

**ANALISIS DE LA TENSION TRANSITORIA DE RECUPERACION EN
SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE
SIMULACION**

KARINA NINIBETH DELGADO GOMEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2013**

**ANALISIS DE LA TENSION TRANSITORIA DE RECUPERACION EN
SISTEMAS DE POTENCIA UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA DE
SIMULACION**

KARINA NINIBETH DELGADO GOMEZ

**Proyecto de Grado presentado para optar por el título de
Ingeniera Electricista.**

Director:

Ing. Ferley Castro Aranda, Ph.D
(Grupo de investigación en alta tensión y sistemas de potencia)

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2013**

AGRADECIMIENTOS

A mi padre y mi madre por su apoyo incondicional durante toda mi carrera.

A mi hermana por su colaboración.

Al profesor Ferley Castro Aranda por su colaboración, apoyo y sus valiosas orientaciones.

Al Grupo de Investigación en Alta Tensión GRALTA de la Universidad del Valle.

A todos mis compañeros y amigos que de una u otra forma me ayudaron en este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pag.</i>
1. CAPITULO 1: TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 SOBRETENSIONES.....	1
1.2.1 Clasificación de sobretensiones.....	2
1.2.1.1 Clasificación de acuerdo a la norma IEEE.....	2
1.2.1.2 Clasificación de acuerdo a la norma IEC.....	3
1.3 GENERALIDADES DE LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN.....	6
1.4 FACTORES QUE AFECTAN LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN.....	7
1.4.1 Condiciones impuestas por el sistema.....	9
1.4.1.1 Características del sistema.....	9
1.4.1.2 Ubicación de la falla.....	10
1.4.1.3 Tipo de falla.....	13
1.4.1.4 Sistema de puesta a tierra.....	14
1.4.1.5 Velocidad de propagación de las ondas viajeras.....	15
1.4.1.6 Asimetría de la corriente de falla.....	16
1.4.2 Condiciones impuestas por el interruptor.....	17
1.4.2.1 Material de los contactos.....	17
1.4.2.2 Medio de interrupción.....	17
1.4.2.3 Velocidad de apertura de los contactos.....	18
2. CAPITULO 2 : METODOS DE ANÁLISIS DE LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN.....	19
2.1 INTRODUCCIÓN.....	19
2.2 ESTUDIO MATEMÁTICO.....	19
2.2.1 Desenergización de un circuito LC.....	20
2.2.1.1 Análisis transitorio de una frecuencia.....	20
2.2.1.2 Análisis transitorio multifrecuencia.....	22
2.2.2 Desenergización de un circuito LC amortiguado.....	24
2.2.2.1 Respuesta general de un circuito RLC.....	25

2.2.2.2	Circuito sobreamortiguado.....	29
2.2.2.3	Circuito críticamente amortiguado.....	29
2.2.2.4	Circuito subamortiguado.....	30
2.3	ONDAS VIAJERAS.....	31
2.3.1	Reflexión y transmisión de ondas.....	33
2.3.2	Diagrama Reticular.....	34
2.4	INYECCIÓN DE CORRIENTE.....	37
2.5	HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.....	38
2.5.1	EMTP _{RV}	38
2.5.2	ATP / EMTP.....	39
2.5.3	PSCAD.....	39
2.5.4	Otros.....	40
3.	CAPITULO 3: ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA EN ATP.....	41
3.1	INTRODUCCIÓN.....	41
3.2	ATP (Alternative Transient Program).....	41
3.3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO.....	43
3.3.1	Generadores.....	44
3.3.2	Transformadores.....	44
3.3.3	Líneas de transmisión.....	44
3.3.4	Cargas.....	46
3.4	IMPLEMENTACIÓN ATP.....	46
3.4.1	Generadores.....	47
3.4.2	Transformadores.....	47
3.4.3	Líneas de transmisión.....	47
3.4.4	Cargas.....	47
3.4.5	Interruptores.....	48
3.5	SIMULACIÓN ATP.....	48
3.5.1	Condiciones generales.....	48
3.5.2	Un generador alimentando una carga.....	50
3.5.2.1	Fallas en terminales (Un generador alimentando una carga).....	51
3.5.2.2	Fallas en línea corta (Un generador alimentando una carga).....	54

3.5.3	Dos generadores alimentando una carga.....	56
3.5.3.1	Fallas en terminales (dos generadores alimentando una carga)..	57
3.5.3.2	Falla en línea corta (dos generadores alimentando una carga)...	61
3.5.4	Tres generadores alimentando dos cargas.....	62
3.5.4.1	Falla en terminales (tres generadores alimentando dos cargas)..	64
3.5.4.2	Falla en línea corta (tres generadores alimentando dos cargas)..	67
3.5.5	Sistema en anillo.....	69
3.5.5.1	Falla en terminales (sistema en anillo).....	70
3.5.5.2	Falla en línea corta (sistema en anillo).....	73
3.6	COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	74
4.	CAPITULO 4: MÉTODOS DE MITIGACIÓN PARA LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN.....	78
4.1	INTRODUCCIÓN.....	78
4.2	MÉTODOS UTILIZADOS PARA REDUCIR LA TRV.....	78
4.2.1	Uso de resistencias.....	80
4.2.2	Uso de condensadores.....	81
4.2.2.1	Ubicación de condensadores del lado de la carga o del lado de la fuente.....	82
4.2.2.2	Ubicación de condensadores a través de los polos del interruptor.....	83
4.2.3	Uso de descargadores de sobretensión.....	83
4.3	IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA MITIGAR LA TRV.....	84
4.3.1	Uso de resistencias.....	85
4.3.2	Uso de condensadores.....	87
4.3.2.1	Condensador ubicado del lado de fuente.....	87
4.3.2.2	Condensador ubicado del lado de la carga.....	91
4.3.2.3	Condensador ubicado en paralelo con el interruptor.....	95
4.3.3	Uso de pararrayos de óxido de Zinc.....	98
4.4	COMPARACIÓN DE MÉTODOS.....	102
5.	CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	104
5.1	CONCLUSIONES.....	104

5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	105
ANEXO A: RESPUESTAS DE UN CIRCUITO RLC	106
ANEXO B: DATOS DEL SISTEMA.....	113
BIBLIOGRAFIA.....	115

LISTA DE TABLAS

	<i>Pag.</i>
Tabla 1.1 Tensión transitoria de recuperación bajo condiciones de falla.....	12
Tabla 1.2 Rangos de frecuencia del transitorio.....	13
Tabla 3.1 Datos de los transformadores.....	44
Tabla 3.2 Características de los conductores.....	45
Tabla 3.3 Longitud de las líneas.....	46
Tabla 3.4 Características de las cargas.....	46
Tabla 3.5 Valores de TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema: un generador alimentando una carga).....	53
Tabla 3.6 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema: un generador alimentando una carga).....	55
Tabla 3.7 Valores de TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema: dos generadores alimentando una carga).....	60
Tabla 3.8 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema: dos generadores alimentando una carga).....	62
Tabla 3.9 Valores de TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema: tres generadores alimentando dos cargas).....	66
Tabla 3.10 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema: tres generadores alimentando dos cargas).....	68
Tabla 3.11 Valores TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema en anillo).....	72
Tabla 3.12 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema en anillo).	74
Tabla 3.13 Valores de TRV admitidas para un sistema de 245 kV por la norma IEEE Std C37.016 – 2006.....	74
Tabla 3.14 Valores pico y tasa de crecimiento de la tensión transitoria de recuperación.....	75
Tabla 3.15 Valores pico y tasa de crecimiento de la tensión transitoria de recuperación.....	77
Tabla 4.1 Valores de TRV con la implementación de resistencias.....	87
Tabla 4.2 Valores de TRV con la implementación de condensadores del lado de la fuente en una falla en terminales.....	90

Tabla 4.3 Valores de TRV con la implementación de condensadores del lado de la fuente en una falla en línea corta.....	90
Tabla 4.4 Valores de TRV para una falla en terminales con la implementación de condensadores del lado de la carga.....	94
Tabla 4.5 Valores de TRV para una falla en línea corta con la implementación de condensadores del lado de la carga.....	94
Tabla 4.6 Valores de TRV para una falla en terminales con la implementación de condensadores en paralelo con el interruptor.....	97
Tabla 4.7 Valores de TRV para una falla en línea corta con la implementación de condensadores en paralelo con el interruptor.....	97
Tabla 4.8 Características del pararrayos.....	98
Tabla 4.9 Valores de TRV con la implementación de un pararrayo en una falla en terminales aterrizada.....	102
Tabla 4.10 Valores de TRV con la implementación de un pararrayo en una falla en terminales sin aterrizar.....	102
Tabla 4.11 Comparación de los métodos de mitigación.....	103
Tabla B.1 Datos de los generadores del sistema WSCC.....	106
Tabla B.2 Datos de las barras del sistema WSCC.....	107
Tabla B.3 Características de los elementos del sistema implementado en ATP.....	107

LISTA DE FIGURAS

	<i>Pag.</i>
Figura 1.1 Tipos y formas de sobretensiones, formas de onda normalizadas y ensayos de tensión soportada normalizada.....	5
Figura 1.2 Tipos de sobretensiones (excepto los de frente rápido).....	5
Figura 1.3 Tensión transitoria de recuperación.....	7
Figura 1.4 Tensión transitoria de recuperación de un circuito resistivo.....	10
Figura 1.5 Onda exponencial de TRV.....	11
Figura 1.6 Onda oscilatoria de TRV.....	11
Figura 1.7 Onda triangular de TRV.....	11
Figura 1.8 La influencia del sistema de puesta a tierra en la tensión transitoria de recuperación.....	15
Figura 1.9 Corriente de falla asimétrica.....	16
Figura 2.1 Circuito LC para el estudio transitorio a una frecuencia.....	20
Figura 2.2 Circuito LC para el estudio transitorio con dos frecuencias.....	23
Figura 2.3 Tensión de recuperación en un circuito de doble frecuencia.....	24
Figura 2.4 Circuito LC amortiguado.....	25
Figura 2.5 Representación de los elementos de una línea de transmisión.....	32
Figura 2.6 Reflexión y transmisión de ondas en la unión de dos líneas.....	34
Figura 2.7 Línea en circuito abierto.....	35
Figura 2.8 Diagrama reticular de una línea en vacío.....	35
Figura 2.9 Tensiones en los extremos A y B de una línea en vacío.....	36
Figura 2.10 Método de inyección de corriente.....	37
Figura 2.11 Ventana principal de ATP y elementos del programa.....	39
Figura 2.12 Ventana principal de PSCAD.....	40
Figura 3.1 Secuencia de simulación en ATP.....	42
Figura 3.2 WSCC 9 barras.....	43
Figura 3.3 Torre de 230 kV.....	45
Figura 3.4 Punto de estudio del sistema.....	49
Figura 3.5 Falla en terminales.....	50
Figura 3.6 Falla en línea corta.....	50

Figura 3.7 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema: un generador alimentando una carga).....	51
Figura 3.8 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema: un generador alimentando una carga).....	52
Figura 3.9 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales monofásica, sistema (un generador alimentando una carga).....	53
Figura 3.10 Comportamiento de la TRV en una falla en línea corta (sistema: un generador alimentando una carga).....	54
Figura 3.11 Sistema: dos generadores alimentando una carga.....	57
Figura 3.12 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema: dos generadores alimentando una carga).....	58
Figura 3.13 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema: dos generadores alimentando una carga).....	58
Figura 3.14 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales monofásica (sistema: dos generadores alimentando una carga).....	59
Figura 3.15 Comportamiento de la TRV en una falla e línea corta, (sistema: dos generadores alimentando una carga).....	61
Figura 3.16 Sistema: tres fuentes alimentando dos cargas.....	63
Figura 3.17 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema: tres generadores alimentando dos cargas).....	64
Figura 3.18 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema: tres generadores alimentando dos cargas).....	65
Figura 3.19 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales monofásica (sistema: tres generadores alimentando dos cargas).....	66
Figura 3.20 Comportamiento de la TRV en una falla en línea corta (sistema: tres generadores alimentando dos cargas).....	68
Figura 3.21 Sistema en anillo en ATPDraw.....	69
Figura 3.22 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema en anillo).....	70
Figura 3.23 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema en anillo).....	71

Figura 3.24 Comportamiento de la TRV en una en una falla en terminales monofásica (sistema en anillo).....	71
Figura 3.25 Comportamiento de la TRV en una falla en línea corta (sistema en anillo).....	73
Figura 4.1 Mitigación mediante el uso de resistencias.....	80
Figura 4.2 Mitigación mediante el uso de condensadores.....	82
Figura 4.3 Uso de dispositivos de ZnO para reducir la TRV.....	83
Figura 4.4 Sistema utilizado para la implementación de los métodos de mitigación de la TRV.....	85
Figura 4.5 Ubicación de la resistencia de preinserción en el sistema	85
Figura 4.6 Comportamiento de la TRV con la implementación de resistencia de preinserción.....	86
Figura 4.7 Ubicación del condensador del lado de la fuente del interruptor.....	88
Figura 4.8 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores del lado de fuente.....	89
Figura 4.9 Ubicación del condensador del lado de la carga del interruptor.....	91
Figura 4.10 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores del lado de la carga para una falla en terminales.....	92
Figura 4.11 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores del lado de la carga para una falla en línea corta.....	93
Figura 4.12 Ubicación del condensador en paralelo con el interruptor.....	95
Figura 4.13 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores en paralelo al interruptor.....	96
Figura 4.14 Modelo IEEE (Durbak).....	98
Figura 4.15 Ubicación de un elemento de óxido de zinc en el sistema.....	99
Figura 4.16 Comportamiento de la TRV con la implementación del pararrayos.....	100

RESUMEN

En este trabajo de grado se ha analizado el comportamiento de la tensión transitoria de recuperación en un sistema de potencia, tanto en forma de onda como en tasa de crecimiento con ayuda de un programa de simulación, además se hace el estudio de los métodos utilizados para mitigar la tensión transitoria de recuperación.

Inicialmente se hizo una introducción a las sobretensiones y se presentaron las características que influyen en la tensión transitoria de recuperación generada por un sistema, posteriormente se hizo un estudio de los métodos de análisis de la tensión transitoria con el fin de comprender y conocer mejor la naturaleza del fenómeno. De igual forma se realizó la implementación de un sistema de potencia en el programa de simulación ATP y se realizaron fallas en él con el fin de analizar el comportamiento de la tensión transitoria de recuperación, finalmente se hace el estudio de los elementos que se pueden implementar con el fin de reducir los valores de tensión transitoria obtenidos, los que son verificados mediante la implementación de cada uno de ellos en la simulación

Palabras claves: Tensión transitoria de recuperación; sobretensión de maniobra; simulación, ATP.

INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 1 se hace la descripción de las sobretensiones de acuerdo a las normas IEEE e IEC con la cual se introduce a la tensión transitoria de recuperación. Posteriormente se hace un estudio de los conceptos básicos de la tensión transitoria y finalmente se describen los factores del sistema de potencia que afectan su magnitud y tasa de crecimiento.

En el Capítulo 2 se realiza el análisis de diferentes métodos para calcular la tensión transitoria. Se inicia con el análisis de las respuestas en de circuitos RL y RLC paralelo, posteriormente se realiza el estudio de la tensión transitoria mediante ondas viajeras y el diagrama de reticular, finalmente se explica el método de inyección de corriente y se realiza una breve descripción de las herramientas de simulación para realizar el análisis de fenómenos transitorios.

En el Capítulo 3 se realiza la implementación de un sistema de potencia en el programa EMTP/ATP en el que se realizan diferentes fallas y se analiza el comportamiento de los valores y la forma de onda de la tensión transitoria de recuperación obtenidas en cada caso dependiendo de los elementos conectados al sistema de potencia.

En el Capítulo 4 se explican de distintos métodos utilizados con el fin de mitigar la tensión transitoria de recuperación tanto en magnitud como en tasa de crecimiento, posteriormente se realiza su implementación en un sistema mediante ATP con lo que se hace la verificación de cada uno de ellos. Para finalizar se realiza una tabla comparativa de los distintos métodos implementados.

CAPÍTULO 1

1. TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de un buen servicio de suministro de energía se emplean equipos cada vez más avanzados que realicen su función lo más rápido posible y de una manera eficaz.

Para el proceso de conmutación y más específicamente de interrupción de corriente en los sistemas de potencia, se utilizan los interruptores, equipos que deben soportar los efectos transitorios que se generan junto con el arco eléctrico entre sus polos que trata de impedir el cambio de estado del sistema. Entre los fenómenos transitorios experimentados en un sistema de potencia se tiene la tensión transitoria de recuperación (TRV, Transient Recovery Voltage).

En este capítulo se hace una breve descripción de las sobretensiones de acuerdo a las normas IEEE e IEC con la cual se introduce a la tensión transitoria de recuperación. Posteriormente se hace un estudio de los conceptos básicos de la TRV y finalmente se describen los factores del sistema de potencia que afectan su magnitud y tiempo de crecimiento.

1.2 SOBRETENSIONES

Las sobretensiones son incrementos de voltaje en cualquier punto del sistema eléctrico debido a diversos factores, capaces de poner en peligro el material o el buen servicio de una instalación eléctrica, las más comunes son conmutaciones y descargas atmosféricas.

Según la IEC 60071-1 de 2011 [1] las sobretensiones se definen como:

“Cualquier tensión entre el conductor de fase y tierra o entre conductores de fase con un valor pico que exceda el pico correspondiente a la tensión más alta de los equipos”

1.2.1 Clasificación de sobretensiones

La clasificación de las sobretensiones se realiza de acuerdo a las normas IEC e IEEE como se muestra a continuación.

1.2.1.1 Clasificación de acuerdo a la norma IEEE

Según la IEEE Std 1313.1TM – 1996 [2] las sobretensiones se pueden clasificar de acuerdo a su forma de onda y duración en:

- Sobretensión temporal
- Sobretensión transitoria

Sobretensión temporal: su duración es relativamente larga: desde pocos segundos hasta minutos. Su amortiguamiento es débil.

Sobretensión transitoria: es una sobretensión de corta duración y muy amortiguada, entre estas se tienen:

- Sobretensión por conmutación
- Sobretensión por descargas atmosféricas
- Sobretensión longitudinal

Sobretensión de conmutación: en este tipo de sobretensión el transitorio tiene un frente lento, de corta duración, unidireccional u oscilatorio y la tensión generada es muy amortiguada. Su tiempo de cresta está entre 20 μ s y 5000 μ s, el valor de tiempo medio es menor de 20000 μ s.

Sobretensión por descarga atmosférica: este tipo de sobretensión transitoria se caracteriza por tener una tensión de frente rápida, es producida por un rayo o una falla. La sobretensión suele ser unidireccional y de muy corta duración. Su tiempo de cresta está entre $0,1 \mu s$ y $20 \mu s$, el valor de tiempo medio es menor de $300 \mu s$.

Sobretensión longitudinal: es una sobretensión que aparece entre el contacto abierto de un interruptor. Es una combinación instantánea de sobretensión por conmutación ó por descarga atmosférica y la frecuencia de alimentación del sistema.

1.2.1.2 Clasificación de acuerdo a la norma IEC

De igual manera, según la IEC 60071-1 – 2011 [1] las sobretensiones se pueden clasificar de acuerdo a su forma de onda y duración en:

- Sobretensión temporal
- Sobretensión transitoria
- Sobretensión combinada

Sobretensión temporal: Sobretensión a frecuencia industrial de duración relativamente larga. La sobretensión puede ser no amortiguada o amortiguada débilmente. En algunos casos, su frecuencia puede ser algunas veces inferior o superior a la frecuencia industrial.

Sobretensión transitoria: Sobretensión de corta duración, que no sobrepasa de unos milisegundos, oscilatoria o no, generalmente fuertemente amortiguada. Las sobretensiones transitorias pueden ser inmediatamente seguidas por sobretensiones temporales. Si es así, los dos tipos de sobretensiones se consideran como acontecimientos separados.

A su vez las sobretensiones transitorias se dividen en:

- Sobretensión de frente lento
- Sobretensión de frente rápido
- Sobretensión de frente muy rápido

Sobretensión de frente lento: usualmente unidireccional con tiempo pico entre los 20 y 5000 μ s y tiempo de cola menor a 20 ms

Sobretensión de frente rápido: usualmente unidireccional con tiempo pico entre los 0,1 y 20 μ s y tiempo de cola menor a 300 μ s

Sobretensión de frente muy rápido: usualmente unidireccional con tiempo pico menor a 0,1 μ s, con oscilaciones superpuestas entre 30 kHz y 100 MHz.

Sobretensión combinada (temporal, frente lento, frente rápido y frente muy rápido): compuesta por dos tensiones simultáneos aplicados de fase a fase (o longitudinal) al aislamiento y tierra. Se clasifica por el componente del valor pico más alto.

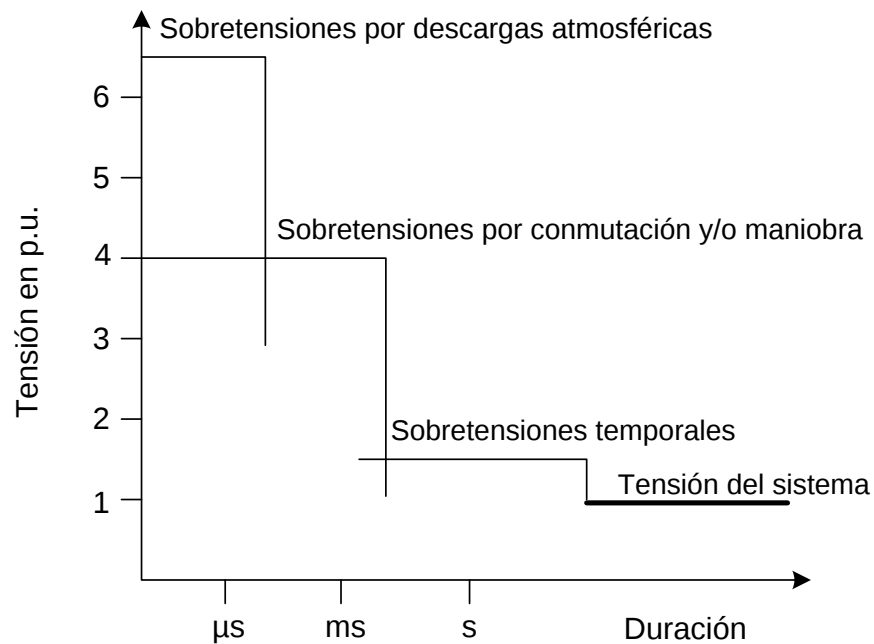
La Figura 1.1 y la Figura 1.2, tomadas de la norma IEC 60071-4 - 2004 [3] se pueden observar las características de los tipos de sobretensiones descritos anteriormente:

Figura 1.1 Tipos y formas de sobretensiones, formas de onda normalizadas y ensayos de tensión soportada normalizada

TIPO	BAJA FRECUENCIA		TRANSITORIO		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gamas de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.02 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} \leq T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0.1 \mu\text{s} \leq T_1 < 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de tensión normalizada	 $f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t^*)$	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*)
Ensayo de tensión soportada normalizada	*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	*)

*) A especificar por el comité de producto concerniente.

Figura 1.2 Tipos de sobretensiones (excepto los de frente rápido)



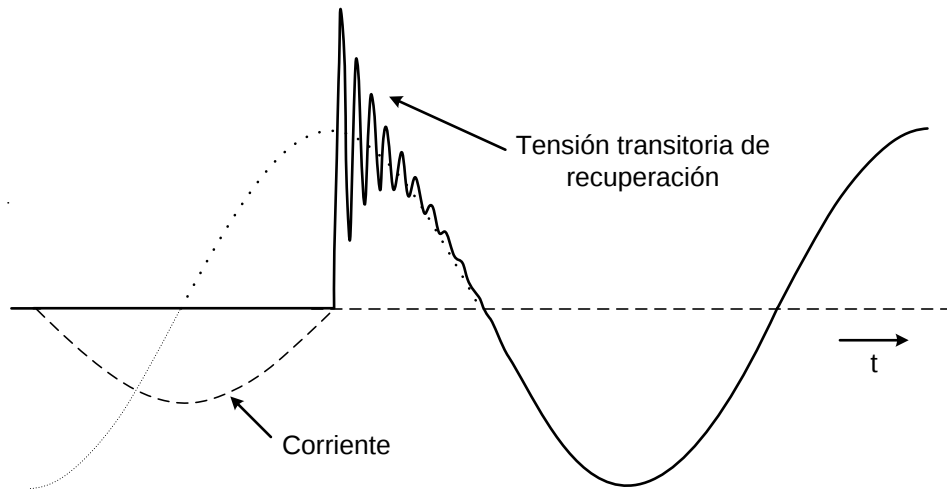
Como se puede observar en la Figura 1.2 los procesos de conmutación pueden presentar sobretensiones que alcanzan valores entre 2 y 4 veces la tensión nominal. Al interrumpir la corriente en los sistemas de potencia la sobretensión transitoria que se genera es denominada “*tensión transitoria de recuperación*”. Este trabajo se enfoca en el estudio de ésta sobretensión como se observa a continuación.

