje eficaz a frecuencia industrial que puede aplicarse de forma permanente en los bornes de un pararrayos y corresponde al voltaje máximo que el pararrayos es capaz de soportar cuando está operando en la zona de predescarga.

$$V_c \leq 1.05 * \frac{V_s}{\sqrt{3}}$$

Donde:

V_s es el voltaje máximo del sistema

$$V_c \leq 1.05 * \frac{245}{\sqrt{3}}$$

$$V_c \leq 148.523kV$$

- *Tensión asignada o nominal (V_r)*

Es el valor eficaz máximo de voltaje a frecuencia industrial admisible entre sus terminales para el cual está previsto su funcionamiento correcto en condiciones de sobretensiones temporales establecidas.

La tensión nominal corresponde al valor eficaz máximo de voltaje a frecuencia industrial que es capaz de soportar durante 10 segundos, después de haber sometido al pararrayos a impulsos de corriente de larga duración según la norma IEC 60099-4.

La tensión asignada se utiliza como un parámetro de referencia para la especificación de las características de funcionamiento.

- *Capacidad para soportar sobrevoltajes temporales*

Es la capacidad para soportar sobretensiones temporales TOV. Es el valor eficaz del máximo sobrevoltaje temporal a frecuencia industrial que es capaz de soportar entre sus terminales durante un tiempo determinado. Los fabricantes

proporcionan gráficas con la variación del TOV para distintos valores de tiempo. Los valores referenciales usualmente corresponden para 1 y 10 s.

$$TOV_{C(10s)} \geq U_{eq} = \frac{k \cdot U_s}{\sqrt{3}} \cdot \left[\frac{Tt}{10} \right]^m$$

Cálculo de la tensión nominal mínima V_r , min

$$V_{r,\min} \geq 1.25 * V_C$$

$$V_{r,\min} \geq 1.25 * 148.523$$

$$V_{r,\min} \geq 185.654 kV_{rms_f-t}$$

Tensión nominal en función de la sobretensión V_r'

$$V_r' pu = \frac{TOV}{k_{TOV}}$$

Donde:

TOV sobrevoltaje temporal a ser analizado

k_{TOV} factor de sobrevoltaje, obtenido mediante la curva de la Figura 5.8

En el caso de un cortocircuito monofásico en Quevedo el valor de TOV es de 1.56 en por unidad y si la falla se da en Totoras TOV es 1.34 en por unidad.

$$V_r' pu_{TOTORAS} = \frac{1.56}{1.225} = 1.27$$

$$V_r' pu_{QUEVEDO} = \frac{1.34}{1.225} = 1.09$$

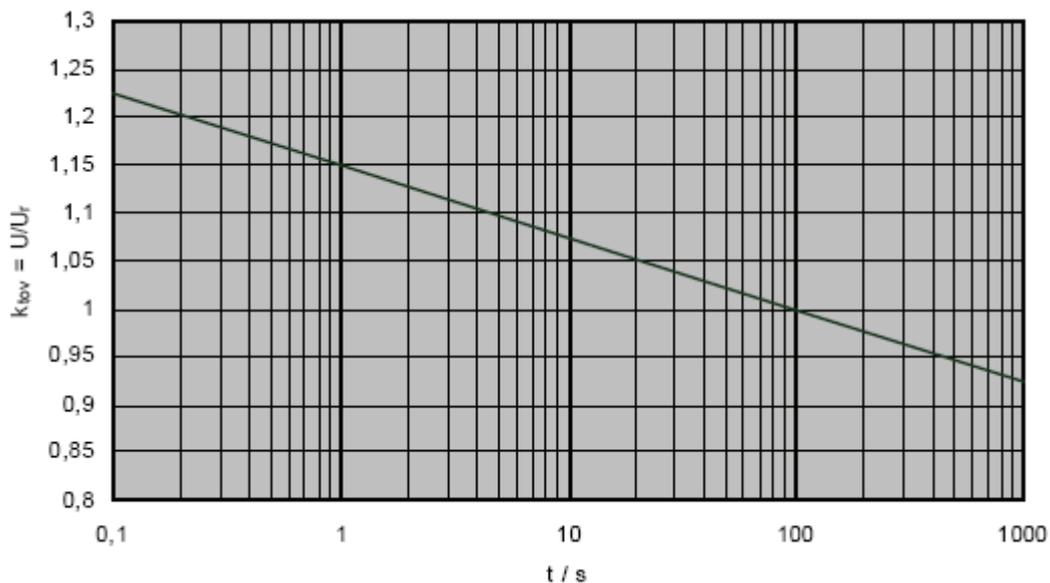


Figura 5.8 Curva característica k_{TOV} - tiempo

$$V_r' = V_r' pu_{TOTORAS} * V_{fase-tierra}$$

$$V_r' = 1.27 pu * \frac{200.042}{\sqrt{2}}$$

$$V_r' = 179.712kV_{rms_f-t}$$

$$V_{rTOTORAS} \geq \max(V_r', V_{r,min})$$

$$V_{rTOTORAS} \geq 185.564kV_{rms_f-t}$$

$$V_r' = V_r' pu_{QUEVEDO} * V_{fase-tierra}$$

$$V_r' = 1.09 pu * \frac{200.042}{\sqrt{2}}$$

$$V_r' = 154.24kV_{rms_f-t}$$

$$V_{rQUEVEDO} \geq \max(V_r', V_{r,min})$$

$$V_{rQUEVEDO} \geq 185.564kV_{rms_f-t}$$

Con los dos parámetros anteriores determinados se puede especificar el pararrayos a ubicarse en la línea de acuerdo a los catálogos anexados de ABB.

La característica para una onda de impulso de maniobra 30/60 μ s correspondiente al pararrayos seleccionado PEXLIM Q del fabricante ABB es la siguiente:

Característica de operación	
Corriente (kA)	Voltaje (kV)
0,5	369
1	381
2	396

Tabla 5.3 Característica del pararrayos

5.2. SOBREVOLTAJES DE FRENTE LENTO O DE MANIOBRA

Al energizar la línea se consideran dos escenarios, energizar desde un extremo de la línea al otro y viceversa.

Los resultados de la simulación se muestran como una tabulación estadística de las cien energizaciones por polo del interruptor [18], efectuadas en el programa.

Los siguientes casos simulados de maniobras en líneas de transmisión, como en la realidad ocurren, se han considerado la inclusión de pararrayos, en ambos extremos, debido a que, estos no son empleados únicamente para control de sobrevoltajes de maniobra sino como elementos de protección de descargas atmosféricas

5.2.1 ENERGIZACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DESDE QUEVEDO A TOTORAS.

5.2.1.1 Energización del primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras.

Se realizan 100 maniobras por polo del interruptor, con pararrayos en los extremos de la línea de transmisión.