1.3 GENERALIDADES DE LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN

Cuando se realiza la apertura de un interruptor la corriente del sistema se interrumpe desenergizando parte o todo el sistema, lo que sucede generalmente en el instante en el que la onda de corriente tiene su paso por cero o un valor cercano a este, dependiendo de las características del interruptor, ya que es el momento en el que el interruptor abre con mayor facilidad, cuando esto ocurre aparece entre sus polos la llamada “tensión transitoria de recuperación” (TRV, Transient Recovery Voltage), en ocasiones junto con un arco de corriente el cual pretende evitar la apertura del interruptor (ver Figura 1.3). Después de la interrupción, el circuito queda dividido mediante el interruptor en dos partes: el lado de la fuente y el lado de la carga o de la línea.

La tensión transitoria de recuperación es una sobretensión transitoria que se genera por la conmutación de un interruptor y es el resultado de la diferencia entre las respuestas de las tensiones del sistema vistas por los polos del interruptor tanto del lado de la fuente como del lado de la carga.

Figura 1.3 Tensión transitoria de recuperación



Si la interrupción del circuito es llevada a cabo exitosamente, el arco de corriente se extingue y la tensión se establece igual a la de la fuente. Sin embargo, en ocasiones no sucede esto y la corriente del circuito no puede ser interrumpida, a esto se le denomina reencendido: el medio dieléctrico que se encuentra entre los polos del interruptor no es capaz de extinguir la corriente o, la tensión entre los bornes del interruptor es mayor a la tensión máxima que puede soportar el equipo, lo que produce una ruptura dieléctrica que tiene como resultado el establecimiento de la onda de corriente, en estos casos, para intentar realizar nuevamente la apertura del circuito se debe esperar que la onda de corriente pase una vez más por cero.

1.4 FACTORES QUE AFECTAN LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN

De acuerdo a las características de cada sistema de potencia, es posible obtener valores de la TRV que pueden causar daños a los elementos conectados al sistema y así proporcionar un mal servicio a los usuarios, por ésta razón es importante tener en cuenta los posibles valores de esta sobretensión para así

ubicar las protecciones y los elementos necesarios que eviten daños al sistema y así garanticen la eficiencia del servicio.

Las condiciones que influyen en la TRV impuestas por el sistema son [4]:

- Características del sistema
 - Nivel de voltaje de operación
 - Número de líneas conectadas a la barra del lado de la fuente
 - Contribuciones de las fuentes locales y remotas a la corriente de falla total
 - Tipo y características de equipos conectados tanto del lado de la fuente como de la falla
 - Longitud de las líneas conectadas
 - La naturaleza de la terminación de las líneas en los extremos remotos
 - Capacitancia e inductancia del lado de la fuente
 - Presencia y ubicación de los cables y los reactores
 - Flujo de carga
 - Efecto de la regulación del voltaje de las líneas que no tengan fallas
 - Frecuencia del sistema
- Ubicación de la falla
- Tipo de falla
- Tipo de conexión del sistema a tierra
- Velocidad de propagación de las ondas viajeras
- Asimetría de la corriente de falla

Además de las variables nombradas anteriormente, se tiene otra muy importante que es el efecto del interruptor en la TRV.

Dependiendo de las características del interruptor el arco de corriente generado en el momento de la interrupción puede verse modificado, por lo cual se puede decir

que para dos interruptores diferentes la TRV en una falla y en un mismo punto, y en general en las mismas condiciones puede ser diferente [5].

Las condiciones que influyen en la TRV impuestas por el interruptor son las siguientes [4]:

- Material de los contactos
 - Conductividad antes de la interrupción de la corriente
- Medio de interrupción
 - Conductividad post-arco
- Velocidad de apertura de los contactos

Como se puede observar tanto el interruptor como el sistema en general aportan características de las cuales dependen la magnitud y la tasa de crecimiento que puede alcanzar la tensión transitoria de recuperación.

Algunas de las condiciones nombradas anteriormente serán descritas con mayor detalle a continuación.

1.4.1 Condiciones impuestas por el sistema

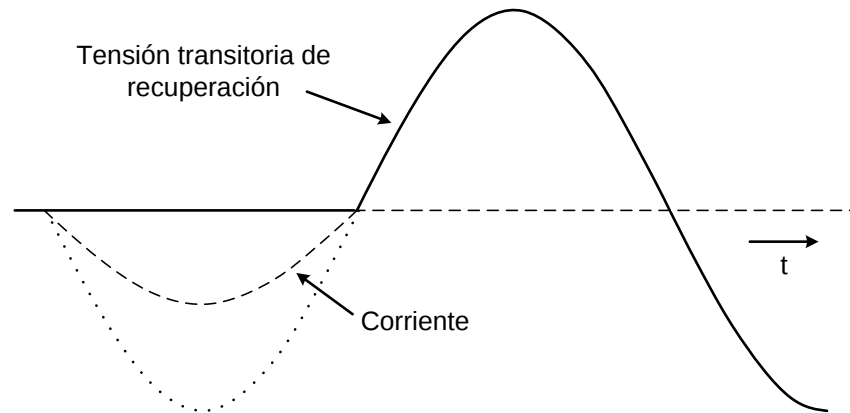
1.4.1.1 Características del sistema

Anteriormente se hizo una lista de varias características que tienen relación directa con el sistema. Se puede observar que básicamente se refieren valores nominales de operación y los elementos ubicados en el sistema, lo cual origina estudios de circuitos inductivos, capacitivos o resistivos, siendo el circuito puramente resistivo el cual presenta los valores de TRV más bajos ya que la onda de tensión está en fase con onda de corriente (Figura 1.4).

Si bien la mayoría de sistemas son inductivos, es necesario tener en cuenta que las características de cada circuito varían dependiendo de los elementos que lo

conforman y con ellos también los valores y la forma de onda de la TRV, por lo que dependiendo de cada caso, los valores pueden afectar en mayor o menor magnitud el sistema de potencia.

Figura 1.4 Tensión transitoria de recuperación de un circuito resistivo



1.4.1.2 Ubicación de la falla

Otro aspecto importante que influye en la tensión transitoria de recuperación es el punto del sistema en el cual se presente la falla, en la norma IEEE Std C37.011TM - 2011 [5] se tienen casos de ondas comunes de tensión tal como se muestra a continuación:

- **Onda exponencial:** Se produce normalmente cuando al menos un transformador y una línea se encuentran en el lado sin falla del interruptor (Figura 1.5).
- **Onda oscilatoria:** Se presenta cuando una falla está limitada por un transformador o un reactor y no la línea de transmisión, la impedancia presente proporciona la amortiguación (Figura 1.6).
- **Onda triangular:** Es la más común en fallas de líneas cortas, su forma es conocida también como *diente de sierra*. El incremento de la impedancia de

la línea de transmisión determina la naturaleza del TRV. En este caso la tasa de crecimiento de la onda es mayor que en las ondas exponenciales u oscilatorias (Figura 1.7).

Figura 1.5 Onda exponencial de TRV

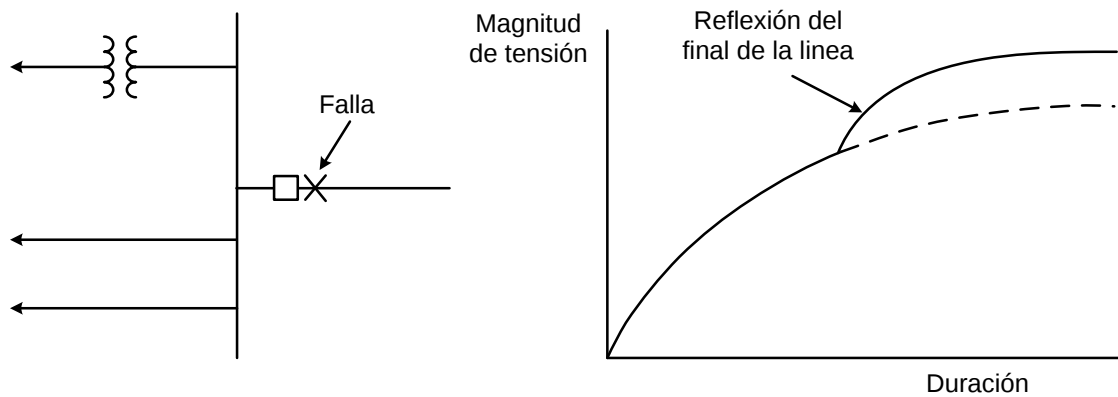


Figura 1.6 Onda oscilatoria de TRV

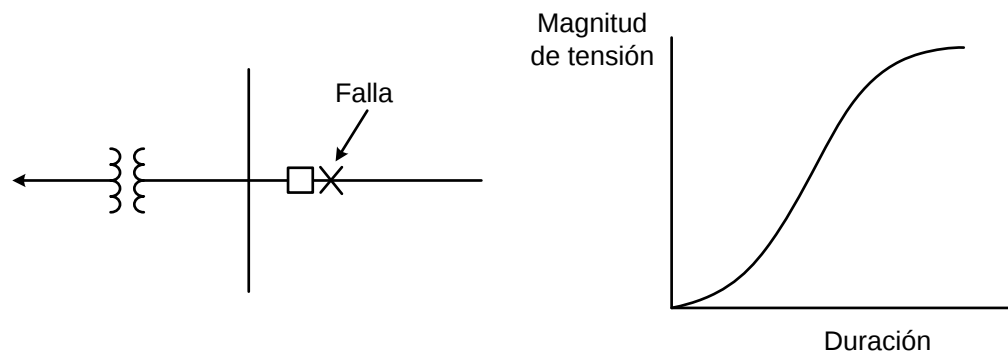
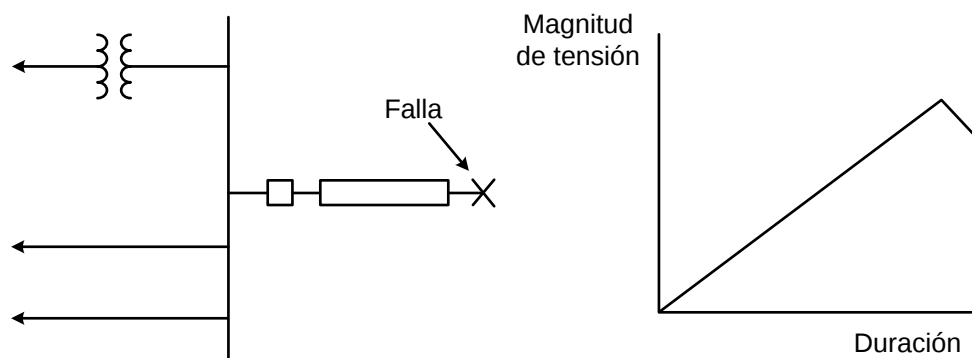


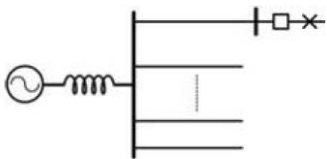
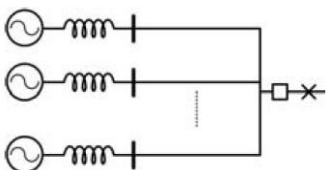
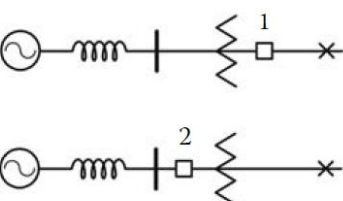
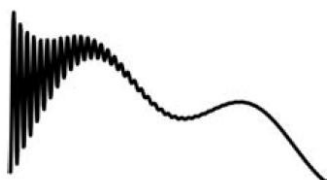
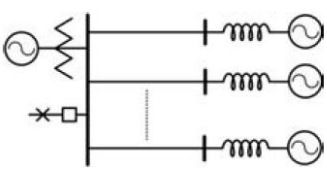
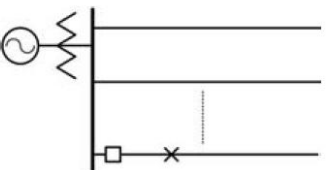
Figura 1.7 Onda triangular de TRV



La forma de onda triangular es la más común en los sistemas de potencia ya que se asocia directamente a fallas de línea, en este caso, la distancia de la falla al interruptor es directamente proporcional a la magnitud de la TRV e inversamente proporcional a la tasa de crecimiento por lo tanto entre más lejos se encuentra la falla del interruptor la tensión pico será mayor y la tasa de crecimiento menor [4].

En la Tabla 1.1 [6] se encuentran algunas de las formas de ondas de tensión transitoria de recuperación generadas en condiciones de falla.

Tabla 1.1 Tensión transitoria de recuperación bajo condiciones de falla

Caso	Diagrama	Forma de onda típica de TRV
1. Una línea alimentando la barra de la falla		
2. Múltiples líneas alimentando la falla		
3. Transformador al lado de la falla		
4. Múltiples líneas y transformadores alimentando la barra en falla		
5. Falla en línea corta		

1.4.1.3 Tipo de falla

En un sistema de potencia se presentan básicamente dos tipo de fallas: la falla en línea corta y la falla en terminales.

- **Una falla en línea corta** (falla kilométrica) es aquella que se produce a una distancia relativamente corta (algunos kilómetros) hacia el lado de la carga del interruptor.
- **Una falla en terminales** es aquella que se produce en o muy cerca a los terminales del interruptor.

Dependiendo de las características del sistema y el tipo de falla, la tensión transitoria de recuperación puede ser resultado de una sola frecuencia o de múltiples frecuencias. El rango de frecuencias que puede alcanzar se encuentra en la Tabla 1.2 [7]:

Tabla 1.1 Rangos de frecuencia del transitorio

Ubicación de la falla	Rango de frecuencia
Fallas en línea corta	50/60 kHz-100 kHz
Fallas en terminales	50/60 Hz - 20 kHz

Como se ha mencionado anteriormente la apertura del interruptor puede verse fallida debido a que se pueden presentar reencendidos. A raíz de una falla en línea corta, el interruptor tiene mayor probabilidad de fallar, en lo que se denomina *la región de la recuperación térmica* [8], lo que sucede debido a las altas frecuencias que en ella se puede presentar, tal como se muestra en los valores de la Tabla 1.2. La región de recuperación térmica es aquella en la que el equilibrio térmico aun no se ha restablecido, y se presenta en los primeros microsegundos después de la interrupción. En caso de que el interruptor falle en ésta región, se

presenta un aumento continuo de la corriente de arco lo cual provoca una caída en la tensión de recuperación y finalmente el reencendido.

Por otro lado, para las fallas en terminales es más probable que el interruptor falle en la región de *recuperación dieléctrica* [8], en este caso ya se ha establecido un equilibrio térmico, sin embargo el reencendido se presenta debido a que los polos del interruptor no son capaces de soportar la tensión transitoria de recuperación.

Es importante mencionar que las fallas trifásicas en terminales presentan mayores valores de TRV y se utilizan para definir la capacidad nominal del interruptor, mientras que las fallas en línea corta por lo general tienen mayores tasas de crecimiento que las tensiones transitorias para fallas terminales, sin embargo tiene menores magnitudes de tensión [5].

1.4.1.4 Sistema de puesta a tierra [9]

El tipo de puesta a tierra utilizado en un sistema tendrá un efecto marcado en la tensión transitoria de recuperación que aparecerá a través de los contactos de un interruptor cuando se interrumpe el flujo de corriente. Esto sucede porque dentro de un sistema trifásico la corriente cero aparecerá en un momento diferente en cada fase y la magnitud de la tensión que aparece en la primera fase despejada será determinada por la conexión del neutro del sistema a la puesta a tierra.

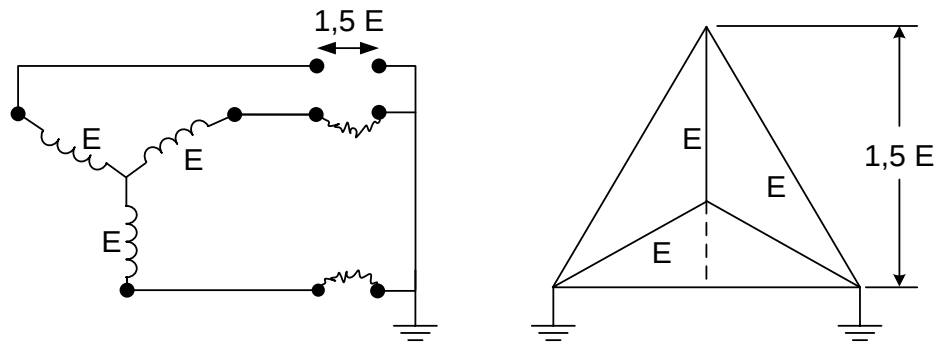
La razón de esto puede verse en la Figura 1.8. Ahí se muestra la tensión en cada fase esquemática y vectorialmente. En la parte superior, el sistema tiene un neutro sin aterrizar y una falla trifásica a tierra. Cuando la corriente fluye en las tres fases, el punto neutro es sostenido por la capacitancia en un punto central en el diagrama de vectores para que la tensión de cada fase a tierra sea E .

Cuando se elimina la corriente de la primera fase, el punto neutro se desplaza inmediatamente a un punto medio entre las dos fases conductoras, dando un voltaje a través de la primera fase despejada de $1,5 E$ y con un voltaje reducido a

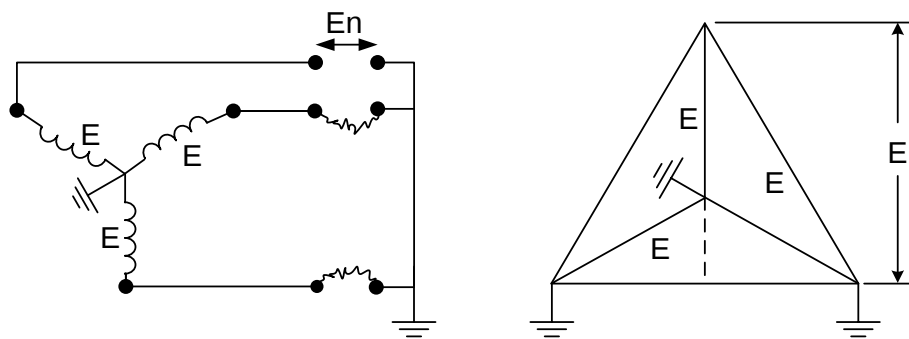
través de las fases. En un sistema donde el neutro está sólidamente conectado a tierra, el neutro se mantiene rígidamente en un punto central en el diagrama de vectores, como se muestra la Figura 1.8 b) y cada fase se verá una tensión de recuperación con un valor de E cuando se elimina la corriente.

Figura 1.8 La influencia del sistema de puesta a tierra en la tensión transitoria de recuperación

a) Falla trifásica sin el neutro aterrizado



b) Falla trifásica con el neutro aterrizado



1.4.1.5 Velocidad de propagación de las ondas viajeras

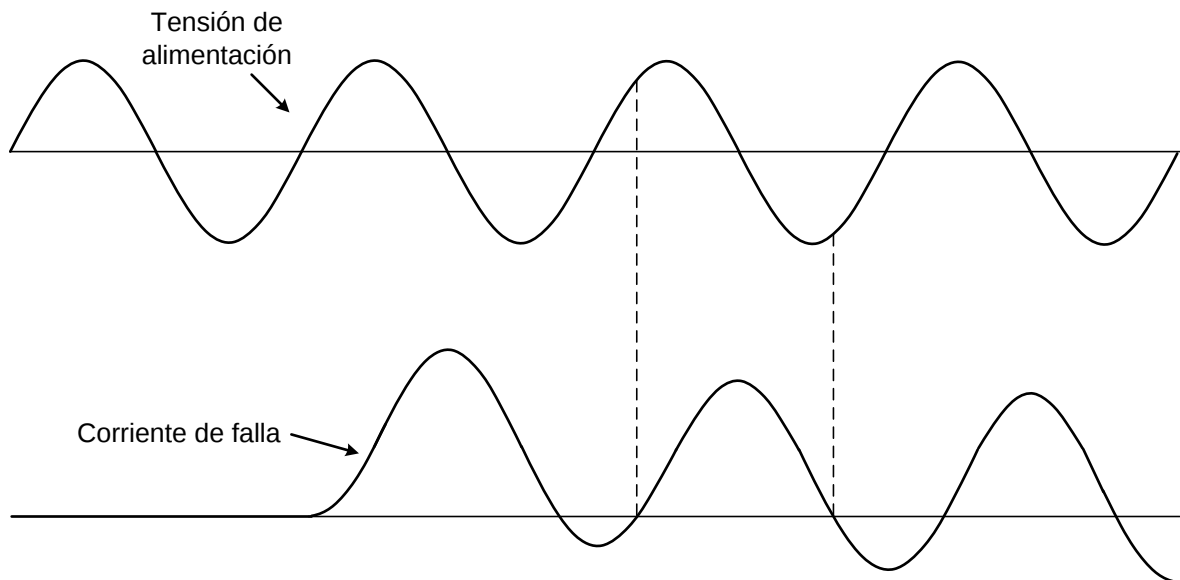
En un sistema de potencia donde nuestros principales conductores son líneas de transmisión y cables, todos los disturbios producen modificaciones en las ondas

de tensión y corriente, estos se propagan a través de los conductores de un extremo a otro: si la velocidad de la onda que ocasiona el disturbio es lenta lo más probable es que la falla se despeje antes de que la onda tome valores muy grandes y el sistema no se vea perjudicado, pero si la onda de la perturbación se propaga rápidamente y no se despeja a tiempo las magnitudes que ésta puede alcanzar producirían grandes daños en el sistema.

1.4.1.6 Asimetría de la corriente de falla

En la Figura 1.9 [5] se puede observar lo que sucede al interrumpir corrientes de falla asimétricas: cuando el valor de corriente es cero (momento de la interrupción) el valor de tensión del sistema es menor a su valor máximo, lo que hace que el pico de la tensión transitoria de recuperación sea menor que cuando se interrumpen corrientes simétricas donde el valor de cero de la corriente coincide con el valor máximo de la tensión de alimentación.

Figura 1.9 Corriente de falla asimétrica



1.4.2 Condiciones impuestas por el interruptor

El interruptor tiene como función principal interrumpir las corrientes de falla que se puedan presentar en el sistema, así como mantener en flujo constante de corriente cuando se encuentre en posición cerrada.

1.4.2.1 Material de los contactos

Los contactos de los polos de los interruptores deben cumplir principalmente con ser buenos conductores en la posición de cierre, por lo tanto un buen material permitirá que la tensión entre sus polos cuando el interruptor este cerrado sea muy cercana a cero, si no lo es, en el momento de la interrupción la tensión transitoria se incrementará en ese valor.

1.4.2.2 Medio de interrupción

Existen varias tecnologías desarrolladas a través de los años, inicialmente aparecieron los interruptores que utilizaban como medio de interrupción el aceite, luego los de soplo de aire, y tecnologías más avanzadas utilizan el gas SF_6 o el vacío para su construcción.

Independientemente del medio de interrupción que se utilice lo que se busca es que los interruptores ofrezcan un buen aislamiento cuando se encuentren en posición abierta y una rápida desionización. Todo esto entre otras cosas con el fin de evitar posibles reencendidos en el momento de la apertura del interruptor: si existe un buen aislamiento en la separación de los contactos y la ionización del espacio de separación entre ellos es suficiente para permitir que la corriente vuelva a transmitirse a través de ellos, es posible que la interrupción de corriente se realice con éxito; si no sucede esto y la tensión del sistema no se establece entre los polos del interruptor, será necesario volver a intentar la apertura, sin embargo ya que el medio queda ionizado trae consigo un esfuerzo mayor para el interruptor.

1.4.2.3 Velocidad de apertura de los contactos

Para el estudio de la tensión transitoria es de interés el tiempo que tarda en realizar la apertura de sus contactos, este valor depende en parte de la tecnología de accionamiento que se implemente (IEEE Std C37.016TM – 2006 [10]). Empresas como ABB y Siemens poseen tiempos de apertura en media y alta tensión entre 17 ms y 63 ms [[11], [12]], procurando que a tensiones mayores los tiempos sean menores. La importancia de este valor radica básicamente en que un mayor tiempo de apertura significa una corriente de falla alta circulando a través del sistema por mayor tiempo lo que puede traer daños tanto a los equipo como a los demás elementos conectados a este.