Con la finalidad de determinar los valores extremos de voltaje de energización se ha creído conveniente analizar los casos que se indican. Dos de los cuales son probables de producirse en el proceso de restablecimiento después de que se ha producido un colapso parcial o total en el sistema.

Los casos analizados son los siguientes:

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo.

Caso 2: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Santo Domingo.

Caso 3: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Pascuales.

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presenta en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,434	0,096	1,777	1,840	0,054	2,090
2	1,632	0,104	2,054	1,857	0,052	2,098
3	1,458	0,089	1,781	1,458	0,089	1,781

Tabla 5.4 Resultados estadísticos al energizar el primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo Totoras

Emed: Valor medio o promedio, en por unidad, obtenido en 100 maniobras por polo del interruptor.

Des. Std: Desviación Estándar en porcentaje.

E_2 : Sobrevoltaje de maniobra estadístico, en por unidad, con una probabilidad de ser excedido del 2 %.

Voltaje base para el sistema: $230\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV

5.2.1.2 Energización del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras.

Se analizan los siguientes casos:

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo.

Caso 2: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Santo Domingo.

Caso 3: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Pascuales.

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presentan en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,251	0,0492	1,405	1,793	0,0665	2,091
2	1,34	0,0854	1,626	1,803	0,0565	2,058
3	1,297	0,05567	1,478	1,766	0,0773	2,107

Tabla 5.5 Resultados estadísticos al energizar el segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo Totoras.

5.2.2 ENERGIZACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DESDE TOTORAS A QUEVEDO.

5.2.2.1 Energización del primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo.

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Santa Rosa.

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Molino.

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presentan en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,709	0,129	2,260	1,279	0,0602	1,471
2	1,822	0,0673	2,129	1,344	0,0748	1,595
3	1,819	0,0826	2,195	1,442	0,1329	1,921

Tabla 5.6 Resultados estadísticos al energizar del primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.

5.2.2.2 Energización del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Santa Rosa.

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Molino

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presentan en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,748	0,118	2,264	1,19	0,0313	1,283
2	1,775	0,0788	2,125	1,23	0,047	1,375
3	1,777	0,106	2,248	1,248	0,0499	1,404

Tabla 5.7 Resultados estadísticos al energizar el segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo

5.2.3. RECIERRE DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN QUEVEDO - TOTORAS

Se simula recierre trifásico, considerando la filosofía implementada en el Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano: es permitido únicamente en sistemas de transmisión doble circuito, ante fallas existentes en uno de los circuitos, siempre que esté habilitado el otro circuito.

El recierre automático se efectúa para condiciones en vacío de la línea de transmisión. El análisis del recierre, igual que para los casos anteriores en forma estadística, con 100 maniobras por polo del interruptor.

Secuencia de recierre:

- 1.- Apertura del interruptor 1 a los 20 ms.
- 2.- Cierre del interruptor 2 a los 100 ms, solo para fines de simulación, en la realidad este tiempo es de 300 ms.

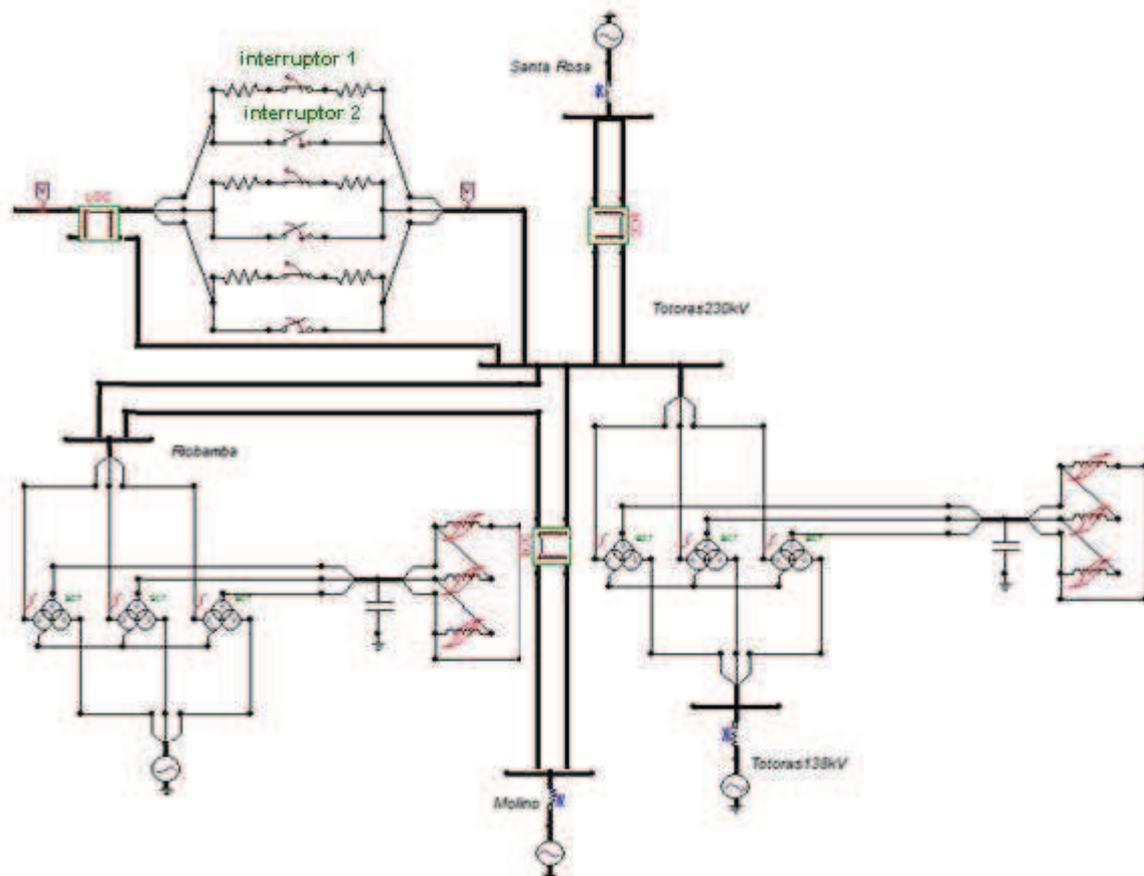


Figura 5.9 Modelo para la simulación del recierre del segundo circuito. Escenario Totoras Quevedo.

5.2.3.1 Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras.

El caso analizado es el siguiente:

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo:

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,451	0,082	1,748	1,881	0,144	2,558

Tabla 5.8 Resultados estadísticos correspondientes al recierre del segundo de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras.

5.2.3.2 Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.

El caso analizado es el siguiente:

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo:

	Quevedo			Totoras		
Caso	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,783	0,092	2,193	1,246	0,076	1,483

Tabla 5.9 Recierre del segundo de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo.

5.3. ANALISIS DE SOBREVOLTAJES CONSIDERANDO ELEMENTOS DE CONTROL

Los sobrevoltajes en un sistema no pueden ser evitados, pero pueden ser controlados por diversos métodos de fácil aplicación que se indican.

5.3.1. RESISTENCIAS DE PREINSERCIÓN

Se ha considerado resistencias de preinserción de 400 ohmios por polo, en consideración a que la impedancia característica de la línea de transmisión es de alrededor de este valor, y un tiempo de inserción de las resistencias de 8 ms.

El tiempo de preinserción obedece la condición que la resistencia no debe ser cortocircuitada antes que la primera reflexión en el extremo abierto de la línea retorne al terminal de la fuente, por consiguiente el tiempo de permanencia debe ser menor que dos veces el tiempo que requiere la onda para alcanzar el extremo tránsito de la línea, debido a que, si la resistencia es cortocircuitada antes que la onda de energización original haya regresado al extremo de la fuente, resulta el mismo valor máximo de sobrevoltaje que si no hubiese resistencia.

En el caso de energizar la línea, el interruptor A cierra, colocándose la resistencia total de 400 ohmios en serie con la línea de transmisión, luego del período de inserción se cierra el interruptor B cortocircuitando la resistencia principal.

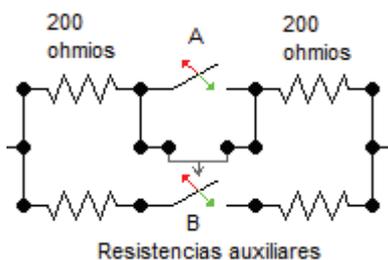


Figura 5.10 Resistencias de preinserción.

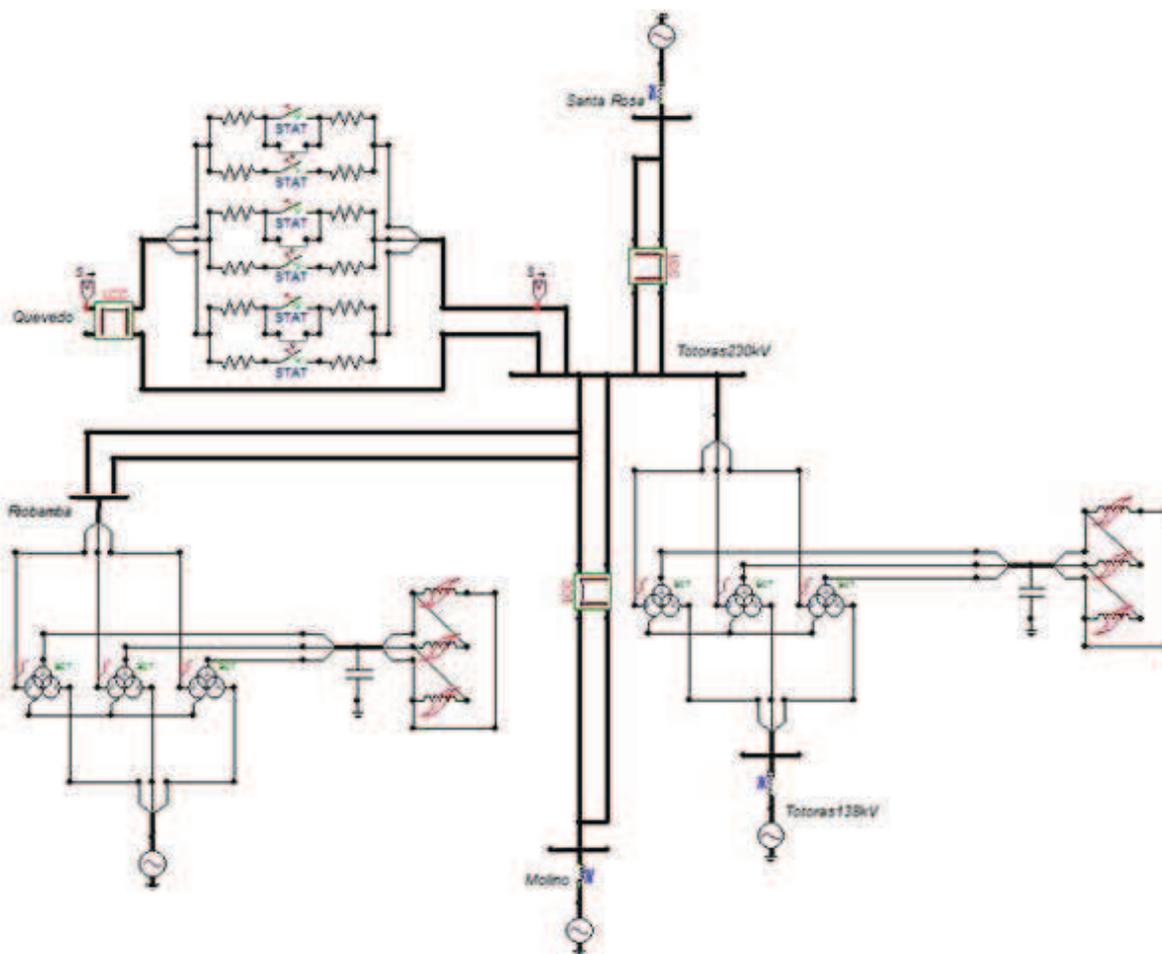


Figura 5.11 Sistema modelado para la energización empleando resistencias de preinserción.

5.3.1.1 Maniobras en la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras, con interruptores con resistencias de preinserción.

5.3.1.1.1 Energización del primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Santo Domingo..

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Pascuales.

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presentan en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,259	0,080	1,511	1,312	0,092	1,612
2	1,384	0,116	1,785	1,372	0,093	1,692
3	1,394	0,104	1,756	1,379	0,090	1,691

Tabla 5.10. Energizaciones del primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.

5.3.1.1.2 Energización del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Santo Domingo..

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Pascuales.

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presentan en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,181	0,050	1,328	1,242	0,067	1,449
2	1,231	0,071	1,451	1,277	0,072	1,506
3	1,274	0,058	1,458	1,323	0,054	1,503

Tabla 5.11. Energizaciones del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.