Debido a la cantidad de interruptores existentes, el analizar los cambios que cada uno puede generar a la tensión transitoria de recuperación sería una tarea inmensa, por lo cual, para simplicidad en el estudio de la tensión de recuperación se ignora el efecto del interruptor en el sistema, el valor obtenido se denomina *tensión de recuperación inherente* y es el valor que se toma como referencia [5].

Además de lo mencionado anteriormente en la IEEE Std C37.04bTM – 2008 [13] se explican los procedimientos de dos y cuatro parámetros que permite realizar el cálculo de los valores de TRV admitidos por la norma, su tasa de aumento y el tiempo que tarda en alcanzar esos valores: para tensiones menores a 100 kV se utiliza el método de dos parámetros y para tensiones mayores a ese valor el de cuatro parámetros.

CAPÍTULO 2

2. METODOS DE ANÁLISIS DE LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

El análisis transitorio es un tema complejo por lo cual para una mejor comprensión se hace necesario el conocimiento básico acerca de la naturaleza física del fenómeno.

Inicialmente se realiza el análisis de la tensión transitoria en un circuito LC producida por una o por varias frecuencias, luego se estudia las respuestas que se pueden generar en el circuito, en ésta parte se incluye la resistencia que produce amortiguamiento en el circuito. Más adelante se realiza el estudio de la tensión transitoria mediante ondas viajeras y el diagrama reticular, finalmente se explica el método de inyección de corriente y se hace una breve descripción de las herramientas de simulación para realizar el análisis de fenómenos transitorios en un sistema de potencia.

2.2 ESTUDIO MATEMÁTICO

Los fenómenos transitorios en un circuito pueden presentarse por muchos motivos, en el capítulo 1 se mencionó que la conmutación de interruptores es uno de ellos. Se ha hecho un enfoque a la desenergización de un circuito (apertura del interruptor) que genera una tensión transitoria de recuperación entre los polos del interruptor, por lo cual los análisis que se realizan a continuación se enfocan en este caso específicamente.

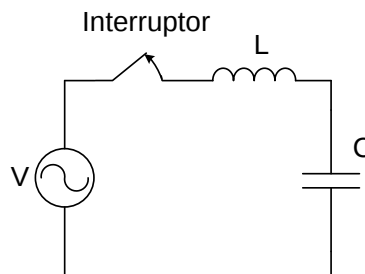
2.2.1 Desenergización de un circuito LC

Para comprender adecuadamente la interpretación matemática de la TRV se inicia realizando el análisis de un circuito LC, ya que la inductancia y la capacitancia son los componentes básicos que se tienen en una línea de transmisión. En este caso se desprecian las pérdidas representadas por la resistencia y de esa manera se obtienen los valores más grandes de tensión que se pueden generar.

2.2.1.1 Análisis transitorio de una frecuencia

El caso más sencillo para iniciar el análisis se presenta en la Figura 2.1: un circuito LC que en el momento que se abra el interruptor oscilará con una sola frecuencia de valor ω_0 como se muestra más adelante.

Figura 2.1 Circuito LC para el estudio transitorio a una frecuencia



Para este circuito se tiene que:

$$V = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.1)$$

Donde:

$$i = C \frac{dV_c}{dt} \quad y \quad V_c = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.2)$$

Por lo tanto V se puede escribir como:

$$V = LC \frac{d^2 V_c}{dt^2} + V_c \quad (2.3)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\frac{V}{s} = LC \left(s^2 V_c(s) - s V_c(0) - \frac{dV_c(0)}{dt} \right) + V_c(s) \quad (2.4)$$

En el momento en el que se abre el interruptor se tiene que $I(0)=0$ ya que la conmutación se sucede cuando la onda de corriente pasa por cero, por lo cual $C \frac{dV_c(0)}{dt} = 0$, sin embargo el valor de $V_c(0)$ no es necesariamente cero debido que la corriente circulante por el circuito antes de la interrupción carga el condensador.

Por lo tanto si se reemplaza el valor de $\frac{dV_c(0)}{dt} = 0$ en la ecuación 2.4 y se despeja el valor de $V_c(s)$ se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{V}{s} &= LC(s^2 V_c(s) - s V_c(0)) + V_c(s) \\ V_c(s) &= \frac{V}{s} \frac{1}{(s^2 LC + 1)} + \frac{s LC V_c(0)}{(s^2 LC + 1)} \\ V_c(s) &= \frac{V}{s LC} \frac{1}{\left(s^2 + \frac{1}{LC}\right)} + \frac{s V_c(0)}{\left(s^2 + \frac{1}{LC}\right)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Donde la frecuencia resonante del sistema está dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

Reemplazando en la ecuación 2.5 con el valor de ω_0 se obtiene:

$$V_c(s) = V \left(\frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \right) + \frac{s V_c(0)}{(s^2 + \omega_0^2)} \quad (2.7)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace:

$$V_c(t) = V(1 - \cos \omega_0 t) + V_c(0) \cos \omega_0 t \quad (2.8)$$

La anterior ecuación representa la tensión transitoria de recuperación, asumiendo que el condensador en el momento de la interrupción está cargado.

2.2.1.2 Análisis transitorio multifrecuencia

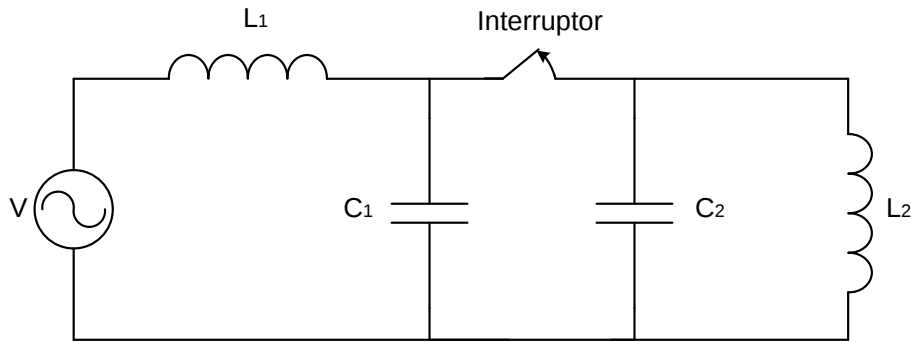
En la sección 2.2.1.1 se determinó el valor de la TRV que se obtiene en un circuito LC que oscila a una sola frecuencia, ahora se analizará un circuito un poco más similar a lo que se presenta en un sistema de potencia real en el que dos o más frecuencias pueden oscilar al mismo tiempo y generar cambios en las sobretensiones generadas.

En la Figura 2.2 se observa que en el momento de una interrupción, el circuito quedará dividido en dos partes: el lado de la fuente y el lado de la carga. El lado de la fuente tiene relacionados los elementos L_1 y C_1 , y el lado de la carga L_2 y C_2 , donde L_2 es mucho mayor que L_1 . En este circuito se puede analizar cada parte individualmente, sin alterar el resultado final, por lo cual sin recurrir a un gran análisis matemático [[8], [14]] es posible deducir lo que sucede en el sistema de la siguiente forma:

Cuando el interruptor se encuentra cerrado las capacitancias C_1 y C_2 tienen aproximadamente el mismo valor de carga (ver Figura 2.2), por divisor de tensión se tiene:

$$V_{c(1,2)} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} V \quad (2.9)$$

Figura 2.2 Circuito LC para el estudio transitorio con dos frecuencias



Después de la interrupción aparecen dos fenómenos: el condensador C_1 oscilará hasta tomar el valor de la fuente y el condensador C_2 por el contrario se descargará a través de L_2 .

El circuito del lado de la fuente oscilará a una frecuencia natural de:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2.10)$$

Y el lado de la carga a una frecuencia natural de:

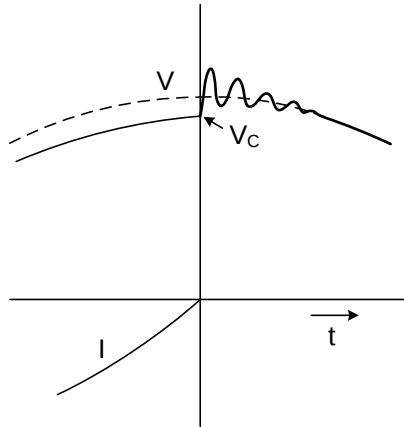
$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.11)$$

Observando las ecuaciones 2.10 y 2.11 es fácil deducir que el valor de f_1 es mayor que el de f_2 debido a que por lo general la carga tiene una impedancia más grande que la fuente.

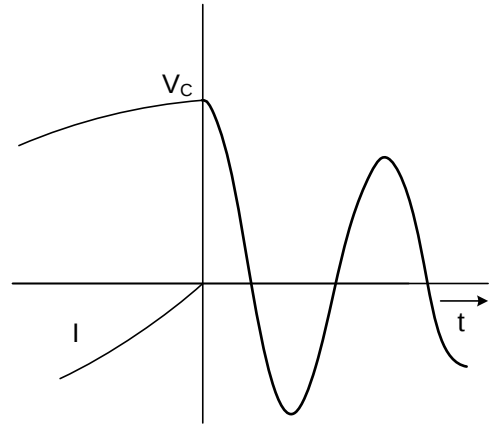
Finalmente, el valor de la tensión transitoria de recuperación es la diferencia de las dos ondas de tensión resultantes como se observa en la Figura 2.3 [14].

Figura 2.3 Tensión de recuperación en un circuito de doble frecuencia

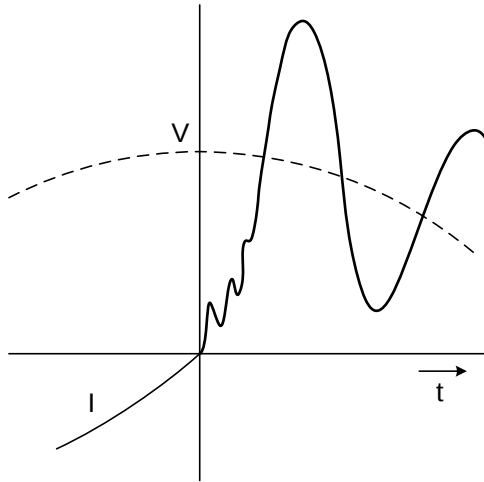
a) Transitorio del lado de la fuente a frecuencia f_1



b) Transitorio del lado de la carga a frecuencia f_2



c) Tensión transitoria de recuperación a través del interruptor.



2.2.2 Desenergización de un circuito LC amortiguado

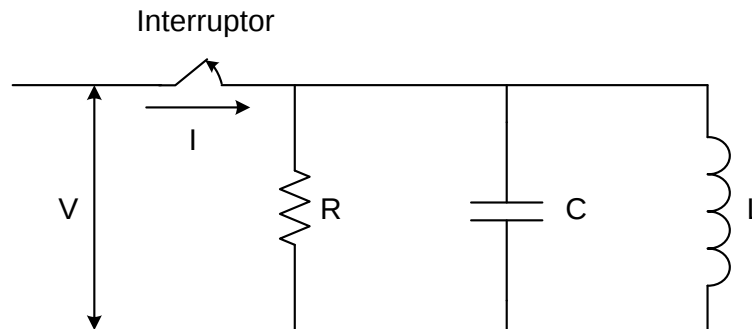
En el análisis realizado anteriormente no se tuvo en cuenta el amortiguamiento del circuito, pero todos los equipos y elementos conectados a un sistema de potencia poseen resistencias las cuales cumplen ésta función.

En la sección 2.2.1.2 se estudió que en un sistema las ondas fluctúan a frecuencias diferentes a la nominal; con el amortiguamiento se pretende que esas ondas no oscilen indefinidamente, si no por el contrario, que después de un determinado tiempo retomen la frecuencia del sistema.

2.2.2.1 Respuesta general de un circuito RLC

En la Figura 2.4 se encuentra el circuito que se utilizará para el estudio de la TRV, donde R representa la resistencia, L la inductancia, C la capacitancia, I la corriente y V la tensión nominal del sistema.

Figura 2.4 Circuito LC amortiguado



Para el circuito anterior se tiene inicialmente que:

$$\frac{V_c}{R} + C \frac{dV_c}{dt} + I_L = I \quad (2.12)$$

donde:

V_c : es la tensión a través del condensador

I_L : es la corriente a través del interruptor

Cuando se realiza la apertura del interruptor se suspende el flujo de corriente, por lo tanto $I = 0$, reemplazando este valor en la ecuación 2.12:

$$\frac{V_c}{R} + C \frac{dV_c}{dt} + I_L = 0 \quad (2.13)$$

En este caso, el condensador se empieza a descargar a través de L y R.

La ecuación 2.13 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\frac{V_c}{RC} + \frac{dV_c}{dt} + \frac{I_L}{C} = 0 \quad (2.14)$$

Donde:

$$V_c = V = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.15)$$

Derivando la ecuación 2.14 se tiene:

$$\frac{1}{RC} \frac{dV_c}{dt} + \frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{1}{C} \frac{dI_L}{dt} = 0 \quad (2.16)$$

Reemplazando la ecuación 2.15 en 2.16 obtenemos:

$$\frac{1}{RC} \frac{dV_c}{dt} + \frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = 0 \quad (2.17)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\begin{aligned} \left[s^2 V_c(s) - sV_c(0) - \frac{dV_c(0)}{dt} \right] + \left[\frac{sV_c(s)}{RC} - \frac{V_c(0)}{RC} \right] + \frac{V_c(s)}{LC} &= 0 \\ V_c(s) \left[s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC} \right] - V_c(0) \left[s + \frac{1}{RC} \right] - \frac{dV_c(0)}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

De la ecuación 2.14 se tiene:

$$\frac{dV_c(0)}{dt} = -\frac{V_c(0)}{RC} - \frac{I_L(0)}{C} \quad (2.19)$$

Pero como la interrupción de corriente se realiza cuando la onda pasa por cero, $I_L(0) = 0$, remplazando este valor en la ecuación 2.19 y despejando $V_c(s)$ de la ecuación 2.18 se obtiene:

$$V_c(s) \left[s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC} \right] - V_c(0) \left[s + \frac{1}{RC} \right] + \frac{V_c(0)}{RC} = 0$$

$$V_c(s) \left[s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC} \right] - sV_c(0) = 0$$

$$V_c(s) = \frac{sV_c(0)}{\left[s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC} \right]} \quad (2.20)$$

Factorizando el denominador de la ecuación 2.20:

$$\frac{1}{(s - s_1)(s - s_2)} = \frac{1}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{1}{(s - s_1)} - \frac{1}{(s - s_2)} \right) \quad (2.21)$$

Donde:

$$s_1 = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}} \quad y \quad s_2 = -\frac{1}{2RC} - \sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}} \quad (2.22)$$

Remplazando la ecuación 2.21 en 2.20:

$$V_c(s) = \frac{sV_c(0)}{2\sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}}} \left(\frac{1}{(s - s_1)} - \frac{1}{(s - s_2)} \right) \quad (2.23)$$

Para aplicar la transformada inversa de Laplace a la ecuación 2.23 [14] se debe tener en cuenta que:

$$\mathcal{L}^{-1}[sf(s)] = \frac{d}{dt} \mathcal{L}^{-1}[f(s)] + F(0) = V_c(t) \quad (2.24)$$

En este caso:

$$f(s) = \frac{V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} \left(\frac{1}{(s - s_1)} - \frac{1}{(s - s_2)} \right) \quad (2.25)$$

Por lo tanto:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} [e^{ts_1} - e^{ts_2}] \quad (2.26)$$

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} \left[e^{t(-\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}})} - e^{t(-\frac{1}{2RC} - \sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}})} \right] \quad (2.27)$$

La ecuación 2.26 expresa un resultado general de la $\mathcal{L}^{-1}[f(s)]$. Sin embargo como se mencionó anteriormente, la respuesta del circuito depende de los valores de los componentes que este posea, es decir de la relación entre los valores de $\frac{1}{4(RC)^2}$ y $\frac{1}{LC}$, y por tanto de s_1 y s_2 . De esta manera se pueden presentar 3 tipos de amortiguamientos para la desenergización del circuito de la Figura 2.4:

- Circuito sobreamortiguado.
- Circuito críticamente amortiguado.
- Circuito subamortiguado.

En cada uno de los casos la tensión transitoria de recuperación está dada por:

$$TRV = V - V_c(t) \quad (2.28)$$

donde:

V : es la tensión nominal del sistema, es decir en el lado de la fuente

$V_c(t)$: es la tensión en el condensador, es decir en el lado de la carga del circuito

2.2.2.2 Circuito sobreamortiguado

Un circuito presenta sobreamortiguamiento cuando:

$$\frac{1}{4(RC)^2} > \frac{1}{LC} \quad (2.29)$$

Por lo tanto si s_1 y s_2 son números reales el resultado de la ecuación 2.26 para este caso es la siguiente:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{2V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} e^{-t(\frac{1}{2RC})} \sinh\left(\frac{\sqrt{LC - 4(RC)^2}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \quad (2.30)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 2.24 se obtiene que el valor de $V_c(t)$ (ver anexo A) está dado por:

$$\begin{aligned} V_c(t) &= \frac{d}{dt} \mathcal{L}^{-1}[f(s)] + F(0) \\ V_c(t) &= V_c(0)e^{-t(\frac{1}{2RC})} \left[\cosh\left(\frac{\sqrt{LC - 4(RC)^2}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} \sinh\left(\frac{\sqrt{LC - 4(RC)^2}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \right] + F(0) \end{aligned} \quad (2.31)$$

2.2.2.3 Circuito críticamente amortiguado

Un circuito críticamente amortiguado se presenta cuando:

$$\frac{1}{4(RC)^2} = \frac{1}{LC} \quad (2.32)$$

Por lo tanto:

$$s_1 = s_2 = \frac{-1}{2RC} \quad (2.33)$$

Si se reemplazan los valores de s_1 y s_2 en la ecuación 2.24 ésta se indetermina debido a que $\sqrt{LC - 4(RC)^2} = 0$, la manera más sencilla para dar respuesta a este problema es reemplazar el valor de LC (ecuación 2.32) en la ecuación 2.24:

$$V_c(s) = \frac{sV_c(0)}{\left[s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{4(RC)^2}\right]}$$

$$V_c(s) = \frac{sV_c(0)}{\left[s + \frac{1}{4RC}\right]^2} \quad (2.34)$$

La ecuación 2.26 se puede escribir así:

$$f(s) = \frac{V_c(0)}{\left[s + \frac{1}{4RC}\right]^2}$$

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = te^{-t(\frac{1}{2RC})} \quad (2.35)$$

El valor de $V_c(t)$ esta dado por:

$$V_c(t) = \frac{d}{dt}\mathcal{L}^{-1}[f(s)] + F(0)$$

$$V_c(t) = V_c(0)e^{-t(\frac{1}{2RC})}\left[1 - \frac{t}{2RC}\right] + F(0) \quad (2.36)$$

2.2.2.4 Circuito subamortiguado

Un circuito presenta subamortiguamiento cuando:

$$\frac{1}{4(RC)^2} < \frac{1}{LC} \quad (2.37)$$

Por lo tanto s_1 y s_2 son números complejos:

$$s_1 = -\frac{1}{2RC} + j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}} \quad y \quad s_2 = -\frac{1}{2RC} - j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}} \quad (2.38)$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 2.26 se tiene que:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{V_c(0)}{2j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}}} \left[e^{t(-\frac{1}{2RC} + j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}})} - e^{t(-\frac{1}{2RC} - j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}})} \right] \quad (2.39)$$

Simplificando esta ecuación se obtiene:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{2V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{4(RC)^2 - LC}} e^{t(-\frac{1}{2RC})} \sin\left(\frac{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \quad (2.40)$$

De acuerdo a la ecuación 2.24 $V_c(t)$ (ver Anexo A) es:

$$\begin{aligned} V_c(t) &= \frac{d}{dt} \mathcal{L}^{-1}[f(s)] + F(0) \\ V_c(t) &= V_c(0)e^{-t(\frac{1}{2RC})} \left[\cosh\left(\frac{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{4(RC)^2 - LC}} \sinh\left(\frac{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \right] + F(0) \end{aligned} \quad (2.41)$$

2.3 ONDAS VIAJERAS

Cuando se energiza un sistema de potencia, las ondas de tensión y corriente viajan a través de las líneas, lo cual se puede observar cuando un sistema es representado mediante parámetros distribuidos, así, los elementos situados cerca de la fuente se energizan más rápido que los que se encuentran en puntos más alejados a ella.

Las ondas viajeras tanto de tensión como de corriente están expresadas matemáticamente por [15]:

$$V = F_1 \left(t + \frac{x}{v} \right) + F_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2.42)$$

$$I = YF_1 \left(t + \frac{x}{v} \right) + YF_2 \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

donde:

F_1 y F_2 son dos funciones arbitrarias

v es la velocidad de propagación

x es la distancia a lo largo de la línea

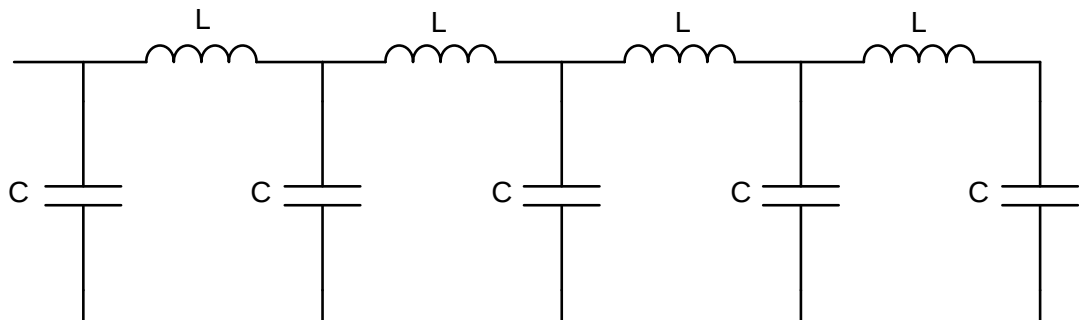
Y es la admitancia shunt por unidad de longitud

En el análisis de un fenómeno transitorio mediante la propagación de ondas se omite las pérdidas en el sistema, es decir que los valores de resistencia no se tienen en cuenta, por lo tanto el esquema de los elementos de la línea de transmisión incluye únicamente inductancias y capacitancias (Figura 2.5 [8]). Además como se está asumiendo una línea ideal, su impedancia característica se define como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.43)$$

donde L es la impedancia y C es la capacitancia del sistema

Figura 2.5 Representación de los elementos de una línea de transmisión



Los valores más comunes de impedancia de las líneas de transmisión se encuentran alrededor de 300 Ω y 500 Ω , el valor de 450 Ω es usualmente usado para líneas que tienen un solo conductor y el valor de 360 Ω para líneas con conductores agrupados [8]. Para hacer un buen estudio es necesario conocer un valor lo más aproximado posible al real, ya que de lo contrario implicaría cambios en el cálculo de las sobretensiones en el punto del sistema en estudio.

Los extremos de las líneas son conectados con otras líneas o con cables que llevan la energía a las cargas. Cuando una onda pasa de una línea a otra, o a un cable, con impedancias características de Z_1 y Z_2 respectivamente, lo que ocurre es que ha cambiado su medio de propagación, además como las impedancias no son las mismas necesariamente, lo que trae consigo nuevas ondas que se reflejan hacia la línea inicial de impedancia Z_1 y se transmiten a la de impedancia Z_2 .

La velocidad de propagación de las ondas en un análisis transitorio es importante debido a que con ella podemos encontrar el tiempo en el cual la onda se transporta a través de un conjunto de elementos en el sistema de potencia. Esta velocidad está relacionada tanto con la capacitancia como con la inductancia del conductor de la siguiente manera:

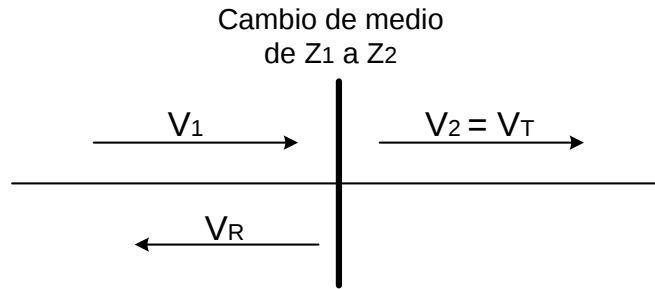
$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.44)$$

Para las líneas aéreas la velocidad de propagación es aproximadamente igual a la velocidad de la luz, es decir 300 m/ μ s, para cables la velocidad es menor a ésta velocidad, siendo cerca del 20 %, es decir unos 60 m/ μ s.