5.3.1.1.3 Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción

La modelación de recierres con resistencias de preinserción se requiere agregar un interruptor controlado por tiempo adicional, que originalmente estaba abierto y durante la simulación permanece cerrado para conseguir el efecto real de esta maniobra

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,121	0,070	1,317	1,214	0,092	1,493

Tabla 5.12 Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Resistencias de Preinserción.

5.3.1.2 Maniobras en la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de preinserción

5.3.1.2.1 Energización del primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de Preinserción.

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Santa Rosa.

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Molino

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presentan en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,190	0,050	1,338	1,188	0,047	1,328
2	1,240	0,063	1,434	1,226	0,062	1,417
3	1,290	0,152	1,780	1,176	0,130	1,558

Tabla 5.13. Energizaciones del primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de Preinserción.

5.3.1.2.2 Energización del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de Preinserción

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Santa Rosa.

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Molino

Los resultados obtenidos para cada uno de los casos indicados, se presentan en el siguiente cuadro.

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,180	0,037	1,289	1,160	0,036	1,263
2	1,216	0,043	1,346	1,185	0,057	1,353
3	1,202	0,088	1,466	1,179	0,098	1,469

Tabla 5.14. Energizaciones del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo, con Resistencias de Preinserción.

5.3.1.2.3 Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de Preinserción

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,213	0,041	1,337	1,182	0,088	1,441

Tabla 5.15. Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Resistencias de Preinserción

5.3.2 USO DE INTERRUPTORES CON MANDO SINCRONIZADO

Otro método para reducir el sobrevoltaje es controlar el instante de cierre del disyuntor a través del uso de un sincronizador que determina, que el cierre de los polos del disyuntor ocurra próximo al cero del voltaje.

La figura 5.12 describe la secuencia de operación del método que consiste en el cierre primero de la fase A en el paso por cero, seguido del cierre del polo de la fase C y al final de la fase B con un atraso de 60° entre cada cierre.

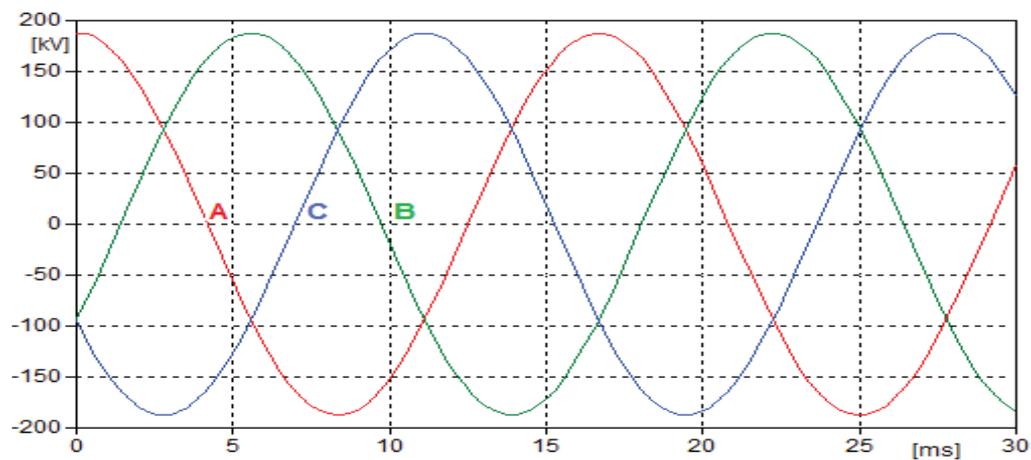


Figura 5.12 Secuencia de cierre de los polos del disyuntor

5.3.2.1 Maniobras en la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo, Con interruptor equipado con mando sincronizado

5.3.2.1.1 Energización del primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Mando Sincronizado.

Caso 1: Con el sistema completo

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Santa Rosa.

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Molino

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,315	0,0819	1,584	1,141	0,0261	1,215
2	1,387	0,1016	1,739	1,262	0,0258	1,343
3	1,269	0,0416	1,401	1,1316	0,0281	1,211

Tabla 5.16 Resultados estadísticos al energizar el primer circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con mando sincronizado.

5.3.2.1.2 Energización del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Mando Sincronizado.

Caso 1: Con el sistema completo

Caso 2: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Santa Rosa.

Caso 3: Energización de la línea Totoras - Quevedo sin el Sistema de Transmisión Totoras – Molino

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,227	0,0416	1,355	1,126	0,00985	1,154
2	1,379	0,0329	1,492	1,188	0,01507	1,233
3	1,261	0,0472	1,410	1,101	0,0236	1,166

Tabla 5.17 Resultados estadísticos al energizar el segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con mando sincronizado

5.3.2.1.3 *Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con Mando Sincronizado.*

Caso 1: Con el sistema completo

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,228	0,0472	1,373	1,198	0,0741	1,420

Tabla 5.18 Resultados estadísticos al recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Totoras a Quevedo con mando sincronizado

5.3.2.2 Maniobras en la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras, Con interruptor equipado con mando sincronizado

5.3.2.2.1 *Energización del primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Mando Sincronizado.*

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso 2: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Santo Domingo

Caso 3: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Pascuales

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,189	0,022	1,254	1,359	0,091	1,666
2	1,327	0,021	1,397	1,439	0,054	1,632
3	1,407	0,028	1,505	1,560	0,052	1,762

Tabla 5.19 Resultados estadísticos al energizar el primer circuito de la línea de transmisión desde Quevedo Totoras con mando sincronizado.

5.3.2.2.2 *Energización del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Mando Sincronizado.*

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso 2: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Santo Domingo

Caso 3: Energización de la línea Quevedo – Totoras, sin el Sistema de Transmisión Quevedo – Pascuales

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,186	0,023	1,254	1,357	0,0514	1,531
2	1,225	0,026	1,305	1,347	0,0509	1,518
3	1,259	0,0234	1,333	1,402	0,0489	1,573

Tabla 5.20 Resultados estadísticos al energizar el segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo Totoras con mando sincronizado.

5.3.2.2.3 *Recierre del segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo a Totoras con Mando Sincronizado.*

Caso 1: Con el sistema de transmisión completo

Caso	Quevedo			Totoras		
	Emed	Des.Std	E2	Emed	Des.Std	E2
1	1,18	0,0547	1,341	1,254	0,0658	1,460

Tabla 5.21 Resultados estadísticos al recierre el segundo circuito de la línea de transmisión desde Quevedo Totoras con mando sincronizado.

5.4 RESUMEN DE RESULTADOS

	MANIOBRAS DESDE QUEVEDO A TOTORAS CON EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN COMPLETO					
	Energización del Primer Circuito			Energización del Segundo Circuito		
	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Totoras	1,871	1,157	1,192	1,736	1,299	1,309
Valor máximo en Quevedo	1,253	1,101	1,107	1,260	1,124	1,161

Tabla 5.22 Maniobras desde Quevedo a Totoras con el sistema de transmisión completo.

	MANIOBRAS DESDE QUEVEDO A TOTORAS SIN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN QUEVEDO - SANTO DOMINGO					
	Energización del Primer Circuito			Energización del Segundo Circuito		
	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Totoras	1,850	1,235	1,218	1,835	1,135	1,293
Valor máximo en Quevedo	1,318	1,158	1,167	1,353	1,104	1,134

Tabla 5.23 Maniobras desde Quevedo a Totoras sin el sistema de transmisión Quevedo - Santo Domingo.

MANIOBRAS DESDE QUEVEDO A TOTORAS SIN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN QUEVEDO - PASCUALES						
Energización del Primer Circuito			Energización del Segundo Circuito			
	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Totoras	1,837	1,310	1,271	1,759	1,220	1,266
Valor máximo en Quevedo	1,340	1,180	1,166	1,319	1,189	1,130

Tabla 5.24 Maniobras desde Quevedo a Totoras sin el sistema de transmisión Quevedo – Pascuales.

MANIOBRAS DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN COMPLETO						
Energización del Primer Circuito			Energización del Segundo Circuito			
	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Quevedo	1,826	1,143	1,207	1,790	1,144	1,293
Valor máximo en Totoras	1,166	1,097	1,136	1,162	1,095	1,120

Tabla 5.25 Maniobras desde Totoras a Quevedo con el sistema de transmisión completo.

MANIOBRAS DESDE TOTORAS A QUEVEDO SIN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN TOTORAS - SANTA ROSA						
Energización del Primer Circuito			Energización del Segundo Circuito			
	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Quevedo	1,865	1,121	1,336	1,664	1,140	1,368
Valor máximo en Totoras	1,313	1,111	1,259	1,206	1,121	1,193

Tabla 5.26 Maniobras desde Totoras a Quevedo sin el sistema de transmisión
Totoras – Santa Rosa.

MANIOBRAS DESDE TOTORAS A QUEVEDO SIN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN TOTORAS - MOLINO						
Energización del Primer Circuito			Energización del Segundo Circuito			
	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.	Energización con pararrayos.	Energización con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Energización con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Quevedo	1,836	1,128	1,245	1,724	1,133	1,211
Valor máximo en Totoras	1,347	1,108	1,105	1,288	1,108	1,098

Tabla 5.27 Maniobras desde Totoras a Quevedo sin el sistema de transmisión
Totoras – Molino

MANIOBRAS DESDE QUEVEDO A TOTORAS CON EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN COMPLETO			
Recierre del Segundo Circuito			
	Recierre con pararrayos.	Recierre con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Recierre con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Totoras	1,923	1,100	1,170
Valor máximo en Quevedo	1,457	1,063	1,061

Tabla 5.28 Recierres desde Quevedo a Totoras con el Sistema de Transmisión completo

MANIOBRAS DESDE TOTORAS A QUEVEDO CON EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN COMPLETO			
Recierre del Segundo Circuito			
	Recierre con pararrayos.	Recierre con Resistencias de Preinserción y pararrayos.	Recierre con Mando Sincronizado y pararrayos.
Valor máximo en Quevedo	1,865	1,117	1,309
Valor máximo en Totoras	1,287	1,110	1,161

Tabla 5.29 Recierres desde Totoras a Quevedo con el Sistema de Transmisión completo

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Realizando un análisis comparativo de los diferentes elementos para el control de sobrevoltajes, se observa una notable mejora del perfil de voltaje con el uso, tanto, del mando sincronizado como con la resistencias de pre-inserción. Sin embargo, al emplear pararrayos, a pesar de que el sobrevoltaje disminuye en menor proporción que en los otros métodos de control analizados, su accionar se enmarcara entre los márgenes permisibles, para el nivel de voltaje de la línea, la explicación se basa en los principios de operación del pararrayos, en donde, para sobrevoltajes de maniobra, incrementos mínimos de voltaje no significan grandes incrementos de corriente, como ocurriera para ondas de impulso atmosférico.

De esta manera se puede concluir que el mando sincronizado y las resistencias de preinserción, si bien son efectivos, la necesidad de su aplicación ya esta cubierta por el pararrayos.

- Existe una atenuación en el tiempo de sobrevoltajes, debido a que todo conductor eléctrico posee una resistencia óhmica propia que actúa, amortiguando gradualmente la onda viajera.
- Los estudios de sobrevoltajes de maniobra deben ser realizados estadísticamente, de modo que todas las probables condiciones de cierre sean consideradas con respecto a la característica aleatoria de los instantes del cierre de los polos del disyuntor
- Entre los factores importantes que determinan los sobrevoltajes en una línea de transmisión se destaca: el instante del inicio del transitorio, carga atrapada, amortiguamiento de los equipos, longitudes de líneas, e impedancia de los componentes.

- Analizando el cierre controlado para la maniobra de energización de la línea de transmisión, no fue encontrada una diferencia importante entre el control del primer cruce por cero, con las demás fases siendo cerradas después de 60° y el control por fase de cada cruce por cero del voltaje.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la remoción efectiva de cargas atrapadas, para reducir las magnitudes de sobrevoltajes en casos de reconexiones de líneas de transmisión. Los transformadores de potencial de tipo magnético cuando drenan cargas atrapadas en líneas muy efectivamente, actúa la saturación del núcleo, causando fuertes amortiguaciones.
- Implementar para un estudio transitorio, los modelos de línea de transmisión que consideren parámetros distribuidos, JMartí o Bergeron, el primer modelo es ideal para la línea de transmisión en análisis, y el segundo para el resto de líneas del sistema, caso contrario se presentaran inconsistencias.
- Para un análisis de sensibilidad de los métodos de mitigación de los sobrevoltajes, debidos a maniobras de energización y recierre, se recomienda considerar:
 - Diferentes niveles de voltaje de las líneas de transmisión
 - Diferentes longitudes de las líneas de transmisión
 - Diferentes sistemas junto a los terminales emisor y receptor