2.3.1 Reflexión y transmisión de ondas

Si analizamos un sistema compuesto por dos líneas como el de la Figura 2.6, con impedancias Z_1 y Z_2 respectivamente, una onda viaja desde la línea de impedancia Z_1 hasta la de impedancia Z_2 .

Figura 2.6 Reflexión y transmisión de ondas en la unión de dos líneas



Los coeficientes de reflexión y transmisión estarán dados por [15]:

Reflexión de Z_1 a Z_2 :

$$K_R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.45)$$

Transmisión de Z_1 a Z_2 :

$$K_T = \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.46)$$

Para realizar el análisis correcto de lo que sucede es importante conocer que se encuentra en el final de la línea a la cual se le transmite la onda:

Si la línea termina en un cortocircuito $Z_2=0$ entonces:

$$K_R = -1 \quad y \quad K_T = 0 \quad (2.47)$$

Si la línea termina en circuito abierto $Z_2=\infty$ entonces:

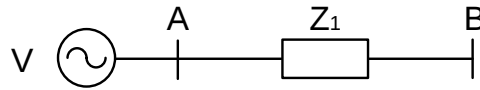
$$K_R = 1 \quad y \quad K_T = 2 \quad (2.48)$$

2.3.2 Diagrama Reticular

Es un método gráfico que permite determinar la tensión en un punto de la línea, en un instante de tiempo cuando se presentan ondas viajeras. El método no tiene en cuenta las pérdidas que se pueden presentar en la línea, es decir el valor de resistencia, pero permite considerar los efectos de la atenuación de las ondas. Este método fue desarrollado por L.V. Bewley [16].

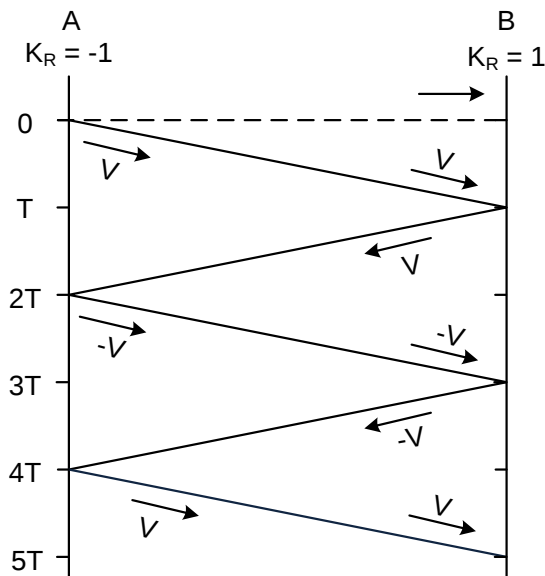
El ejemplo típico para explicar el método es la energización de una línea terminada en circuito abierto, el esquema se puede observar en la Figura 2.7:

Figura 2.7 Línea en circuito abierto



La línea A-B se energiza a una voltaje V , debido a que la fuente de tensión se asume ideal, por lo tanto no hay caída de tensión al llegar al punto A, se toma ese extremo como un cortocircuito donde $K_R = -1$, y debido a que el extremo B esta en circuito abierto, es decir, tiene una impedancia infinita, el coeficiente de reflexión esta dado por $K_R = 1$.

Figura 2.8 Diagrama reticular de una línea en vacío



En la Figura 2.8 se puede observar el diagrama reticular para la línea en circuito abierto. En un tiempo igual a cero, se aplica una señal de tensión V que viaja por la línea hasta el punto B en un tiempo de T donde se refleja con un coeficiente de

1, ahora la onda V viaja hasta el punto A y se refleja esta vez con un coeficiente de -1 , por tanto la onda viajera $-V$ se traslada al extremo B de nuevo y se refleja como ya se ha descrito anteriormente. Este proceso puede continuar hasta el valor de tiempo en que se requiera determinar la tensión.

El tiempo en la transmisión y reflexión de la onda se calcula teniendo en cuenta la velocidad de la onda (ver Ecuación 2.44) y la distancia que ésta debe de recorrer en la línea.

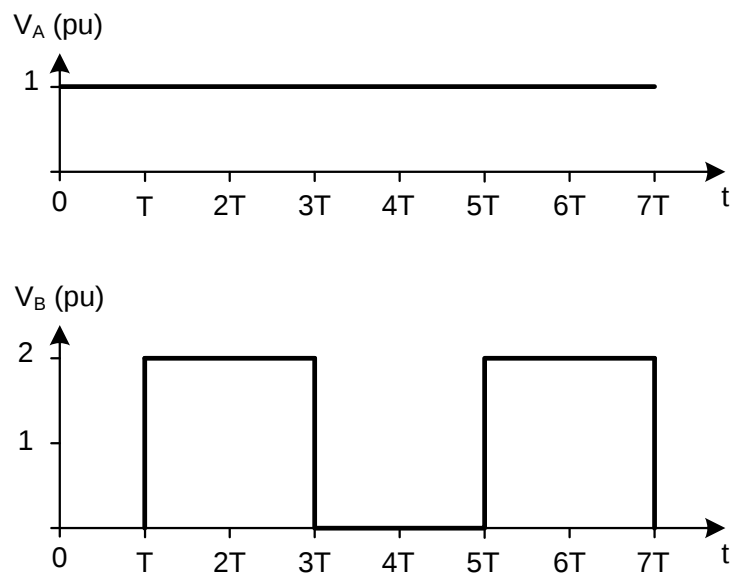
Para calcular la tensión en un punto de la línea, basta con sumar las tensiones que entran y salen de ese punto en un tiempo determinado. Por ejemplo en un tiempo de $2T$ se tiene:

$$V_A = V + V - V = V \quad (2.49)$$

$$V_B = V + V = 2V$$

Gráficamente el resultado tanto para V_A como para V_B en un periodo de $7T$ se puede observar en la Figura 2.9.

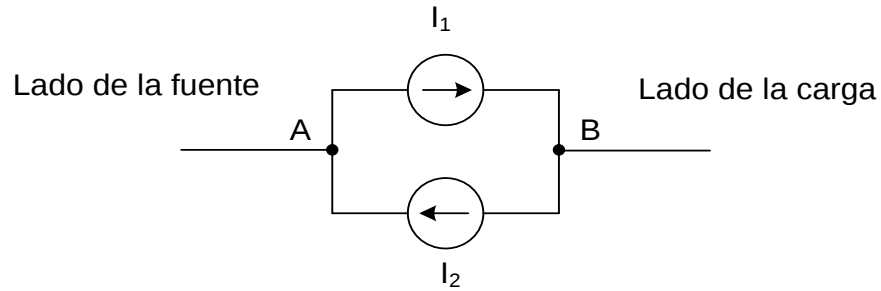
Figura 2.9 Tensiones en los extremos A y B de una línea en vacío



2.4 INYECCIÓN DE CORRIENTE

El método de inyección de corriente presentado en la Figura 2.10 es utilizado para determinar la tensión transitoria que se genera en un interruptor una vez se lleva a cabo la salida de funcionamiento de una línea. El método consiste en reemplazar el interruptor por una fuente de corriente ideal (I_1) con valor de magnitud y dirección igual a la de la corriente existente en el instante anterior a la interrupción, en paralelo a ésta fuente se ubica otra con sentido contrario (I_2).

Figura 2.10 Método de inyección de corriente



Por lo tanto:

$$I_2 = -I_1 \quad (2.50)$$

Conociendo la impedancia del lado de la fuente y del lado de la carga, Z_A y Z_B respectivamente, se determina el valor de tensión en cada uno de los extremos V_A y V_B de la siguiente forma:

$$V_A = I_1 * Z_1 = -I_2 * Z_1 \quad (2.51)$$

$$V_B = I_2 * Z_2 \quad (2.52)$$

La tensión transitoria de recuperación (V_{AB}) es igual a la diferencia entre V_A y V_B

$$V_{AB} = V_A - V_B = TRV \quad (2.53)$$

2.5 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

Con el desarrollo de los sistemas eléctricos y su expansión en el mundo, han ido apareciendo cada vez más componentes que han llevado a que los sistemas de potencia sean más complejos y de igual manera su análisis se ha vuelto más complicado.

Los avances tecnológicos han traído consigo la facilidad de realizar procesos de una forma rápida y confiable. Este es el caso de los programas utilizados como herramientas de simulación, en ellos se han implementado gran cantidad de elementos con el objetivo de que los resultados obtenidos sean muy cercanos a los reales.

Entre los programas más utilizados para análisis transitorios está EMTP que es un programa de transitorios electromagnéticos, fue desarrollado originalmente por el profesor Hermann W. Dommel y Scott Meyer [17], de este se crearon diferentes versiones:

- EMTP_{RV}
- ATP/EMTP (Alternative Transient Program)
- PSCAD (Power Systems Computer Aided Design)

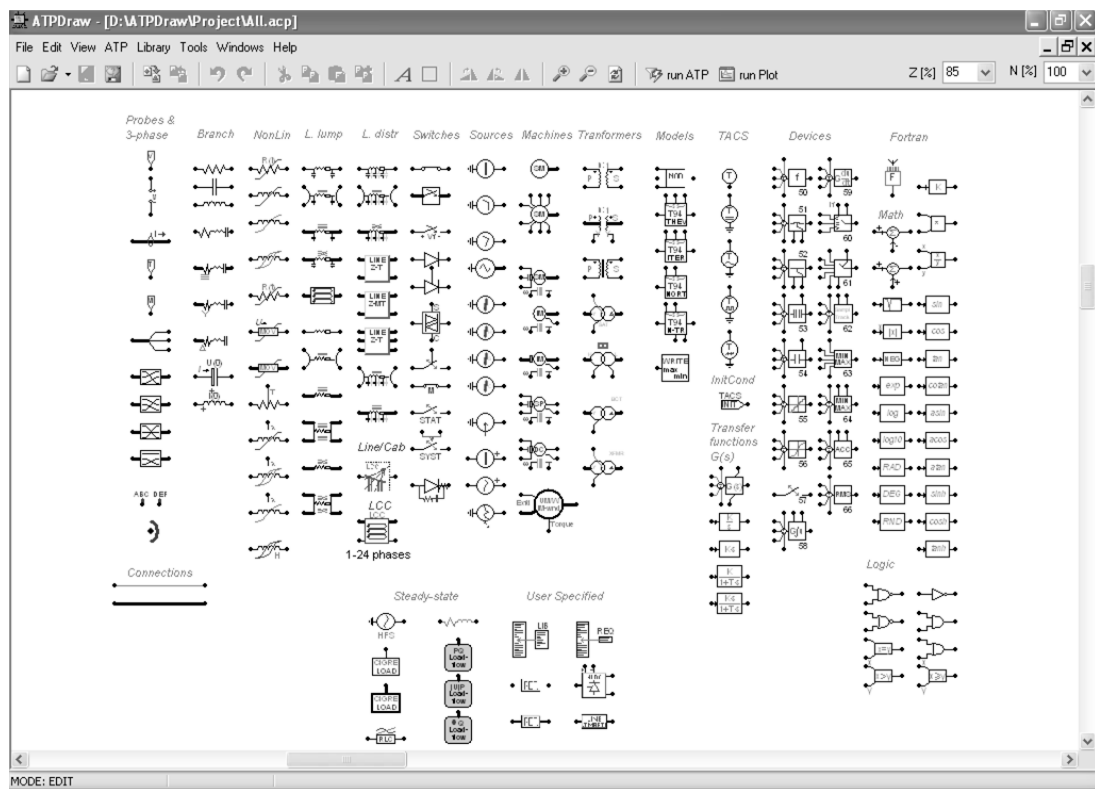
2.5.1 EMTP_{RV}

El lanzamiento de EMTP_{RV} en 2003, el software comercial de análisis de transitorios técnicamente más avanzados para la simulación de diversos fenómenos. La versión EMTP_{RV}, se desarrolló bajo la dirección técnica de Hydro-Québec. Cuenta con funcionalidades nuevas y mejoradas, así como el estado de la técnica de las herramientas de análisis. Rediseñada para ofrecer una mayor comodidad y rendimiento de simulación de diseño, EMTP_{RV} no es una actualización es un reemplazo completo de EMTP [18].

2.5.2 ATP / EMT

El EMT (actualmente conocido como ATP) es la versión libre que fue cedida a la Bonneville Power Administration (BPA). Desde entonces, el EMT fue expandido y distribuido bajo la dirección de la BPA por Scott Meyer, quien desarrolló algunos modelos para el programa y otros han sido desarrollados por otras empresas y universidades [15]. En la Figura 2.11 se muestra la ventana principal de ATP con algunos elementos del programa.

Figura 2.11 Ventana principal de ATP y elementos del programa

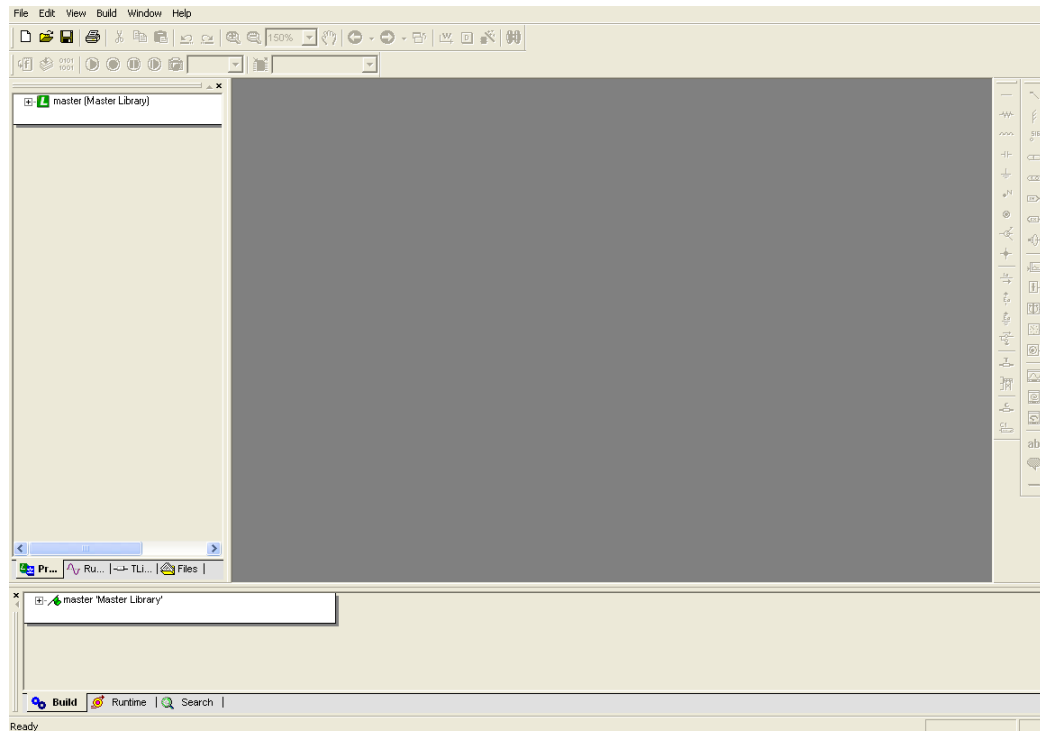


2.5.3 PSCAD

En 1990 EMTDC crea PSCAD para dar a sus usuarios eficiencia y simplicidad mediante el desarrollo de una interfaz gráfica. EMTDC es un simulador de transitorios comercial inspirado por el Dr. Hermann Dommel, en él se simulan

redes eléctricas con la capacidad de modelar electrónica de potencia compleja, controles y la red no lineal. En la Figura 2.12 se muestra la ventana principal de PSCAD [19].

Figura 2.12 Ventana principal de PSCAD



2.5.4 Otros

Además de los programas mencionados anteriormente actualmente softwares especializados en análisis de flujo potencia como NEPLAN y DigSilent han implementado librerías de transitorios con el fin de ampliar sus opciones de análisis.

Es importante tener en cuenta que aunque algunos programas brinden una gran confiabilidad en sus resultados, se necesita un buen conocimiento del fenómeno que se esté estudiando ya que esto permitirá que se interprete de una manera adecuada los resultados y así llegar a soluciones efectivas.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA EN ATP

3.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha estudiado los conceptos básicos de la tensión transitoria de recuperación, los elementos que causan su variación y los métodos utilizados para analizarla.

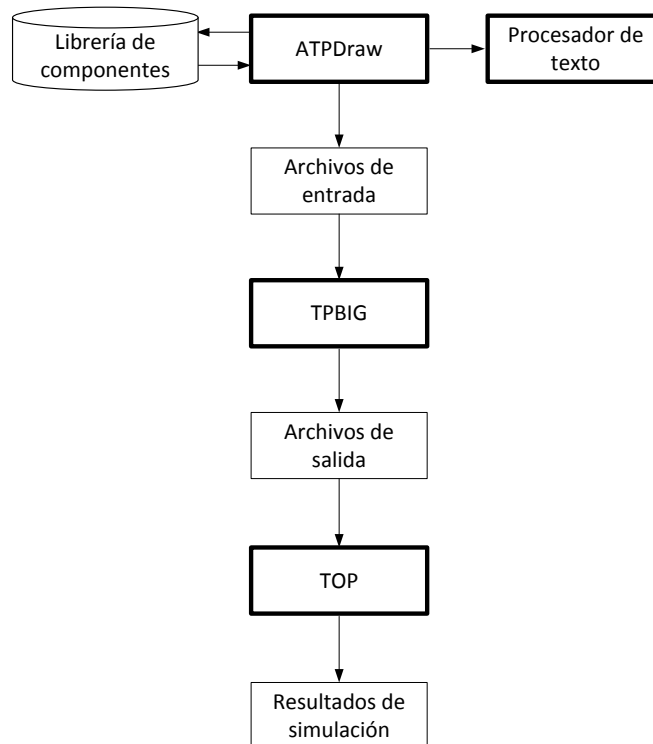
En este capítulo se realiza la implementación de un sistema de potencia en el programa de simulación de fenómenos transitorios EMTP/ATP. Inicialmente se hace una breve introducción del programa a utilizar, posteriormente se describen las características del sistema implementado y la forma como fue modelado en el programa de simulación. Para finalizar se realizan diferentes fallas en el sistema y se analiza el comportamiento de los valores y la forma de onda de la tensión transitoria obtenidas en cada caso dependiendo de los elementos conectados al sistema de potencia.

3.2 ATP (Alternative Transient Program)

El programa ATP (Alternative Transient Program) ha sido seleccionado como herramienta para la implementación y simulación del sistema de potencia debido a que es uno de los programas más utilizado para el estudio de fenómenos transitorios en el mundo, proporciona una gran librería con elementos que pueden ser utilizados dependiendo del tipo de fenómeno que se desea estudiar, se obtiene sin costo, sus resultados son confiables. La Figura 3.1 [15] muestra la secuencia

de tareas que se realizan en un estudio de simulación con los programas que integran el paquete ATP.

Figura 3.1 Secuencia de simulación en ATP



Para una adecuada simulación se tiene:

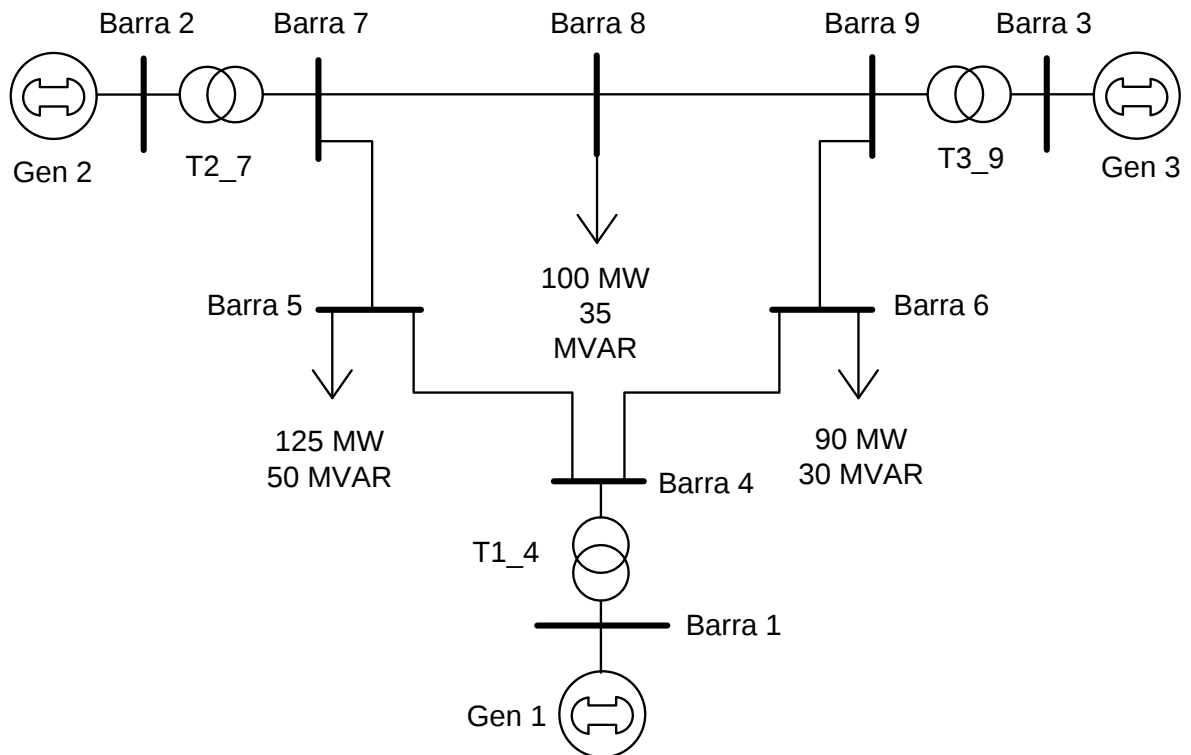
- Con el fin de proporcionar la facilidad para implementar diferentes sistemas ATP posee una interfaz gráfica amigable con el usuario denominada ATPDraw como se mostró en la Figura 2.11.
- El ATP es un programa especializado en el análisis de fenómenos transitorios electromagnéticos y electromecánicos. Con este programa se pueden simular redes complejas y sistemas de control. Aunque se utiliza primordialmente para análisis transitorio, el programa ATP tiene una gran funcionalidad y también permite realizar otros tipos de estudios, por ejemplo análisis de sistemas en estado estable, estudio en frecuencia, etc [20].

- TOP (The Output Processor) es un programa compatible con ATP que proporciona una buena visualización de los datos de salida, en alta calidad, además visualización en tablas y entre otras cosas permite realizar operaciones matemáticas con los datos leídos.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO

Para el análisis de la tensión transitoria de recuperación se tomó como referencia el sistema de Western System Coordinating Council (WSCC) de 9 barras [21], el cual se encuentra formado por 3 generadores y 3 cargas con una frecuencia nominal de 60 Hz, que a su vez conforman un anillo como se puede observar en la Figura 3.2.

Figura 3.2 WSCC 9 barras



3.3.1 Generadores

El sistema está compuesto por 3 generadores: un hidrogenerador de 16,5 kV, y dos generadores de vapor de 18 kV y 13,8 kV, ubicados en las barras 1, 2 y 3 respectivamente (ver Figura 3.2). Los datos correspondientes a cada generador se encuentran en la Tabla A.1 del Anexo B.

3.3.2 Transformadores

Cada transformador está encargado de elevar la tensión desde el valor de entrada en baja tensión hasta 230 kV que corresponde a la tensión nominal del sistema. La conexión de los transformadores DY_{11} aterrizados y las potencias de cada uno de ellos se encuentran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos de los transformadores

Transformador	T1_4	T2_7	T3_9
Barras de interconexión	1 a 4	2 a 7	3 a 9
Potencia (MVA)	100	200	125

3.3.3 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión con una tensión nominal de 230 kV. Las características de los conductores de fase se tomaron del Catálogo de Centelsa: Conductores de Aluminio Desnudo [22]. En la Tabla 3.2 se muestran las características del conductor de fase e hilo guarda. La disposición de conductores y dimensiones de la torre se pueden apreciar en la Figura 3.3 [23].

Las características de cada línea se encuentran en el Anexo B Tabla A3 y fueron obtenidas mediante su implementación en ATP utilizando el modelo PI. Las longitudes de las líneas se encuentran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2 Características de los conductores

Conductor	Tipo	Diámetros (mm)		Resistencia (Ω/km)
		Núcleo	Total	DC a 20°C
Fase	Grosbeack	9,27	25,16	0,0875
Hilo guarda	94S	--	12,60	0,642

Figura 3.3 Torre de 230 kV

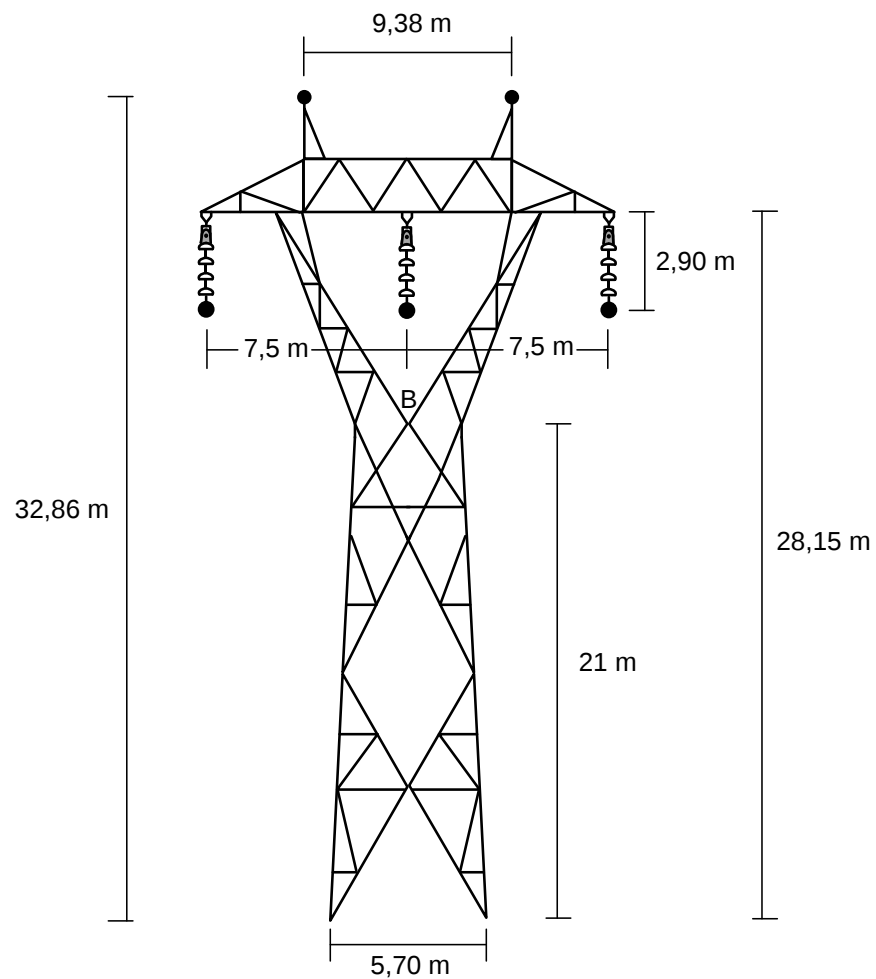


Tabla 3.3 Longitud de las líneas

Línea	Barras de interconexión	Longitud de la línea (km)
1	4 a 5	49,4
2	4 a 6	84,0
3	5 a 7	158,2
4	6 a 9	192,8
5	7 a 8	42,0
6	8 a 9	58,8

3.3.4 Cargas

Las cargas se encuentran ubicadas en las barras 5, 6 y 8 como se puede observar en la Figura 3.2, sus valores son especificados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Características de las cargas

Barra	Potencia activa (MW)	Potencia reactiva (MVAR)	Factor de potencia
5	125	50	0,928
6	90	30	0,948
7	100	35	0,943

3.4 IMPLEMENTACIÓN ATP

El ATP brinda una gran variedad de componentes que dependiendo del tipo de estudio a realizar se pueden utilizar. Se verificó el funcionamiento correcto del sistema que se implementa en ATP mediante el programa Power World. La forma

en la que ha sido modelado cada elemento en el sistema de potencia se describe a continuación:

3.4.1 Generadores

Los generadores se modelaron como fuentes de tensión ideales con sus respectivos valores nominales. Conectadas en serie a cada fuente se ubicaron las inductancias de secuencia positiva y cero, el valor de inductancia de secuencia positiva fue determinado con la reactancia subsincronica de la maquina (X'') y el de secuencia cero se tomaron valores típicos dependiendo del tipo de máquina: $X''/4,7$ para hidrogenadores y $X''/2,4$ para generadores de vapor [[24], [25]].

3.4.2 Transformadores

El modelo de transformador utilizado es el modelo Híbrido, los valores de potencia y tensión para cada uno de ellos están descritos en la tabla 3.1. El modelo seleccionado en ATPDraw proporciona la opción de utilizar valores típicos para las características internas de los transformadores.

3.4.3 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión se simularon utilizando el modelo JMarti debido a que es un modelo de parámetros distribuidos que depende de la frecuencia, ya que como se puede observar en la Tabla 1.1 dependiendo del tipo de falla, el sistema puede cambiar su frecuencia nominal. Las características de las líneas implementadas en el modelo se encuentran en la sección 3.3.3.

3.4.4 Cargas

Las cargas fueron modeladas como equivalentes RL serie, los valores utilizados son especificados en la Tabla 3.4.

3.4.5 Interruptores

Se utilizó el modelo ideal de interruptor de tiempo controlado, por lo tanto el valor de TRV obtenido se denomina *tensión de recuperación inherente* como se mencionó en el Capítulo 1, en la norma IEEE Std C37.011TM– 2011 [5]. La orden de apertura de los interruptores se realiza a los 53,3 ms después del inicio de la falla, este tiempo fue utilizado debido a que en la sección 1.4.2.3 existen valores en la operación de interruptores entre los 17 ms y los 63 ms.

3.5 SIMULACIÓN ATP

3.5.1 Condiciones generales

A continuación se presenta el modelado paso a paso del sistema de referencia (Figura 3.2) de acuerdo a las características descritas en la sección 3.4, a su vez se simulan los distintos tipos de fallas con el fin de realizar el análisis del efecto de cada elemento en la tensión transitoria de recuperación.

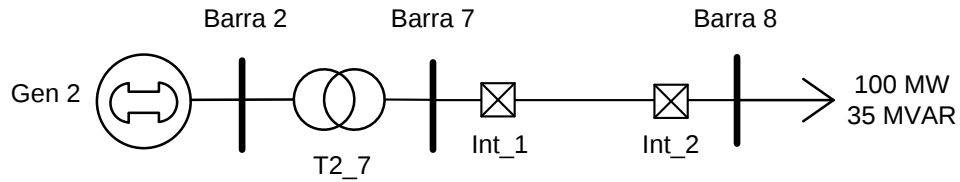
Para el análisis se toma como punto de estudio la línea entre las barras 7 y 8 (ver Figura 3.4), en cada caso se realizan 4 fallas diferentes:

- Falla en terminales trifásica aterrizada en la barra 7
- Falla en terminales trifásica no aterrizada en la barra 7
- Falla en terminales monofásica en la barra 7
- Falla en línea corta, a 10 km de la barra 7.

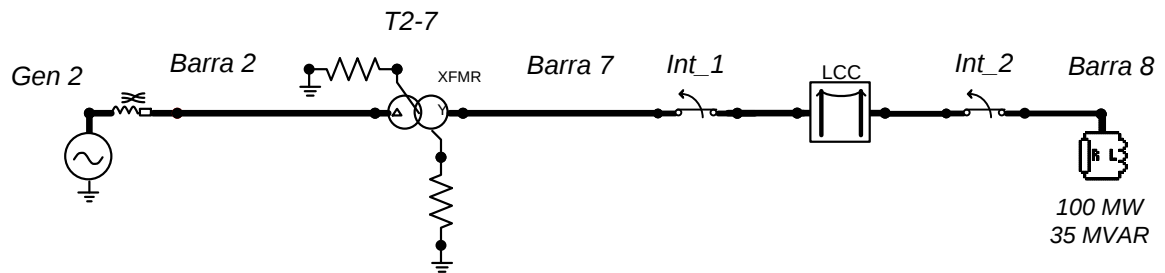
Las fallas se presentan a los 11,3 ms después del inicio de la simulación y la orden de apertura del interruptor se da a los 53,3 ms, sin embargo es importante señalar que el interruptor opera en el paso por cero de la corriente.

Figura 3.4 Punto de estudio del sistema

a) Diagrama unifilar



b) Implementación en ATPDraw



El interruptor 1 (Int_1) se ubica al lado de la barra 7 y el interruptor 2 (Int_2) junto a la barra 8 como se observa en la Figura 3.4.

Las figuras obtenidas en las diferentes simulaciones muestran valores pico de tensión, en este caso, debido a que el sistema posee una tensión nominal línea a línea de 230 kV, la tensión pico nominal línea a línea es de 187,8 kV.

Para cada caso de simulación y tipos de falla se muestra una tabla con los valores de tensión transitoria obtenida que es el valor pico máximo alcanzado en el transitorio y los valores de tasa de crecimiento la cual se calcula dividiendo el valor del primer pico de tensión y el tiempo desde el inicio del mismo en el cual es obtenido, su unidad está dada en kV/ μ s.

3.5.2 Un generador alimentando una carga

El análisis se inicia simulando el generador 2, las barras 2 y 7, la carga de la barra 8 y los componentes con las que se interconectan (ver Figura 3.4 a), por lo tanto se obtiene un sistema conformando por una fuente generadora, un transformador, una línea y una carga. En este caso únicamente se ubica el interruptor 1 (Int_1) y es el encargado de despejar las fallas generadas entre las barras 7 y 8.

Se realizan dos tipos de fallas:

- Las fallas en terminales mencionadas en la sección 3.5.1 en el punto A (ver Figura 3.5).
- La falla en línea corta se ubica a 10 km de la barra 7, para este caso el circuito simulado se presenta en la Figura 3.6.

Figura 3.5 Falla en terminales

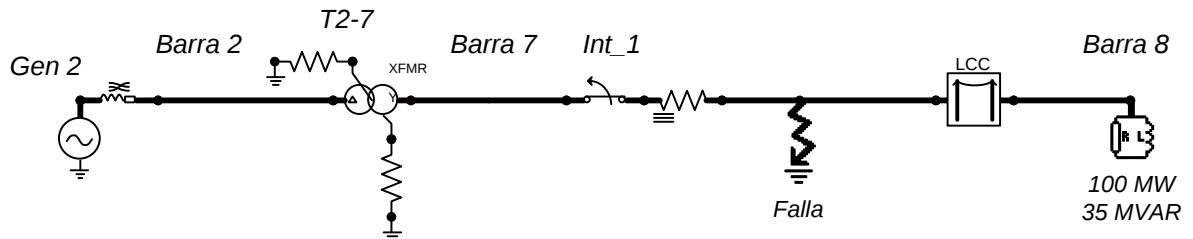
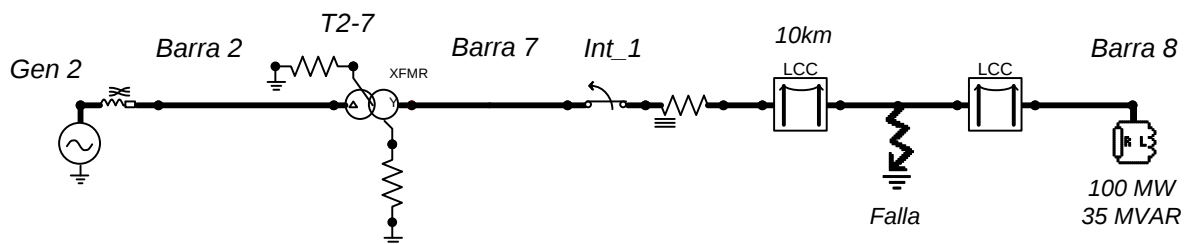


Figura 3.6 Falla en línea corta



Las formas de onda obtenidas en cada caso se pueden observar en las Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10, cada una de ellas conformadas por dos figuras:

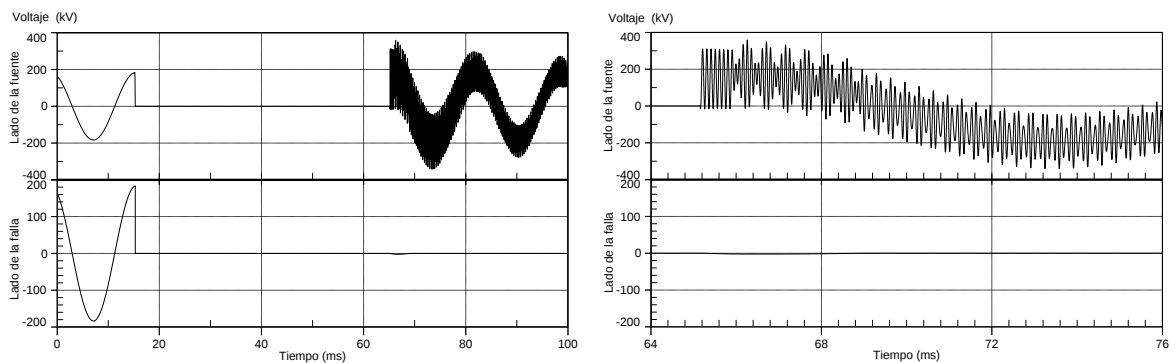
- En la figura a) ubicada en la parte izquierda se presentan los aportes a la TRV tanto del lado de la fuente generadora como al lado de la falla, en la figura ubicada del lado derecho se realiza una ampliación para poder observar mejor su comportamiento.
- En la figura b) ubicada del lado izquierdo se encuentra la forma de onda de la tensión transitoria de recuperación obtenida de la sustracción de las dos ondas de la figura a) y en la figura del lado derecho una ampliación que permite ver con mayor claridad su forma.

3.5.2.1 Fallas en terminales (Un generador alimentando una carga)

A continuación se presentan las figuras obtenidas para la fallas en terminales trifásicas y monofásica, además una tabla con los valores correspondientes a cada una:

Figura 3.7 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema: un generador alimentando una carga)

a) Aporte del lado de la fuente y de la falla a la TRV



b) Tensión transitoria de recuperación

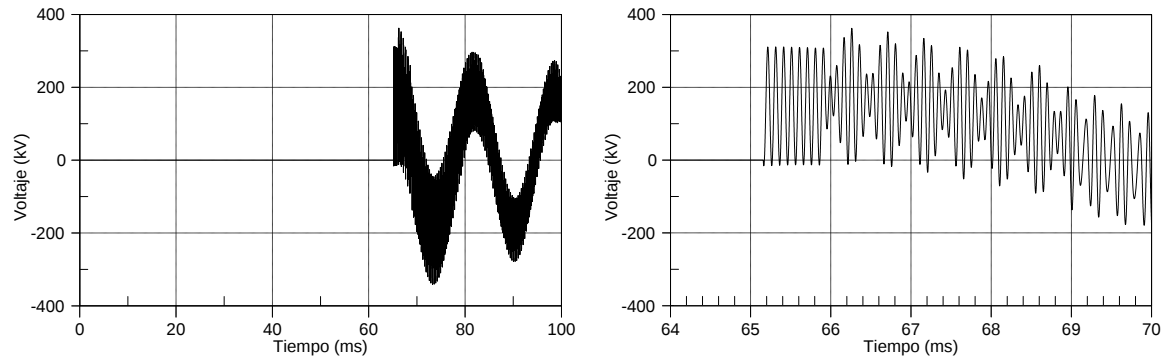
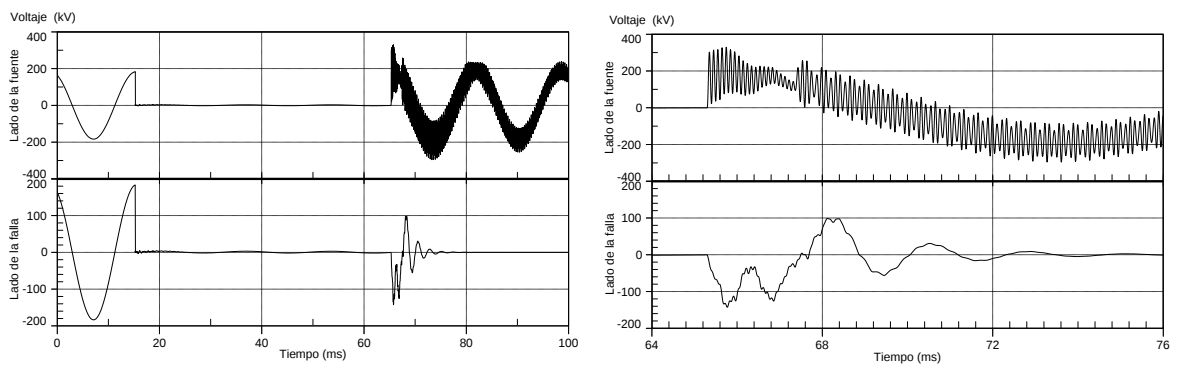


Figura 3.8 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema: un generador alimentando una carga)

a) Aporte del lado de la fuente y de la falla a la TRV



b) Tensión transitoria de recuperación

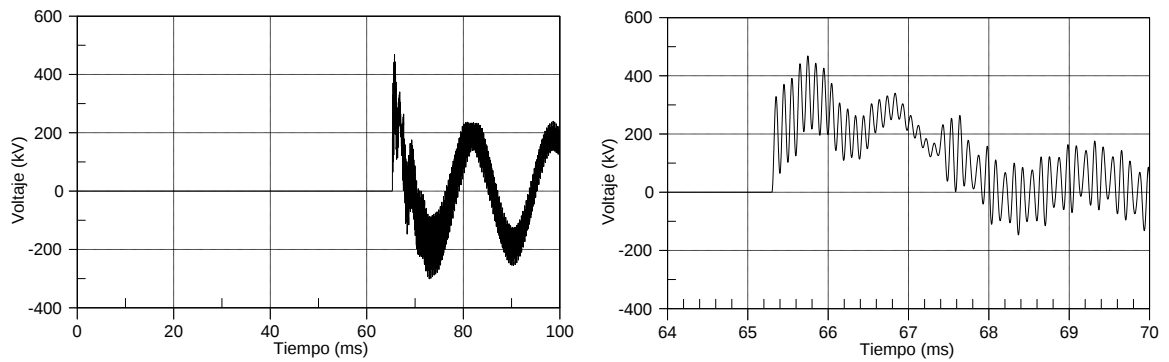
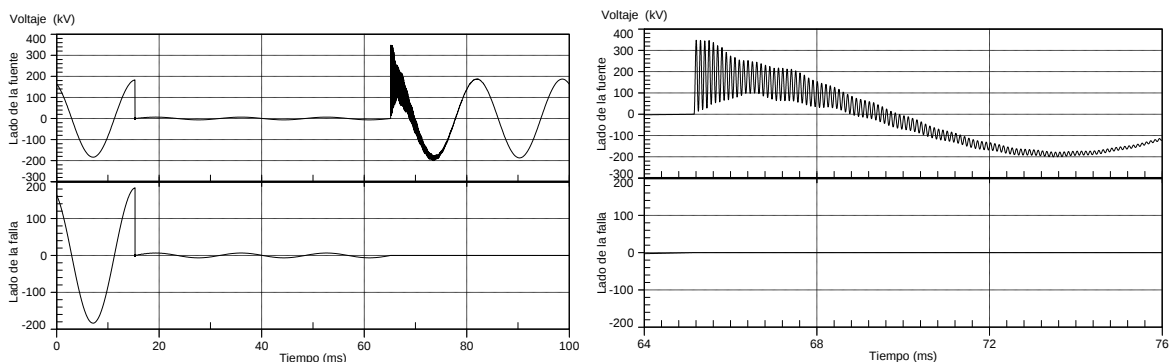


Figura 3.9 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales monofásica, sistema (un generador alimentando una carga)

a) Aporte del lado de la fuente y de la falla a la TRV



b) Tensión transitoria de recuperación

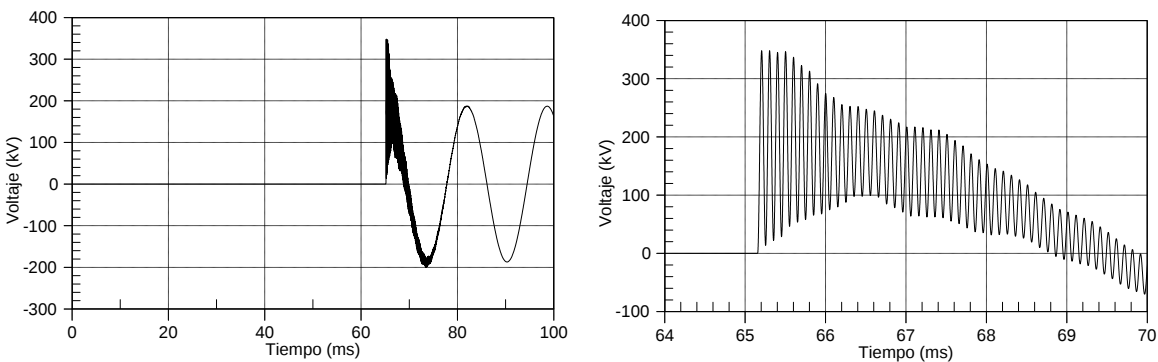


Tabla 3.5 Valores de TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema: un generador alimentando una carga)

Figura	Falla en terminales	TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)
3.7	trifásica aterrizada	362,5	5,45
3.8	trifásica no aterrizada	468,6	6,57
3.9	monofásica	348,7	6,44

En las Figuras 3.7 a), 3.8 a) y 3.9 a) las componentes de tensión disminuyen a valores cercanos a cero durante el tiempo de simulación desde el inicio de la falla

hasta el momento antes de la apertura del interruptor de la barra 7, esto se debe al efecto del cortocircuito generado: una baja resistencia en el punto de falla que produce una alta corriente y estas a su vez una caída de potencial.

En el momento de la apertura del interruptor en el polo del lado de la fuente se intenta restablecer la tensión nominal del sistema, mientras que el lado de la falla se aísla.

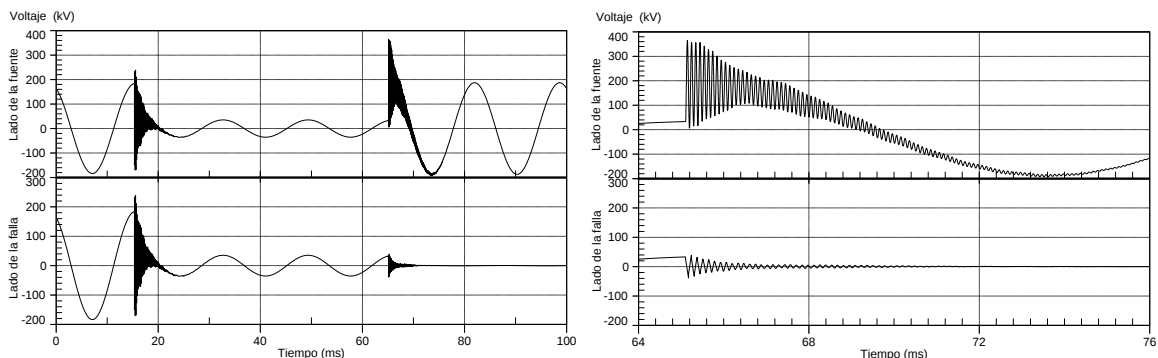
En las fallas en terminales monofásica (Figura 3.9 a) y trifásica aterrizada (Figura 3.7 a) la barra 7 queda aterrizada lo que hace que el polo del lado de la falla del interruptor 1 también lo haga, esto permite que al abrir el interruptor la tensión del lado de la falla se establezca fácilmente en cero. Por otro lado en la falla en terminales trifásica no aterrizada (Figura 3.8), al abrir el interruptor se presenta un transitorio de tensión del lado de la carga debido a que la tensión de ese lado intenta restablecerse a través del cortocircuito que presentan las 3 fases como se puede observar en la Figura 3.8 a).