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOU VAN DER SLUIS, "Transients in Power Systems", KEMA High Power Laboratory, Inglaterra, 2001
- [2] SHENKMAN, Arie "Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook". Holon Academic Institute of Tecnology, Holon, Israel, 2005
- [3] D' AJUZ, FONSECA C., CARVALHO S., DIAS N., PEREIRA M., ESMERALDO P., VAISAMAN R., FRONTIN S., "Transitorios Eletricos e Coordenacao de Isolamento", Brasil, 1985.
- [4] SILVA M., "Localizacao de faltas em linhas de transmissao utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada Wavelet", Universidad de Sao Pablo, Brasil, 2003.
- [5] Norma IEC 60071-4 "Coordinación de Aislamiento"
- [6] IBRAHIM A., "A Knowledge Base for Switching Surge Transients", IEEE Working Group, Canadá, 2003.
- [7] FERRACI P., Cuaderno Técnico 190, "La Ferroresonancia", Schneider Electric, Colombia.
- [8] GOMEZ J., SANCHIS O, "Cuestiones y problemas de electromagnetismo y semiconductores", 1999.
- [9] PEREIRA M., " Introducao ao ATP", Furnas Centrales Eléctricas, Brasil.
- [10] TAVARES M., CAMPOS P., PRADO P., Guía resumida del ATP, Universidad Estatal de Campinas, brasil, noviembre 2003.
- [11] RESTREPO L., DELGADO G., CASTRO F., "Modelos de líneas de transmsion para transitorios electromagneticos en Sistemas de Potencia", Universidad del Valle, Colombia, 2008.
- [12] MARTINEZ J., "El paquete de simulacion ATP", Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- [13] DURBAK D., GOLE A., MARZ M., NATARAJAN R., "Modeling Guidelines for Switching Transients", IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group.
- [14] Can/ Am EMTP USER GROUP, "ATP Rule Book", Comité argentino de Usuarios de EMTP-ATP, 1987-1995.

- [15] FLURSCHEIM, "Power circuit breakers theory and design", Peter Peregrinus Ltd, 1982.
- [16] HOIDALEN K., PRIKLER L., "ATPDraw 3.5 User's Manual", SYSTRAN Engineering Services Ltd.
- [17] SCOTT M., LIU T., "EMTP Theory Book", Can/Am EMTP User Group, 1995.
- [18] FERNANDEZ A., LIMA A., "Aspectos Relevantes en Estudios Probabilísticos de Recierre de Líneas de Transmisión".
- [19] SIEMENS, Surge Arrester Buyers Guide.

ANEXO 1

CATÁLOGOS DE PARARRAYOS, ABB

Descargador de óxido de cinc PEXLIM Q

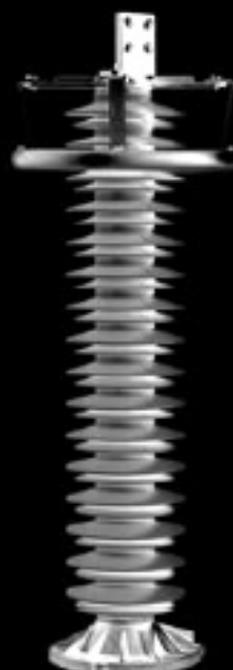
Para la protección contra sobretensiones atmosféricas y de funcionamiento de subestaciones de alta tensión, transformadores y otros equipos en redes de alta tensión.

- en zonas con alta intensidad de descargas atmosféricas y requisitos elevados de energía.
- en lugares donde las condiciones de

puesta a tierra o apantallamiento son deficientes o incompletas

Excelentes para aplicaciones con requisitos de bajo peso, espacios reducidos, montaje flexible, robustez y seguridad adicional del personal.

Componente principal del concepto PEXLINK™ para protección de líneas de transmisión.



Sumario de datos de rendimiento

Tensiones de red (U_m)	52 -420 kV
Tensiones nominales (U_n)	42 -360 kV
Corriente de descarga nominal (IEC)	10 kA _{pic}
Corriente de clasificación (ANSI/IEEE)	10 kA _{pic}
Resistencia de corriente de descarga	
Corriente alta 4/10 μ s	100 kA _{pic}
Corriente baja 2000 μ s	600 A _{pic}
Capacidad de energía:	
Clase de descarga de línea (IEC)	Clase 3
2 impulsos, (IEC Cl. 3, 5, 6)	7,8 kJ/kV (U_n)
Cumple con/sobrepasa los requisitos de la prueba de descarga de líneas de transmisión ANSI para sistemas de 362 kV.	
Capacidad de cortocircuito/ aforo de presión	50 kA _{lim}
Aislamiento externo	Cumple con/ sobrepasa las normas
Resistencia mecánica:	
Carga de servicio estática admisible declarada (EPSSL)	2.500 Nm
Carga de servicio dinámica admisible máxima (MPDGL)	4.000 Nm
Condiciones de funcionamiento:	
Temperatura ambiente	-50 °C a +45 °C
Altitud de diseño (Mayores altitudes bajo pedido)	máx. 1.000 m
Frecuencia	15 - 62 Hz