3.5.2.2 Fallas en línea corta (Un generador alimentando una carga)

A continuación se presentan las formas de onda obtenidas y una tabla con los valores correspondientes de TRV para la falla en línea corta:

Figura 3.10 Comportamiento de la TRV en una falla en línea corta (sistema: un generador alimentando una carga)

a) Aporte del lado de la fuente y de la falla a la TRV



b) Tensión transitoria de recuperación

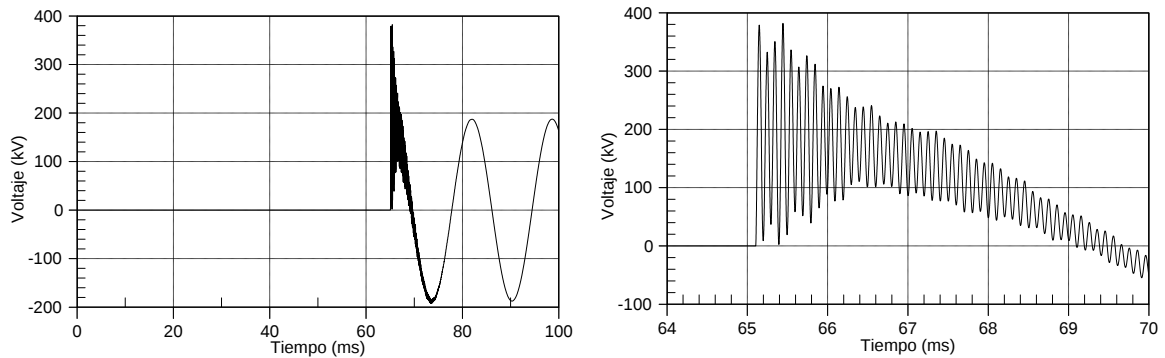


Tabla 3.6 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema: un generador alimentando una carga)

Falla en línea corta	TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)
Figura 3.10	381,7	9,51

En la falla en línea corta (Figura 3.10) se observa que la tensión durante el periodo entre el inicio y el despeje de la falla por el interruptor 1 no cae tan bruscamente como lo hace en las fallas en terminales debido a que la falla se encuentra alejada del interruptor por medio de un tramo de la línea lo que permite que la onda de tensión siga viajando a través de este (ver Figura 3.10 a).

En el interruptor 1, en el lado de la fuente la tensión pretende restablecerse y en el lado de la falla se genera una componente de forma de onda triangular: diente de sierra, como se indicó en la sección 1.4.1.2, que permanece unos cuantos milisegundos hasta disminuir a cero.

Tanto en las fallas en terminales como en la falla en línea corta se observa que la onda que se genera del lado de la fuente de los interruptores es la que contribuye en mayor grado a la tensión transitoria de recuperación, por lo que en todos los

casos se tienen formas de onda oscilatorias (sección 1.4.1.2) que en conjunto con la onda del lado de la carga proporcionan como resultado una TRV similar a la observada en el Caso 3 de la Tabla 1.1.

3.5.3 Dos generadores alimentando una carga

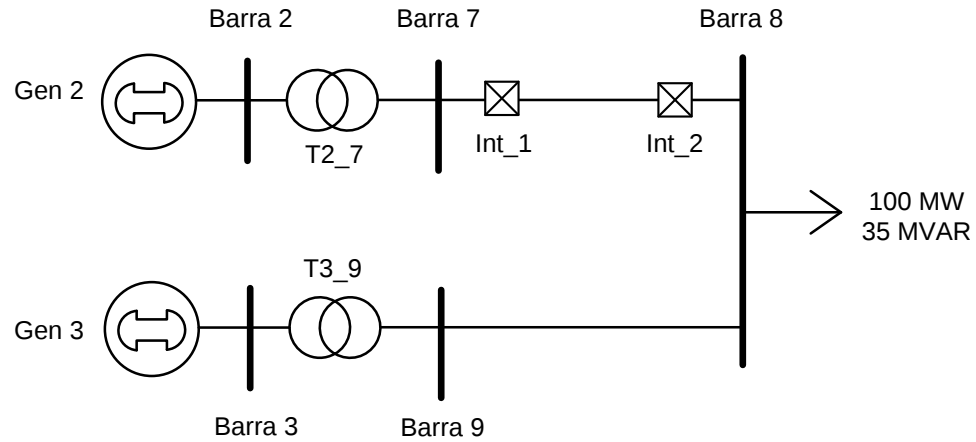
Se adiciona el generador 3 al sistema de la sección 3.5.2, por lo tanto se obtiene un sistema conformando por dos fuentes generadoras, dos transformadores, dos líneas, una carga y 2 interruptores como se observa en la Figura 3.11. La apertura del interruptor 2 permite que una vez despejadas las fallas provocadas, el generador 3 quede alimentando la carga de la barra 8.

Las fallas se realizan tal como se describieron en la sección 3.5.1 y el tiempo de apertura para los dos interruptores es el mismo. Los resultados de la tensión transitoria de recuperación se muestran en las Figura 3.12, 3.13 y 3.14, cada una de ellas conformadas por dos figuras:

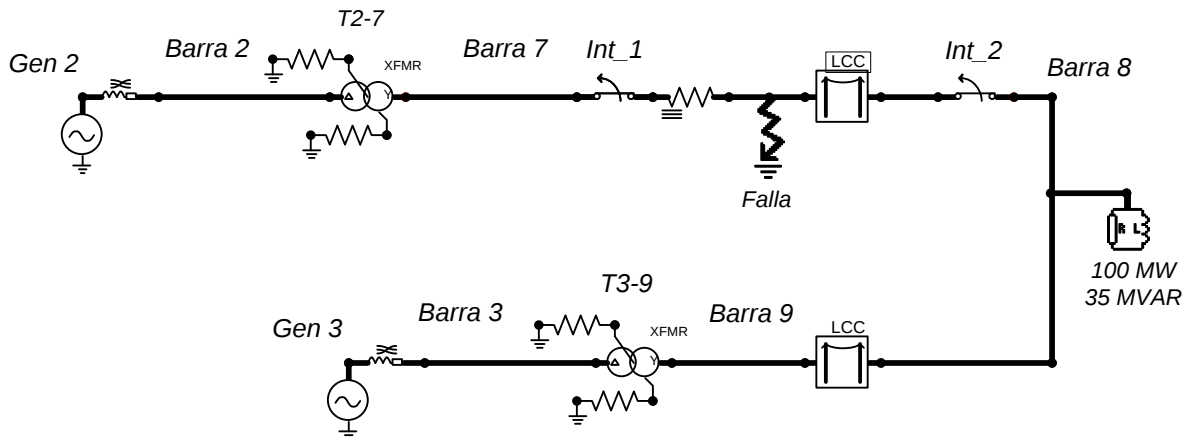
- En la figura a) se muestra la tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1, en el lado izquierdo se presenta el efecto de la tensión del lado de la fuente generadora y del lado de la falla, en la figura ubicada en la parte derecha la TRV entre los 64 ms y los 70 ms con el fin de poder visualizar mejor la forma de onda generada.
- En la figura b) se encuentra la tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2, en la figura ubicada del lado izquierdo se presenta el efecto de la tensión del lado de la falla y del lado de la carga. En la figura del lado derecho, la tensión transitoria de recuperación entre los 64 y los 100 ms.

Figura 3.11 Sistema: dos generadores alimentando una carga

a) Diagrama unifilar



b) Implantación en ATPDraw

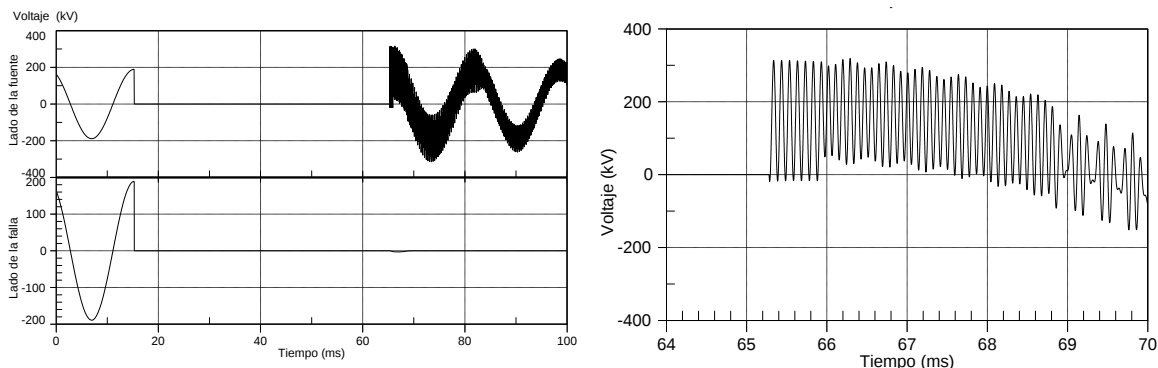


3.5.3.1 Fallas en terminales (dos generadores alimentando una carga)

A continuación se presentan las figuras obtenidas para la fallas en terminales trifásicas y monofásica, además una tabla con los valores de TRV obtenidos.

Figura 3.12 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema: dos generadores alimentando una carga)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

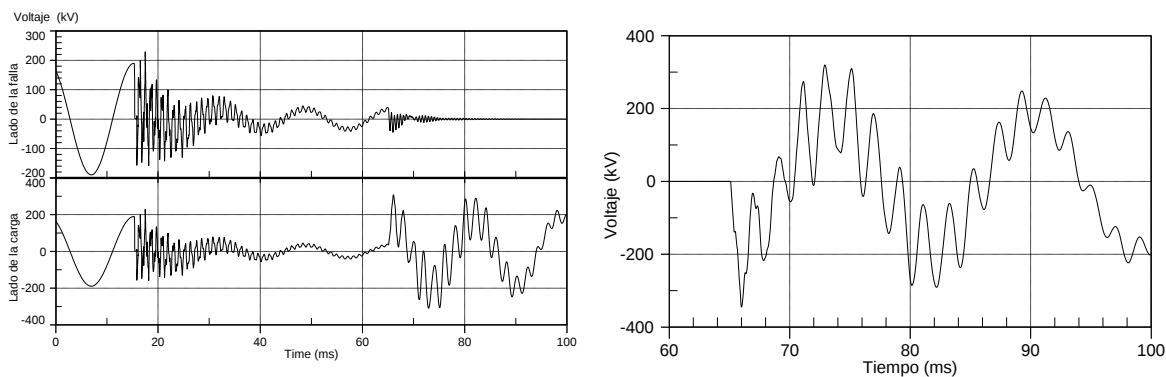
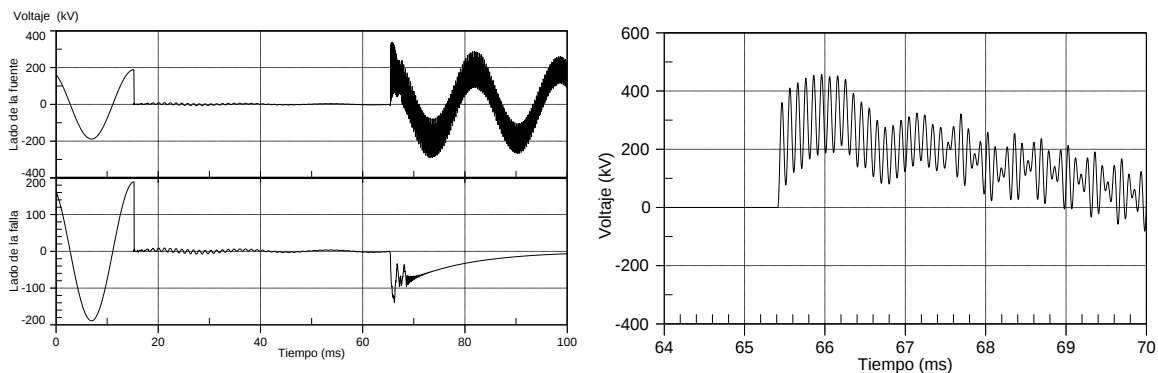


Figura 3.13 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema: dos generadores alimentando una carga)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

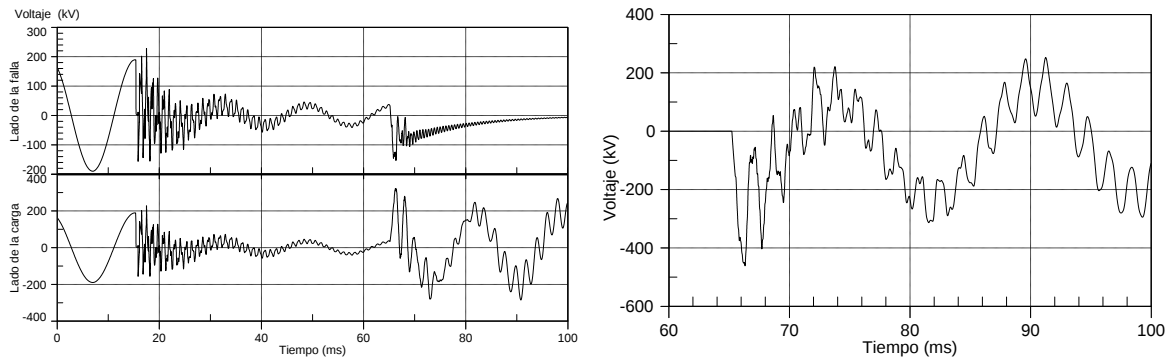
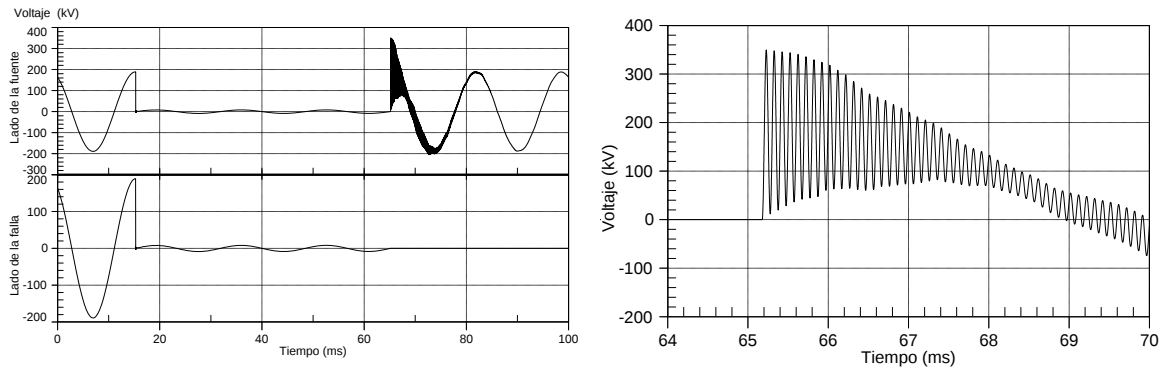


Figura 3.14 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales monofásica (sistema: dos generadores alimentando una carga)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

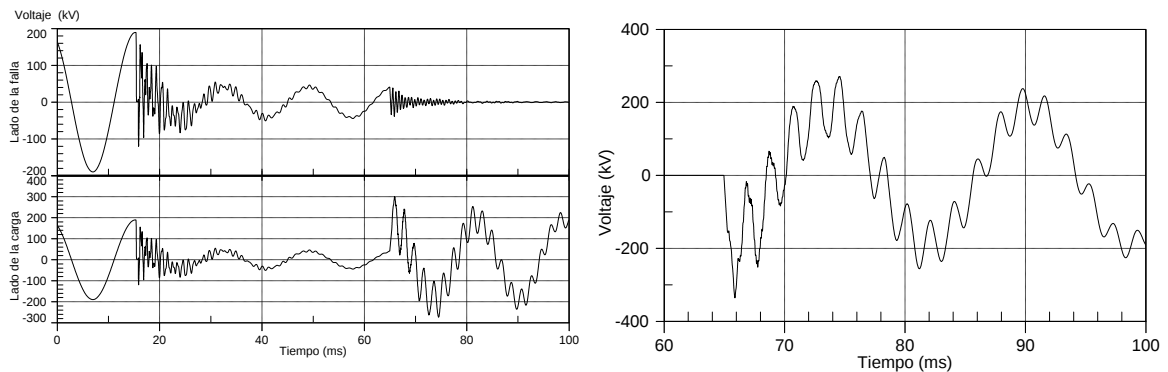


Tabla 3.7 Valores de TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema: dos generadores alimentando una carga)

Figura	Falla en terminales	Parte a) de la figura		Parte b) de la figura	
		TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/ μ s)
3.12	trifásica aterrizada	318,9	5,48	345,1	0,39
3.13	trifásica no aterrizada	457,2	7,04	469,4	0,40
3.14	monofásica	349,8	5,79	335,4	0,37

En las falla en terminales monofásica (Figura 3.14) y trifásica aterrizada (Figura 3.12) se observa un comportamiento muy similar entre las tensiones del interruptor 1 y las analizadas en el mismo interruptor en la sección 3.5.2.1 (Figura 3.7 a y 3.9 a), debido a que la tensión transitoria generada en el interruptor tiene el aporte únicamente del generador 2 ya que la falla es aterrizada lo que hace que el sistema quede dividido en dos partes independientes y el generador 3 que ha sido agregado no tenga efecto alguno en la onda resultante.

Por el contrario, en la falla en terminales trifásica sin conexión a tierra el efecto del generador 3 es notorio y se puede observar en la tensión del interruptor 1 en el lado de la falla (Figura 3.13 a) donde se presenta un transitorio que disminuye exponencialmente hasta el valor de cero lo que le da una forma diferente a la TRV en comparación con la obtenida en la Figura 3.8 cuando solo se encontraban un generador en el lado de la falla, esto sucede por ser una falla sin aterrizar donde todos los elementos del sistema interactúan para generar la onda de tensión transitoria resultante.

El interruptor 2 está alejado de la falla por la línea 5, así cuando la falla se presente la tensión transitoria se comporta de una manera semejante a una falla en línea corta.

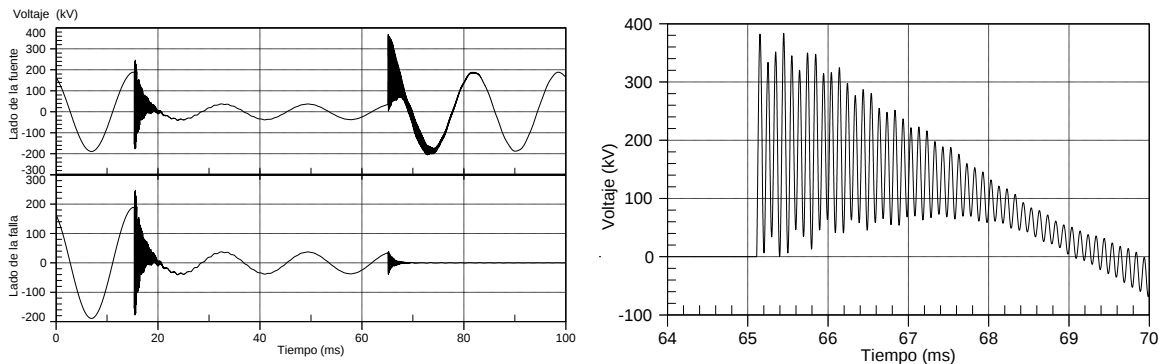
En las fallas en terminales aterrizadas cuando el interruptor 2 abre (Figuras 3.11 b, 3.12 b y 3.13 b) la tensión del lado de la falla disminuye con una forma de onda diente de sierra hasta establecerse en el valor de cero, ahí se observa un comportamiento similar al de una falla kilométrica. Por otra parte, en el lado de la carga del interruptor la tensión intenta restablecerse para suplir la demanda pero su forma es distorsionada debido a la falla y al efecto de las ondas viajando a la carga través de la línea hasta la barra 8.

3.5.3.2 Falla en línea corta (dos generadores alimentando una carga)

A continuación se presentan las formas de onda obtenidas para la falla en línea corta y los valores de TRV obtenidos.

Figura 3.15 Comportamiento de la TRV en una falla e línea corta (sistema: dos generadores alimentando una carga)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

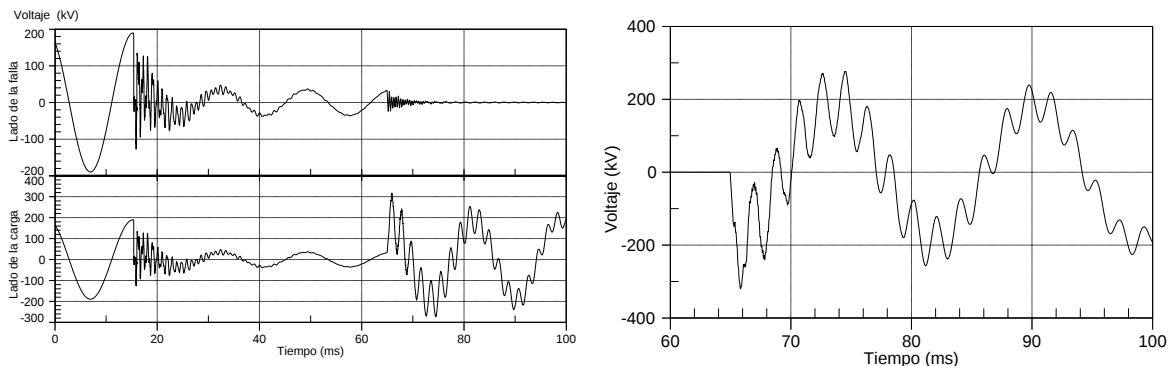


Tabla 3.8 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema: dos generadores alimentando una carga)

Falla en línea corta	Parte a) de la figura		Parte b) de la figura	
	TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/ μ s)
Figura 3.15	383,9	9,57	307,8	0,3

En la Figura 3.15 a) se observa un comportamiento similar entre las tensiones en el interruptor 1 y las obtenidas en la sección 3.5.2.2 para la falla en línea corta (ver Figura 3.10).

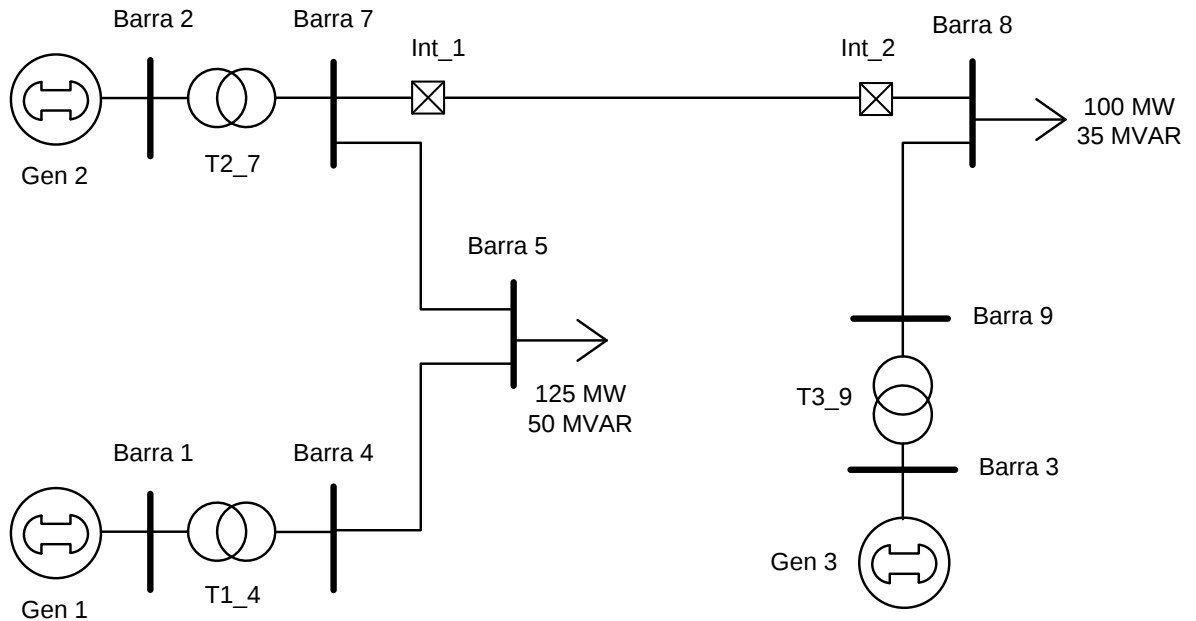
Por ser una falla en línea el comportamiento de las ondas en el interruptor 2 es similar al descrito para las fallas en línea corta, por lo tanto el lado de la falla del interruptor aporta a la TRV una forma de onda triangular Figura 3.15 b). La distancia del interruptor 2 en las fallas en terminales aterrizadas y la falla en línea corta difiere de tan solo 10 km lo que hace que las formas de onda de tensión transitoria son similares, la variación más grande se observa en la magnitud de la tensión ya que en este caso la falla se está acercando al interruptor 2 por lo tanto la magnitud es menor.

3.5.4 Tres generadores alimentando dos cargas

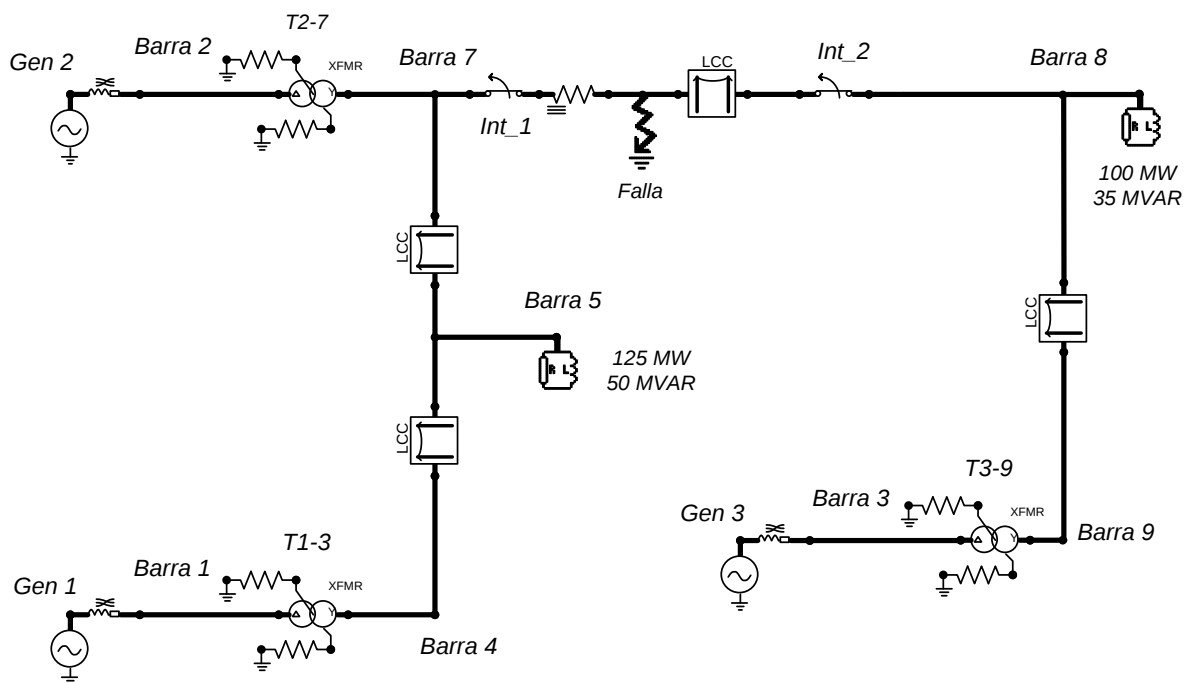
Se tiene un nuevo sistema que está compuesto por 3 generadores, 3 transformadores, 4 líneas, 2 cargas y 2 interruptores (Figura 3.16) con el fin de permitir que las cargas queden alimentadas después del despeje de las fallas.

Figura 3.16 Sistema: tres fuentes alimentando dos cargas

a) Diagrama unifilar



b) Implementación en ATPDraw



Las fallas se realizan como se describió en la sección 3.4.2 y el tiempo de apertura para los dos interruptores es el mismo. Los resultados del comportamiento de la TRV se muestran en las Figura 3.17, 3.18 y 3.19, cada una de ellas está conformada por dos figuras:

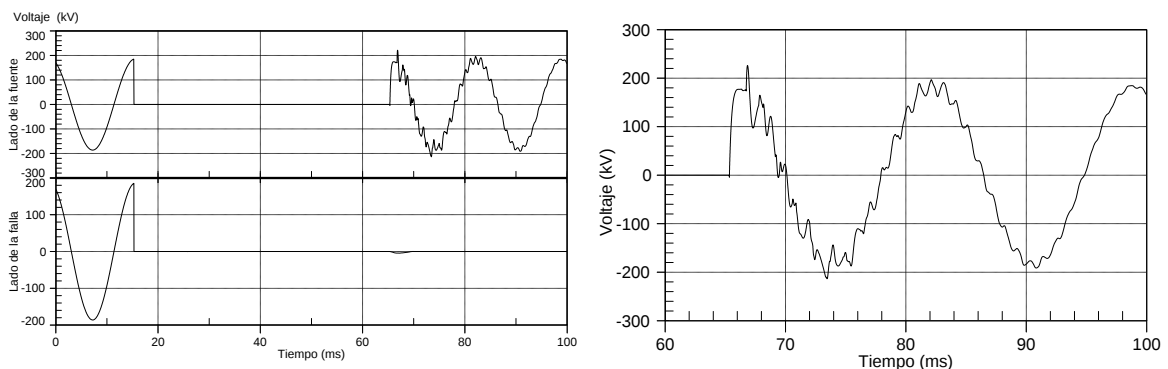
- En la figura a) se encuentra la tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1, en la figura ubicada del lado izquierdo se observa el efecto de la tensión del lado de la fuente y del lado de la falla, en la figura ubicada del lado derecho la TRV entre los 60 ms y los 100 ms.
- En la figura b) se encuentra la tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2, en la figura del lado izquierdo se muestra el efecto de la tensión del lado de la falla y del lado de la carga y, en la figura del lado derecho la TRV entre los 60 ms y los 100 ms.

3.5.4.1 Falla en terminales (tres generadores alimentando dos cargas)

A continuación se presentan las figuras para la fallas en terminales trifásicas y monofásica, además se presenta una tabla con los valores de TRV obtenidos:

Figura 3.17 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema: tres generadores alimentando dos cargas)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

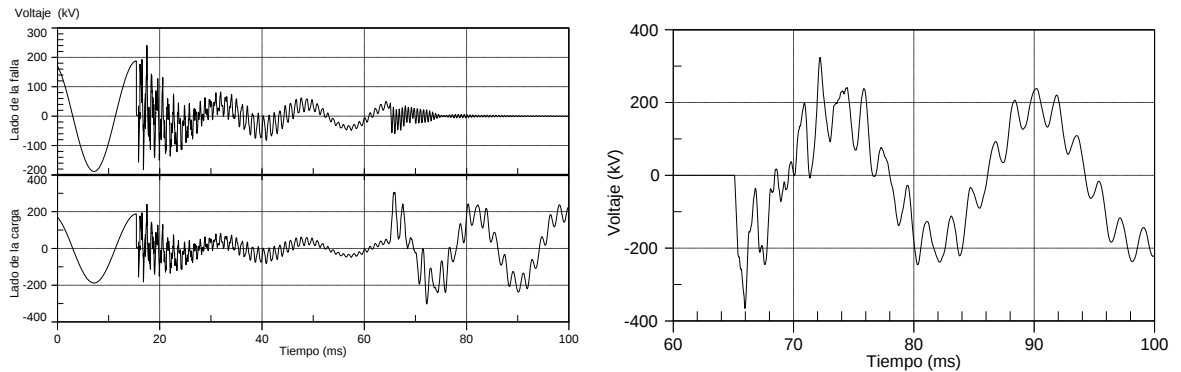
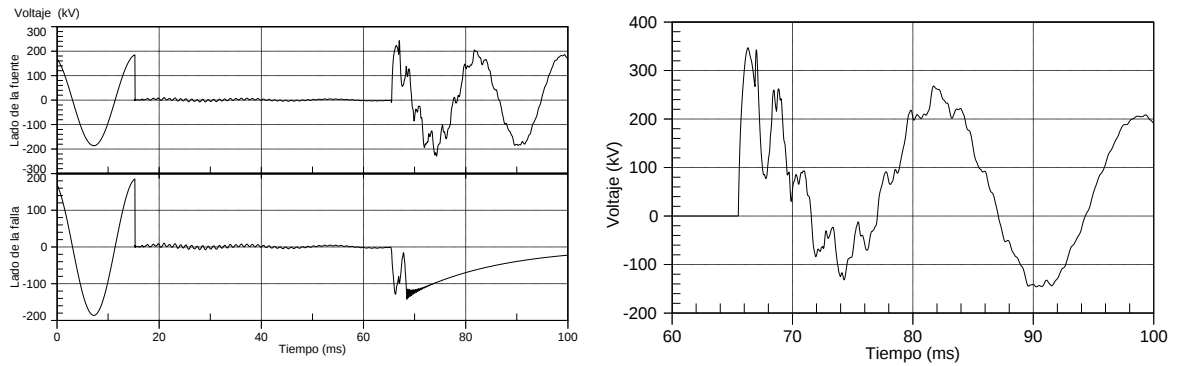


Figura 3.18 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema: tres generadores alimentando dos cargas)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

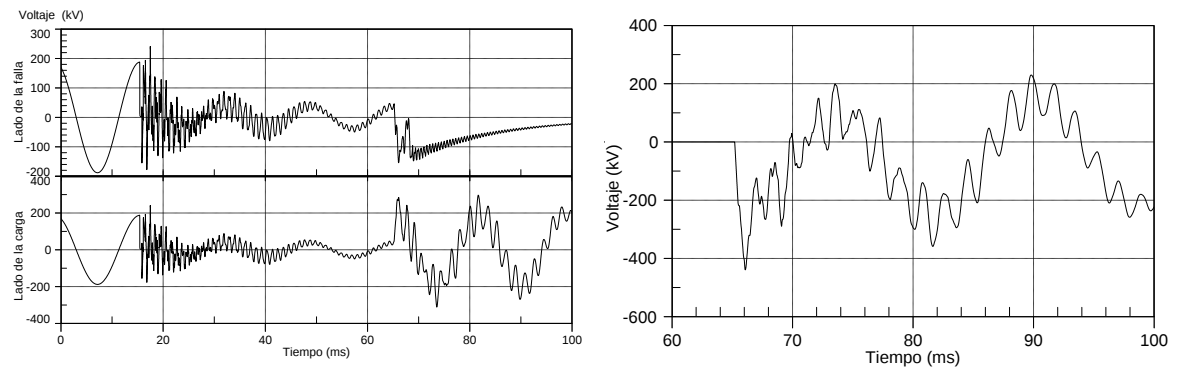
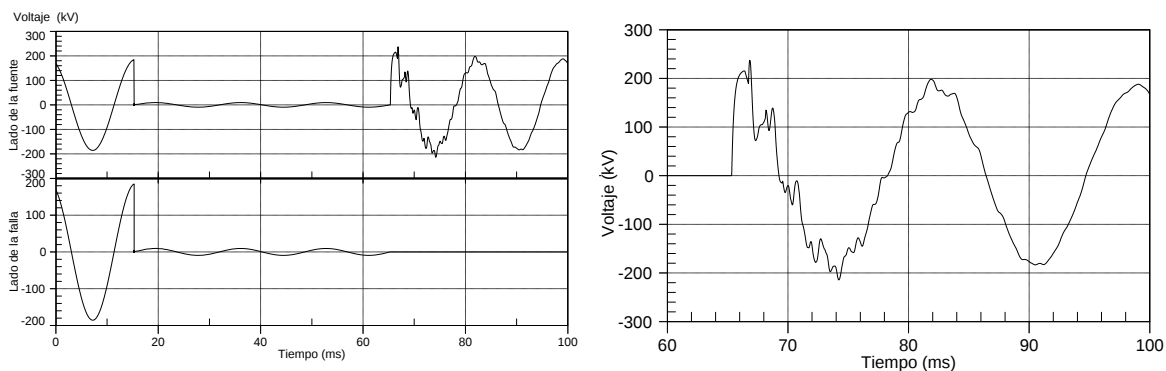


Figura 3.19 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales monofásica (sistema: tres generadores alimentando dos cargas)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

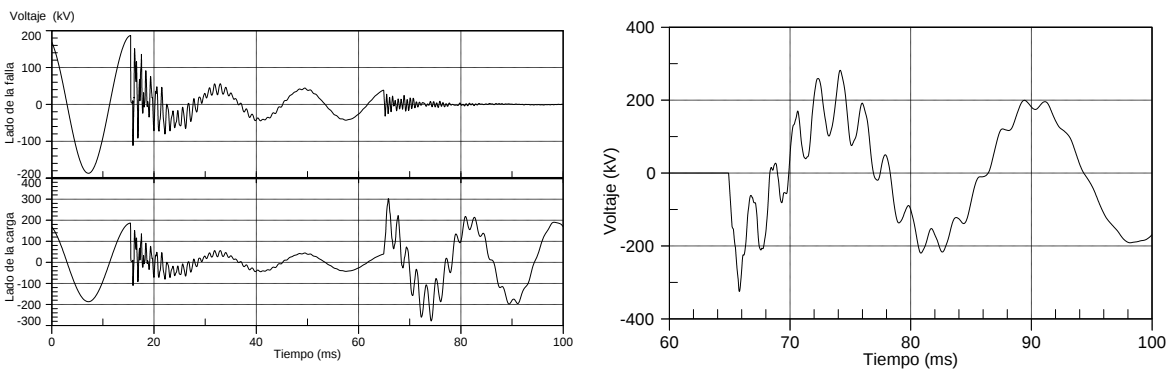


Tabla 3.9 Valores de TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema: tres generadores alimentando dos cargas)

Figura	Falla en terminales	Parte a) de la figura		Parte b) de la figura	
		TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/ μ s)
3.17	trifásica aterrizada	226,1	0,21	365,9	0,43
3.18	trifásica no aterrizada	346,9	0,43	439,2	0,49
3.19	monofásica	237,1	0,20	325,2	0,34

Como se explicó anteriormente una falla aterrizada separa en dos partes independientes el sistema. Si comparamos el sistema de la sección 3.5.3 y el de la sección actual se puede observar que en el sistema actual del lado fuente del interruptor 1 se han agregado elementos que tienen un aporte a la tensión transitoria de recuperación generada en el interruptor 1 (Figuras 3.17 a y 3.19 a), sin embargo el interruptor 2 no tiene nuevos aportes ya que el sistema de éste lado sigue siendo idéntico al de la sección 3.5.3 por lo tanto las formas de ondas resultantes también son similares (Figura 3.17 b y 3.19 b).

La tensión transitoria resultante en el interruptor 1 tiene una forma exponencial, la cual se genera debido a la falla y a las ondas viajando a través de las líneas, su comportamiento se asemeja al mostrado en la Tabla 1.1 caso 4 donde hay múltiples líneas y transformadores alimentando la barra fallada.

En la falla en terminales sin aterrizar (Figura 3.18) todos los elementos del sistema interactúan entre si y generarán una onda de tensión transitoria de forma exponencial.

3.5.4.2 Falla en línea corta (tres generadores alimentando dos cargas)

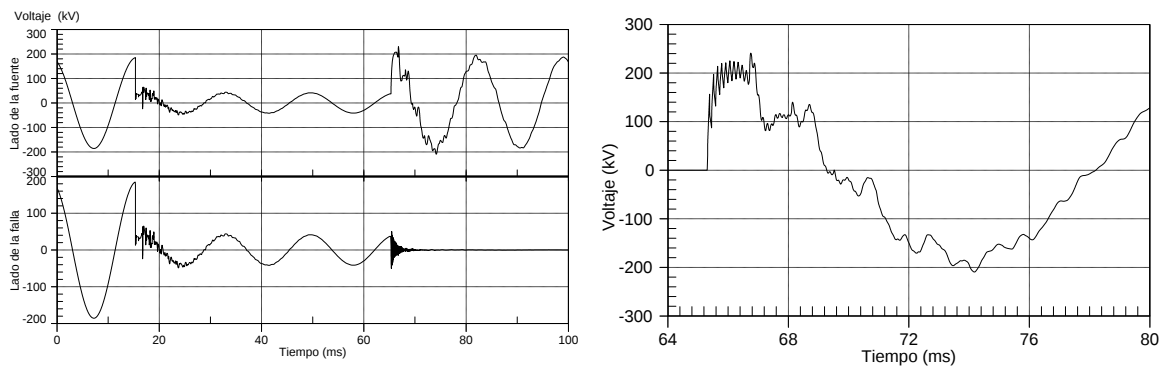
Para poder visualizar de manera clara el efecto de la tensión transitoria en el interruptor 1 y 2, la Figura 3.20 está compuesta por dos figuras:

- En la figura a) se presenta la tensión transitoria en el interruptor 1, en la figura de la parte izquierda se observa el aporte del lado de la fuente y de la falla, en la figura del lado derecho la TRV entre los 64 ms y los 80 ms.
- En la figura b) se presenta la tensión transitoria en el interruptor 2, en la figura de la parte izquierda se presenta el aporte del lado de la fuente y de la falla, en la figura del lado derecho la TRV entre los 60 y los 100 ms.

A continuación se presentan las ondas de tensión obtenidas para la falla en línea corta y una tabla donde se presentan los valores de TRV obtenidos.

Figura 3.20 Comportamiento de la TRV en una falla en línea corta (sistema: tres generadores alimentando dos cargas)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

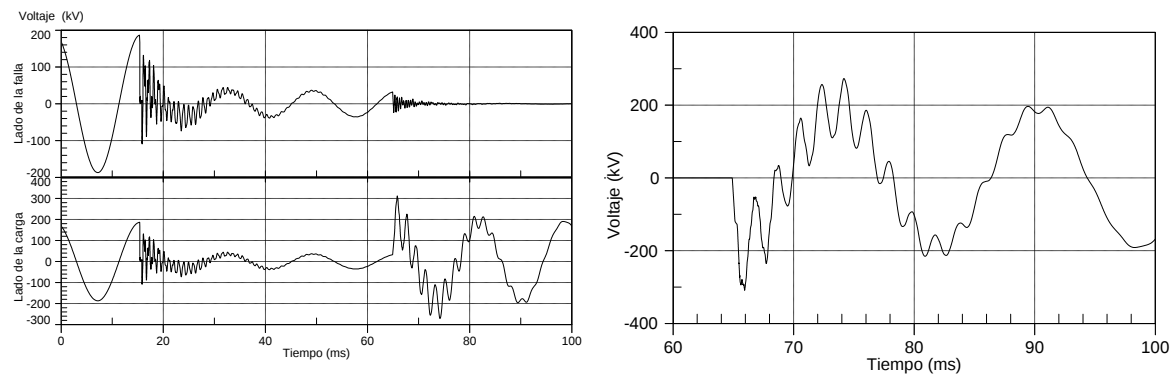


Tabla 3.10 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema: tres generadores alimentando dos cargas)

Falla en línea corta	Parte a) de la figura		Parte b) de la figura	
	TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/ μ s)
Figura 3.20	241,2	2,36	308,9	0,29

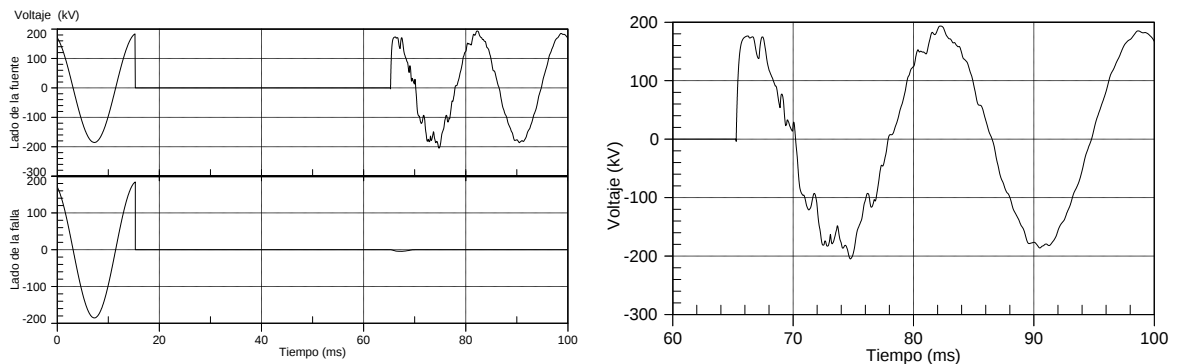
Se obtiene un sistema compuesto por 3 generados, 9 barras, 3 cargas y 2 interruptores, estos a su vez forman un anillo. Las fallas se realizan tal como se han explicado en la sección 3.5.1. El comportamiento de la tensión transitoria de recuperación en los interruptores se puede ver en las Figuras 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24, cada una de ellas conformadas por dos figuras a y b las cuales proporciona información tal como se describe en la sección 3.5.4.

3.5.5.1 Falla en terminales (sistema en anillo)

A continuación se presentan las formas de onda obtenidas para la fallas en terminales trifásicas y monofásica, además una tabla con los valores de TRV:

Figura 3.22 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica aterrizada (sistema en anillo)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

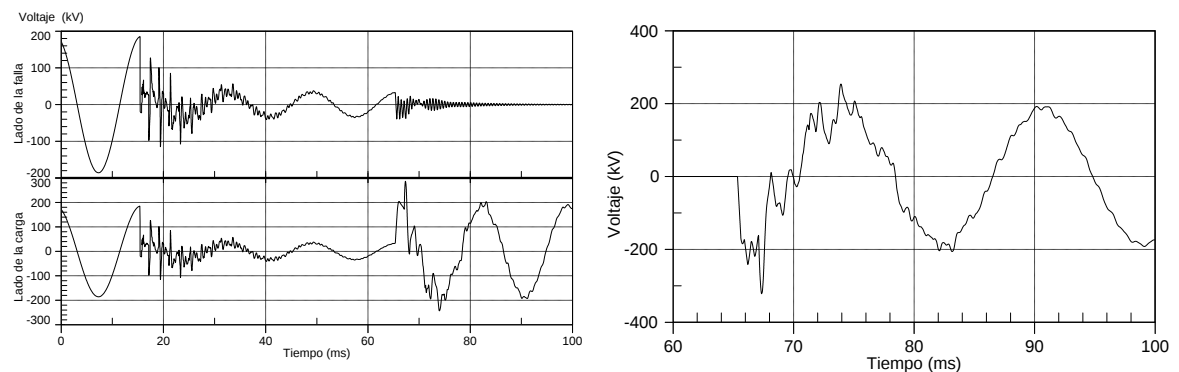
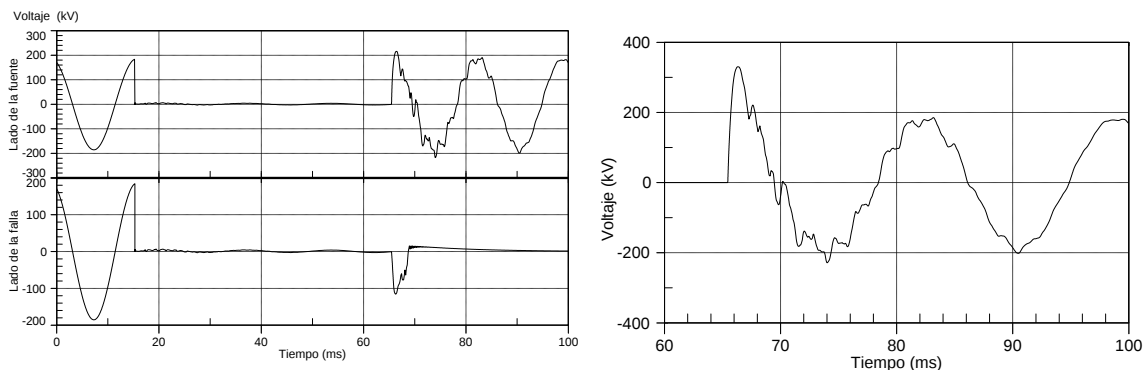


Figura 3.23 Comportamiento de la TRV en una falla en terminales trifásica sin aterrizar (sistema en anillo)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

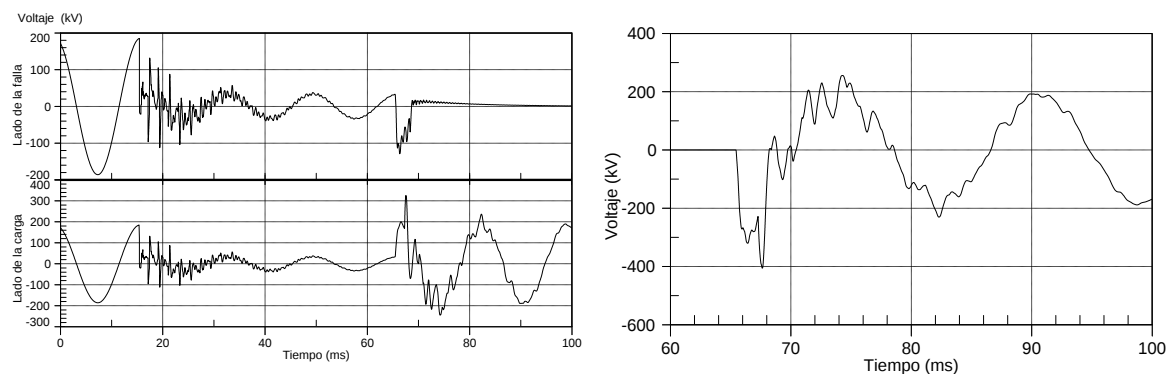
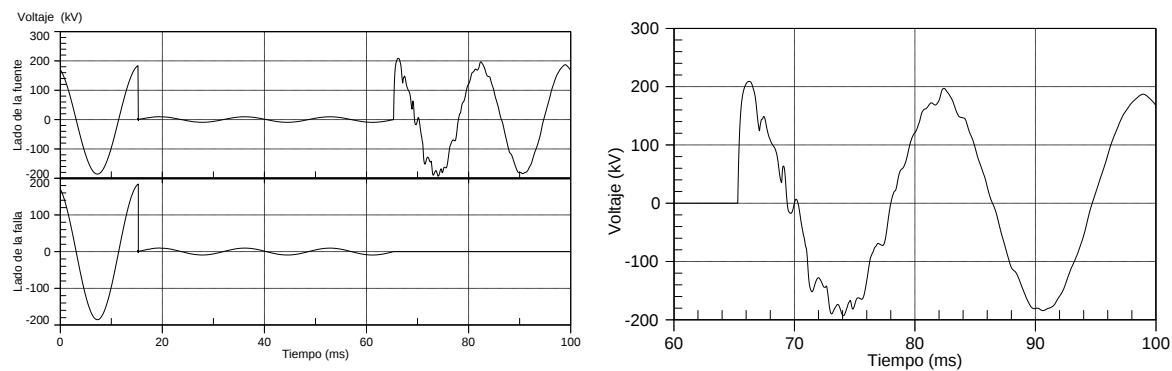