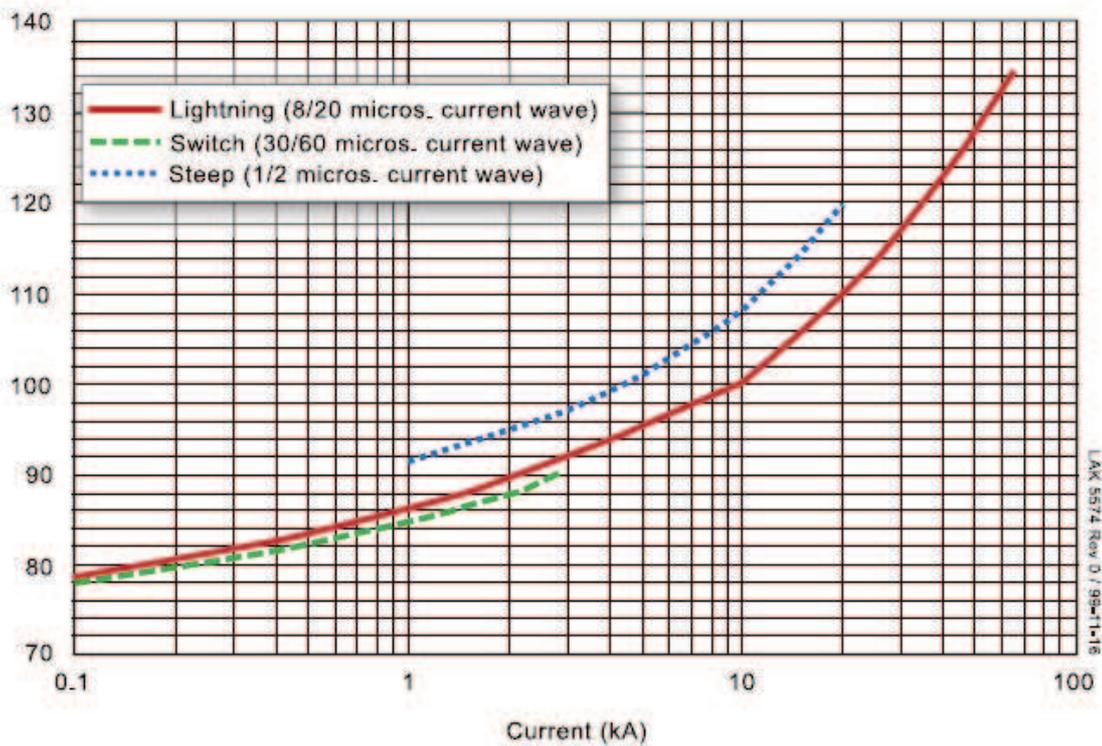
Datos de protección garantizados

Tensión máxima de red U_m kV _{rms}	Tensión nominal U_r kV _{rms}	Tensión de trabajo continuo máxima 1)		Capacidad de sobretensiones temporales 2)		Tensión residual máxima con onda de corriente						
		según IEC U_C kV _{rms}	según ANSI/IEEE MCOV kV _{rms}	1 s kV _{rms}	10 s kV _{rms}	30/60 μ s			8/20 μ s			
						0,5 kA kV _{ptoc}	1 kA kV _{ptoc}	2 kA kV _{ptoc}	5 kA kV _{ptoc}	10 kA kV _{ptoc}	20 kA kV _{ptoc}	40 kA kV _{ptoc}
170	132	106	106	151	145	254	262	272	295	311	342	382
	144	108	115	165	158	277	286	297	322	339	373	417
	150	108	121	172	165	288	298	309	335	353	388	434
	162	108	131	186	178	312	321	334	362	381	419	469
	168	108	131	193	184	323	333	346	376	395	435	486
	192	108	152	220	211	369	381	396	429	452	497	555
	245	180	144	144	207	198	346	357	371	402	423	466
192		154	154	220	211	369	381	396	429	452	497	555
198		156	160	227	217	381	393	408	443	466	512	573
210		156	170	241	231	404	417	433	469	494	543	608
216		156	175	248	237	415	428	445	483	508	559	625
219		156	177	251	240	421	434	451	489	515	567	634
222		156	179	255	244	427	440	458	496	522	574	642
228		156	180	262	250	438	452	470	510	536	590	660
300	216	173	175	248	237	415	428	445	483	508	559	625
	240	191	191	276	264	461	476	495	536	564	621	694
	258	191	209	296	283	496	512	532	576	607	667	746
	264	191	212	303	290	507	523	544	590	621	683	764
	276	191	220	317	303	530	547	569	617	649	714	798
362	258	206	209	296	283	496	512	532	576	607	667	746
	264	211	212	303	290	507	523	544	590	621	683	764
	276	221	221	317	303	530	547	569	617	649	714	798
	288	230	230	331	316	553	571	593	643	677	745	833
420	330	264	267	379	363	634	654	680	737	776	854	954
	336	267	272	386	369	646	666	692	751	790	869	972
	342	267	277	393	376	657	678	705	764	804	885	989
	360	267	291	414	396	692	714	742	804	846	931	1046

Datos técnicos de los revestimientos

Tensión máxima de red U_m kV _{rms}	Tensión nominal U_r kV _{rms}	Revestimiento	Distancia de fuga mm	Aislamiento externo *)				Dimensiones					
				1,2/50 μ s seco kV _{ptoc}	50 Hz húmedo (60s) kV _{rms}	60 Hz húmedo (10s) kV _{rms}	250/2.500 μ s húmedo kV _{ptoc}	Masa kg	A_{max}	B	C	D	Fig.
24	24	XV024	1363	283	126	126	242	16	481	-	-	-	1
36	30-36	XV036	1363	283	126	126	242	16	481	-	-	-	1
52	42-72	XV052	2270	400	187	187	330	24	736	-	-	-	1
72	54-72	XV072	2270	400	187	187	330	24	736	-	-	-	1
	75-84	XV072	3625	578	293	293	462	35	1080	-	-	-	1
100	75-96	XV100	3625	578	293	293	462	35	1080	-	-	-	1
123	90-120	XH123	3625	578	293	293	462	35	1080	-	-	-	1
	90-96	XV123	4540	800	374	374	660	46	1417	400	-	160	4
	108-144	XV123	4540	800	374	374	660	44	1397	-	-	-	3
	150	XV123	4988	861	419	419	704	47	1486	-	-	-	3
145	108-120	XH145	3625	578	293	293	462	37	1100	400	-	160	2
	108-120	XV145	4540	800	374	374	660	46	1417	400	-	160	4
	132-144	XV145	4540	800	374	374	660	44	1397	-	-	-	3
	150	XV145	4988	861	419	419	704	47	1486	-	-	-	3
	162-168	XV145	5895	978	480	480	792	55	1741	-	-	-	3
170	132-144	XH170	4540	800	374	374	660	46	1417	400	-	160	4
	150	XH170	4988	861	419	419	704	49	1506	400	-	160	4
	132	XV170	5895	978	480	480	792	58	1761	600	-	300	4
	144-192	XV170	5895	978	480	480	792	57	1761	400	-	160	4
245	192	XM245	5895	978	480	480	492	60	1761	800	600	400	6
	180-210	XH245	7250	1156	586	586	924	71	2105	800	600	400	6
	216-228	XH245	7250	1156	586	586	924	69	2105	600	-	300	5
	180-196	XV245	8613	1439	712	712	1166	86	2617	900	600	500	8
	210-228	XV245	8613	1439	712	712	1166	83	2617	800	600	400	8

Max residual voltage in percent of residual voltage at 10 kA 8/20 impulse



ANEXO 2

DATOS DE TRANSFORMADORES

AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN TOTORAS

- ✓ **Voltaje Nominal:** 230/138/13,8 kV
- ✓ **Potencia Aparente:** 55,55/55,55/15 MVA
- ✓ **Número de fases:** 1
- ✓ **Número de devanados:** 3

Pruebas de Circuito Abierto:

Voltaje (%)	Corriente (%)	Pérdidas (kW)
110	0,307	33,5
100	0,115	22,9
90	0,063	17,8

Pruebas de Cortocircuito:

Devanados	Impedancia (%)	Potencia aparente (MVA)	Pérdidas (kW)
HV-LV	0,15702	9	18,60
HV-TV	0,20556	9	17,00
LV-TV	0,1511	9	11,50

AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN QUEVEDO

- ✓ **Voltaje Nominal:** 230/138/13,8 kV
- ✓ **Potencia Aparente:** 55,55/55,55/15 MVA
- ✓ **Número de fases:** 1
- ✓ **Número de devanados:** 3

Pruebas de Circuito Abierto:

Voltaje (%)	Corriente (%)	Pérdidas (kW)
110	0,322	39,500
100	0,110	24,700
90	0,081	18,900

Pruebas de Cortocircuito:

Devanados	Impedancia (%)	Potencia aparente (MVA)	Pérdidas (kW)
HV-LV	0,1423	9	20,30
HV-TV	0,2216	9	17,70
LV-TV	0,1408	9	10,40

AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN RIOBAMBA

- ✓ **Voltaje Nominal:** 230/138/13,8 kV
- ✓ **Potencia Aparente:** 33,33/33,33/10 MVA
- ✓ **Número de fases:** 1
- ✓ **Número de devanados:** 3

Pruebas de Circuito Abierto:

Voltaje (%)	Corriente (%)	Pérdidas (kW)
110	1,47	17,54
100	0,25	23,7
90	0,11	38,92

Pruebas de Cortocircuito:

Devanados	Impedancia (%)	Potencia aparente (MVA)	Pérdidas (kW)
HV-LV	9,93	9	43,33
HV-TV	16,9	9	58,11
LV-TV	5,16	9	44,44

ANEXO 3

**ARCHIVO DE SALIDA CORRESPONDIENTE A LA
LIBRERÍA SATURATION**

Alternative Transients Program (ATP), Watcom translation. All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA.
 Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 05-Feb-09 11.03.36 Name of disk plot file is PDRAW\TESIS\QUEVEDO\SAT_QUEVEDO.pl4
 Consult the 860-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland, Oregon, USA. Source code date is 19 December 2003.
 6002 10K 192K 900 420K 1200 15K

-----+-----
 Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
 120K 2250 3800 720 1200 72800 510 90K 800 90 254 120K 100K 3K 15K 192K 120 30K 160K 600 210K 300 60 200
 012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

-----+-----
 Blank card to terminate EMTP execution.
 Comment card. KOMPAR > 0. |C data:C:\ATP\ATPDRAW\TESIS\QUEVEDO\SAT_QUEVEDO.ATP
 Marker card preceding new EMTP data case. |BEGIN NEW DATA CASE
 Request for magnetic saturation computation. |SATURATION
 Erase all of 0 cards in the punch buffer. |\$ERASE
 Misc. const. 6.000E+01 1.380E+01 5.000E+00 1 | 60 13.8 5 1 1
 (I, V) point. 7.01000E-03 9.00000E-01 |0.007010 0.9
 (I, V) point. 1.27790E-02 1.00000E+00 |0.012779 1.0
 (I, V) point. 3.41410E-02 1.10000E+00 |0.034141 1.1
 Special termination-of-points card. | 9999

Derived saturation curve gives peak current as a function of flux :

Row	Current [amp]	Flux [volt-sec]
-4	-28.5985786551	-56.9450069969
-3	-9.6965835888	-51.7681881790
-2	-3.5918974899	-46.5913693611
2	3.5918974899	46.5913693611
3	9.6965835888	51.7681881790
4	28.5985786551	56.9450069969

9999

Next, check the derived curve by independent reverse computation. Assuming sinusoidal voltage (flux) at the level of each point, rms current is found numerically. This curve should be equal to the original I-V points inputted.

Row	Current in P.U.	Voltage in P.U.
2	0.00701000	0.90000000
3	0.01277900	1.00000000
4	0.03414100	1.10000000

Request for flushing of punch buffer. |\$PUNCH

A listing of 80-column card images now being flushed from punch buffer follows.
 =====
 12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 =====

```
C <++++++> Cards punched by support routine on 05-Feb-09 11.03.36 <++++++>
C SATURATION
C $ERASE
C 60 13.8 5 1 1
C 0.007010 0.9
C 0.012779 1.0
C 0.034141 1.1
C 9999
-2.85985787E+01 -5.69450070E+01
-9.69658359E+00 -5.17681882E+01
-3.59189749E+00 -4.65913694E+01
3.59189749E+00 4.65913694E+01
9.69658359E+00 5.17681882E+01
2.85985787E+01 5.69450070E+01
9999
=====< End of LUNIT7 punched cards as flushed by $PUNCH request >=====
```

Blank card terminating "SATURATION" data cases. |BLANK card ending all "SATURATION" data cases
 Total case timing (CP, I/O, tot), sec: 0.026 0.000 0.02

ANEXO 4
ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM

ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM

A.4.1 PROGRAMA ATP

El Programa ATP (Alternative Transient Program), es una herramienta de simulación, con un amplio campo de aplicación en estudios transitorios, estadísticos, de frecuencia y de sensibilidad.

El ATP comprende un paquete de programas y rutinas de soporte, como ATPDraw, que es un editor gráfico que comprende una lista muy completa de los elementos necesarios para representar un sistema eléctrico, TPLOT y PCPLOT que son programas que permiten visualizar resultados en forma de gráficos y tablas, LINE CONSTANTS y CABLE CONSTANTS facilitan el cálculo de parámetros de las líneas de transmisión y cables aislados respectivamente, MODELS es un lenguaje de programación para el desarrollo de modelos propios en el ATP. [9]

El archivo de datos, en formato texto con el que el programa ATP trabaja, puede ser editado en cualquier editor de textos, tales como EDIT del MS-DOS o NOTEPAD bajo la única restricción de que sea grabado en formato ASC II.

Luego que el ATP procesa un archivo se generan varios archivos cuyos nombres poseen extensiones como .atp, .lis, .pch, correspondientes a archivos propios del ATP, archivos de texto solo de salida o de salida y entrada, respectivamente.[10]

El programa ATP permite la simulación de transitorios electromagnéticos, empleando la matriz de admitancia de barras, cuya formulación matemática se basa en el método de las características para elementos con parámetros distribuidos y regla trapezoidal para parámetros concentrados. Durante la solución

son utilizadas técnicas de esparsidad y de factorización triangular optimizada de matrices. [11]

Mediante el programa ATP se puede lograr la modelación de no linealidades, elementos con parámetros concentrados, elementos con parámetros distribuidos, interruptores, transformadores, etc, los cuales son descritos más detalladamente en los próximos ítems.