Figura 3.24 Comportamiento de la TRV en una en una falla en terminales monofásica (sistema en anillo)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

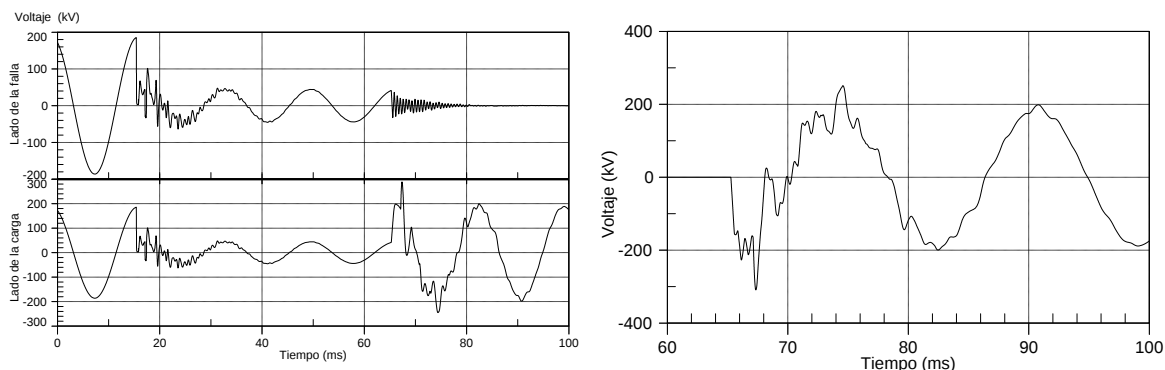


Tabla 3.11 Valores TRV obtenidas en las fallas en terminales (sistema en anillo)

Figura	Falla en terminales	Parte a) de la figura		Parte b) de la figura	
		TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/ μ s)
3.22	trifásica aterrizada	204,8	0,19	322,1	0,16
3.23	trifásica no aterrizada	330,1	0,38	406,2	0,18
3.24	monofásica	208,9	0,22	309,3	0,14

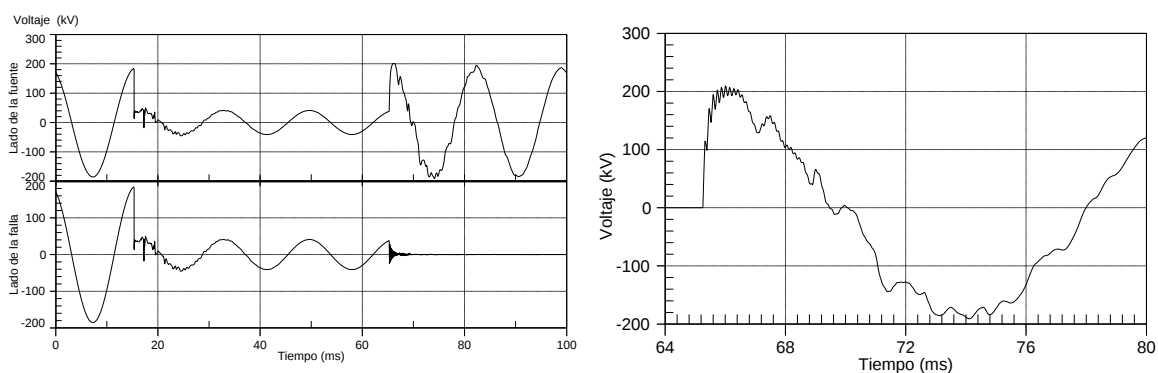
Tanto en el interruptor 1 como en el interruptor 2 se tienen formas de ondas distintas a las obtenidas en secciones anteriores sin embargo se justifican por el mismo principio, cuando se implementa el anillo en el sistema 3 generadores que generan su aporte a la tensión transitoria en los dos interruptores. Cuando se realiza el despeje de las fallas, en el lado de la fuente del interruptor 1 y en lado de la carga del interruptor 2 se presentan tensiones con forma de onda exponencial que en conjunto con la componente aportada del lado de la falla hacen que la tensión transitoria resultante tenga esa forma (Figuras 3.22, 3.23 y 3.24).

3.5.5.2 Falla en línea corta (sistema en anillo)

Para poder observar de manera clara la TRV en el interruptor 1 (Figura 3.25 a) se muestra la onda del lado derecho entre los 64 ms y los 80 ms. A continuación se presentan las formas de onda de tensión obtenidas para la falla en línea corta:

Figura 3.25 Comportamiento de la TRV en una falla en línea corta (sistema en anillo)

a) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 1



b) Tensión transitoria de recuperación en el interruptor 2

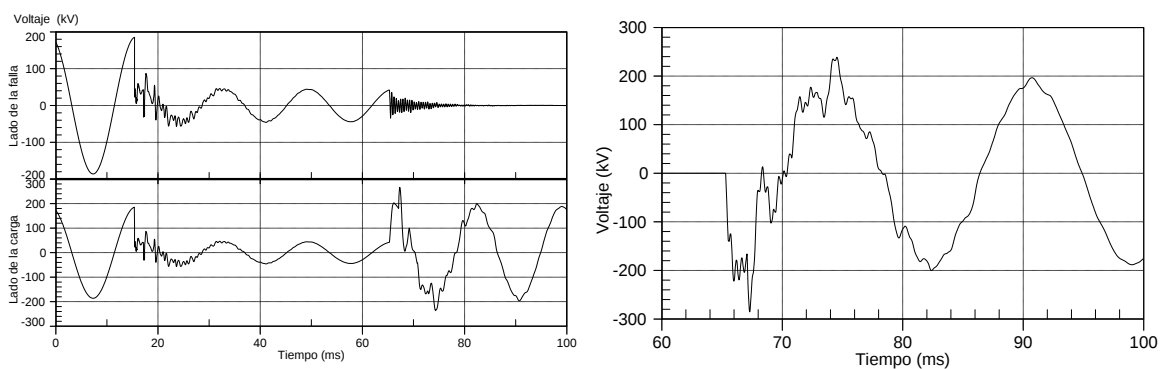


Tabla 3.12 Valores de TRV obtenidas para la falla en línea corta (sistema en anillo)

Falla en línea corta	Parte a) de la figura		Parte b) de la figura	
	TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/ μ s)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/ μ s)
Figura 3.25	209,5	1,7	285,6	0,141

De manera similar a lo presentado en las fallas en terminales, una vez hecha la apertura de los interruptores la tensión del lado de la fuente en el interruptor 1 y la del lado de la carga en el interruptor 2 toman una forma exponencial debido a las reflexiones de las líneas y los aportes de los elementos conectados al sistema, del lado de la falla se obtiene una onda con forma triangular y es posible observar su efecto en la tensión transitoria resultante en los dos interruptores (Figura 3.25)

3.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Los valores pico de tensión transitoria y la tasa de crecimiento aceptados por la norma IEEE Std C37.016TM – 2006 [10] se encuentran en la Tabla 3.13, y los valores obtenidos en los sistemas simulados para cada tipo de falla en la Tabla 3.14.

Tabla 3.13 Valores de TRV admitidas para un sistema de 245 kV por la norma IEEE Std C37.016 - 2006

Falla	Valor de TRV pico (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Aterrizada	364	2
Sin aterrizar	420	2

Tabla 3.14 Valores pico y tasa de crecimiento de la tensión transitoria de recuperación

Sistema simulado	Tipo de falla (Figura)**	TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/μs)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/μs)
Un generador alimentando una carga	En terminales trifásica aterrizada (3.7)	362,5	5,45	*	*
	En terminales trifásica no aterrizada (3.8)	468,6	6,57	*	*
	En terminales monofásica (3.9)	348,7	6,44	*	*
	En línea corta (3.10)	381,7	9,51	*	*
Dos generadores alimentando una carga	En terminales trifásica aterrizada (3.12)	318,9	5,48	345,1	0,39
	En terminales trifásica no aterrizada (3.13)	457,2	7,04	469,4	0,40
	En terminales monofásica (3.14)	349,8	5,79	335,4	0,37
	En línea corta (3.15)	383,9	9,57	307,8	0,30
Tres generadores alimentando dos cargas	En terminales trifásica aterrizada (3.17)	226,1	0,21	365,9	0,43
	En terminales trifásica no aterrizada (3.18)	346,9	0,43	439,2	0,49
	En terminales monofásica (3.19)	237,1	0,20	325,2	0,34
	En línea corta (3.20)	241,2	2,36	308,9	0,29
Sistema en anillo	En terminales trifásica aterrizada (3.22)	204,8	0,19	322,1	0,16
	En terminales trifásica no aterrizada (3.23)	330,1	0,38	406,2	0,18
	En terminales monofásica (3.24)	208,9	0,22	309,3	0,144
	En línea corta (3.25)	209,5	1,70	285,6	0,141

* No se utilizó el interruptor en la simulación ** Se escribe el numero de la figura

En los valores de la Tabla 3.14 se observa:

- En la tensión transitoria de recuperación alcanza su pico más alto cuando el sistema es sometido a fallas trifásicas en terminales como se mencionó en la sección 1.4.1.3, en este caso las mayores magnitudes se obtienen para las fallas sin aterrizar.
- Si se compara la TRV obtenida en las fallas en línea corta con las obtenidas en las fallas en terminales monofásicas se observa que en el primer caso el valor de la magnitud es mayor, tal como se mencionó en la sección 1.4.1.2: entre más lejos se encuentre la falla del interruptor mayor es la magnitud de tensión transitoria de recuperación que puede alcanzar. Lo contrario sucede en el interruptor 2 donde la falla en línea corta se encuentra más cerca al interruptor que la falla en terminales.
- Los valores de tensión de recuperación tienen una tendencia a disminuir a medida que se van agregando más elementos al sistema ya que cada uno de ellos tiene un valor de resistencia que aumenta la resistencia general del sistema y con ella el amortiguamiento del mismo.
- Los valores de inductancia y capacitancia varían lo que hace que la frecuencia de oscilación cambie.

Al comparar los valores obtenidos en la Tabla 3.14 con los valores dados por la norma (ver Tabla 3.13) se observa que varios casos de simulación no cumplen con ellos, como se puede ver en la Tabla 3.15, algunos valores obtenidos en la simulación los sobrepasan en magnitud, tasa de crecimiento o ambos valores por lo cual se hace necesario implementar métodos para reducirlos y obtener valores que cumplan con los de la norma.

Tabla 3.15 Valores pico y tasa de crecimiento de la tensión transitoria de recuperación

Sistema simulado	Tipo de falla (Figura)**	TRV pico Interruptor 1 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 1 (kV/μs)	TRV pico Interruptor 2 (kV)	Tasa de crecimiento Interruptor 2 (kV/μs)
Un generador alimentando una carga	En terminales trifásica aterrizada (3.7)	✓	X	*	*
	En terminales trifásica no aterrizada (3.8)	X	X	*	*
	En terminales monofásica (3.9)	✓	X	*	*
	En línea corta (3.10)	X	X	*	*
Dos generadores alimentando una carga	En terminales trifásica aterrizada (3.12)	✓	X	✓	✓
	En terminales trifásica no aterrizada (3.13)	X	X	X	✓
	En terminales monofásica (3.14)	✓	X	✓	✓
	En línea corta (3.15)	X	X	✓	✓
Tres generadores alimentando dos cargas	En terminales trifásica aterrizada (3.17)	✓	✓	X	✓
	En terminales trifásica no aterrizada (3.18)	✓	✓	X	✓
	En terminales monofásica (3.19)	✓	✓	✓	✓
	En línea corta (3.20)	✓	X	✓	✓
Sistema en anillo	En terminales trifásica aterrizada (3.22)	✓	✓	✓	✓
	En terminales trifásica no aterrizada (3.23)	✓	✓	✓	✓
	En terminales monofásica (3.24)	✓	✓	✓	✓
	En línea corta (3.25)	✓	✓	✓	✓

* No se utilizó el interruptor en la simulación

** Se escribe el numero de la figura

✓ Cumple con el valor normalizado

X No cumple con el valor normalizado

CAPÍTULO 4

4. MÉTODOS DE MITIGACIÓN PARA LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RECUPERACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la tensión transitoria de recuperación que se presenta en los interruptores cuando se produce su apertura, dependiendo de diversos factores, pueden alcanzar valores de hasta cuatro veces la tensión nominal del sistema que puede causar grandes daños.

En este capítulo se realiza la explicación de distintos métodos utilizados con el fin de mitigar (reducir) la tensión transitoria de recuperación tanto en magnitud como en tasa de crecimiento, posteriormente se realiza la implementación de estos en un caso del sistema de potencia utilizado en el capítulo 3 con lo que se hace la verificación de cada uno de ellos. Para finalizar se realiza una tabla comparativa de los distintos métodos implementados.

4.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA REDUCIR LA TRV

Se ha estudiado anteriormente que como consecuencia de la magnitud de la tensión transitoria de recuperación y tasa de crecimiento se pueden presentar reencendidos en el sistema de potencia, explicados más en detalle en el Capítulo 1, lo que significa que el interruptor no está en capacidad para soportar las tensiones de recuperación presentes en el sistema donde ha sido instalado.

El buen funcionamiento del sistema implica una buena elección y adecuación de los componentes que lo conforman, por lo tanto cuando la TRV supera los valores

que están normalizados [10], se debe de buscar la manera para reducir el pico de tensión, su tasa de crecimiento o ambos dependiendo del caso.

De acuerdo a estudios realizados se demuestra que la implementación de elementos en el sistema [26-31] permite obtener valores de tensión transitoria tolerados por el interruptor, estos elementos son:

- Resistencias
- Condensadores
- Descargadores de sobretensiones

Por otro lado la norma IEEE Std C37.011TM - 2011 [5] recomienda que cuando la TRV inherente excede los estándares, se tengan en cuenta algunas de las siguientes alternativas:

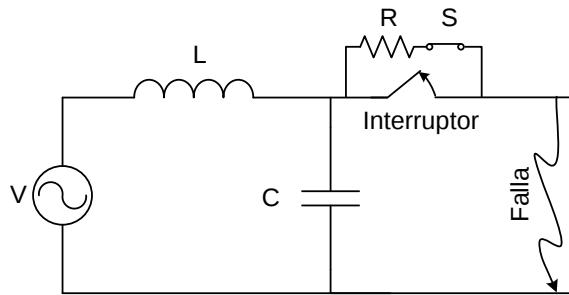
- a) Se debe utilizar un interruptor con una tensión nominal superior, o un interruptor modificado. En casos especiales en que el terminal de falla de la TRV con una capacidad de 60 % o 100 % de la capacidad del cortocircuito es superior a la nominal, se puede utilizar un interruptor de circuito con una mayor capacidad de interrupción.
- b) Debe añadirse condensadores al terminal o terminales del interruptor para reducir la tasa de crecimiento de la TRV.
- c) En cualquier caso el fabricante debe ser consultado acerca de la aplicación.

Como se puede observar la norma IEEE Std C37.011TM – 2011 no menciona las resistencias ni descargadores de sobretensiones como elementos que ayudan a mejorar los valores de la TRV, esto radica principalmente en que las resistencias ya se han incluido en algunos diseños de interruptores, los descargadores de sobretensiones son elementos poco estudiados para la mitigación de tensión transitoria de recuperación [26].

4.2.1 Uso de resistencias

La resistencia de switcheo o también llamadas resistencias de preinserción se ubica entre los terminales del interruptor (Figura 4.1 [14]), estas han sido utilizadas en los interruptores de sistemas de altas tensiones.

Figura 4.1 Mitigación mediante el uso de resistencias



Lo que se pretende agregando la resistencia es que la onda de tensión presente un amortiguamiento, por lo tanto para determinar el valor de la resistencia a utilizar se debe de tener en cuenta los componentes del sistema adyacentes al interruptor. Además del efecto amortiguador, la resistencia tiene el propósito de reducir la tasa de crecimiento y la magnitud de la TRV [14].

En la Figura 4.1 se observa la forma como se ubica la resistencia de preinserción R en serie con un switch S que en condiciones normales de operación del sistema permanece abierto. En el momento en el que ocurre una falla o simplemente cuando se requiere realizar la apertura del interruptor, el switch S se cierra dejando la resistencia R en paralelo con el interruptor y estos a su vez aterrizados en el lado de la falla.

La relación en que la tasa de crecimiento es reducida está dada por:

$$\frac{R}{(Z + R)} \quad (4.54)$$

donde :

Z es la suma de la impedancia que influye en el sistema cuando se realiza la falla.

R es la resistencia en paralelo con el interruptor.

Por lo tanto cuando el valor de resistencia es igual al de la impedancia, la tasa de crecimiento disminuye un 50% de su valor inicial [27].

En un principio las resistencias fueron un método muy adecuado para resolver el problema de las altas tensiones de recuperación debido a que los sistemas de potencia eran más pequeños y sencillos a los que poseemos hoy en día.

Actualmente la conmutación controlada ha logrado reducir los transitorios incluso mejor que utilizando resistencias, además los interruptores modernos poseen mejores propiedades de conmutación por lo cual no necesitan la utilización de éstas resistencias [28], sin embargo cuando ocurren fallas en el sistema se lo que se pretende es despejarlas en el menor tiempo posible, lo que hace en este caso poco práctica la conmutación controlada.

4.2.2 Uso de condensadores

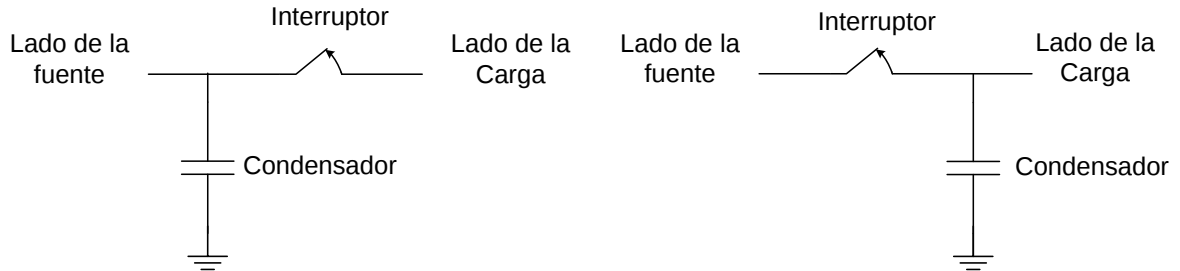
Un elemento utilizado principalmente con el fin de reducir la tasa de crecimiento de la tensión transitoria de recuperación es el condensador, el efecto que tiene su capacitancia es generar un retardo en la tensión de recuperación respecto a la corriente cero, lo que trae consigo la reducción de la tasa de crecimiento [29].

Es posible ubicar los condensadores de diferentes formas como se observa en la Figura 4.2:

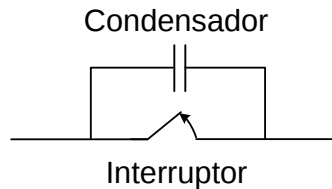
- Del lado de la carga o de la fuente del interruptor y aterrizado.
- A través de los polos del interruptor (condensadores en paralelo) [7].

Figura 4.2 Mitigación mediante el uso de condensadores

a) Condensador ubicado del lado de la fuente y del lado de la carga



b) Condensador en paralelo al interruptor



4.2.2.1 Ubicación de condensadores del lado de la carga o del lado de la fuente

Ubicar condensadores del lado de la carga cuando ocurren fallas en terminales genera resultados insignificantes respecto a la variación de la tasa de crecimiento de la TRV debido a que estas se presentan muy cerca a las barras, sin embargo la ubicación de los condensadores del lado de la fuente tienen un efecto más representativo [29].

Por el contrario para fallas en líneas cortas la influencia de ubicar los condensadores del lado de la fuente es poca, sin embargo son muy sensibles a los valores de capacitancias del lado de la carga, sin embargo no es fácil de definir [[29], [30]].

La opción de ubicar condensadores del lado de la carga o de la fuente dependiendo del caso, tiene la ventaja de reducir la parte rápida de la TRV, reduciendo la frecuencia global y por lo tanto la tasa de crecimiento, además aumenta el tiempo de retardo de la onda de tensión, la desventaja es que en algunas ocasiones el valor de pico de la TRV puede incrementarse [31].

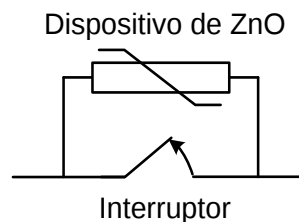
4.2.2.2 Ubicación de condensadores a través de los polos del interruptor

Ubicar el condensador a través de los polos del interruptor tiene la ventaja de aumentar el tiempo de retraso de la onda de tensión además es posible que tenga algún impacto en la magnitud de TRV, la desventaja es que su implementación es complicada ya que en ocasiones pueden ser necesarios valores muy altos de capacitancia para proporcionar el control efectivo de la TRV, por otro lado su uso genera la posibilidad de resonancia en serie con cargas inductivas [31].

4.2.2.3 Uso de descargadores de sobretensión

Entre los nuevos desarrollos tecnológicos se tiene a los descargadores de sobretensión de óxido de zinc (ZnO), por lo cual las investigaciones basadas en su aplicación a la mitigación de la TRV son pocas. Sin embargo, estudios recientes [26] demuestran que pueden reducir efectivamente la magnitud de la tensión transitoria de recuperación en un sistema, para ello su ubicación se hace a través de los polos del interruptor tal como se muestra en la Figura 4.3.

Figura 4.3 Uso de dispositivos de ZnO para reducir la TRV



Las características principales de los descargadores de sobretensión son las siguientes:

- Estos elementos tienen una relación altamente no lineal entre tensión y corriente.
- Poseen una resistencia muy alta en condiciones nominales de operación e inhiben la circulación de corriente, casi se comporta como un circuito abierto.
- En situaciones de sobretensión, su resistencia es baja, permitiendo la circulación de corriente.

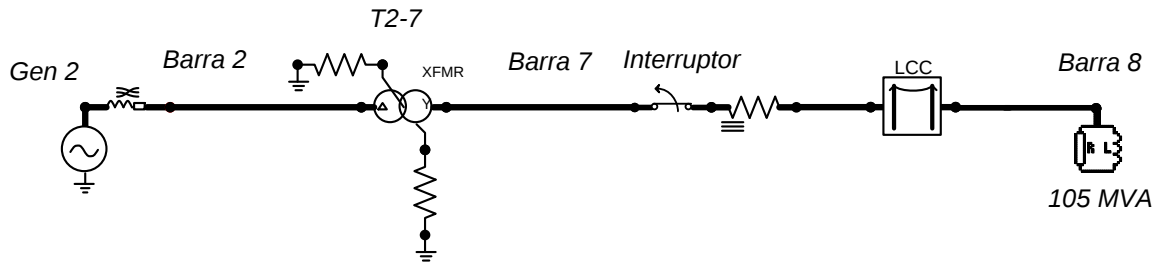
Su estructura es relativamente simple, constan de una o varias columnas de Z_nO envuelta por un material cerámico o polimérico y algunos otros componentes [26], los descargadores de sobretensión comúnmente llamados *pararrayos* y su definición según la IEEE Std C 62.11-2012 [32] es:

“un dispositivo de protección que limita sobretensiones elevadas en equipos debidas a descargas atmosféricas o sobretensiones por cortocircuito y es capaz de repetir esta función tanto como sea necesario”

4.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA MITIGAR LA TRV

La implementación de los métodos descritos en la sección 4.2 se realiza en ATPDraw, para ello se toma un sistema conformado por una fuente (Gen 2), un transformador (T2-7), un interruptor, una línea de transmisión ubicada entre las barras 7 y 8 (línea 5) y una carga conectada a la barra 8 como muestra en la Figura 4.4. El interruptor tiene orden de apertura 53,3 ms después del inicio de la falla, sin embargo actúa una vez la corriente tome al valor de cero.

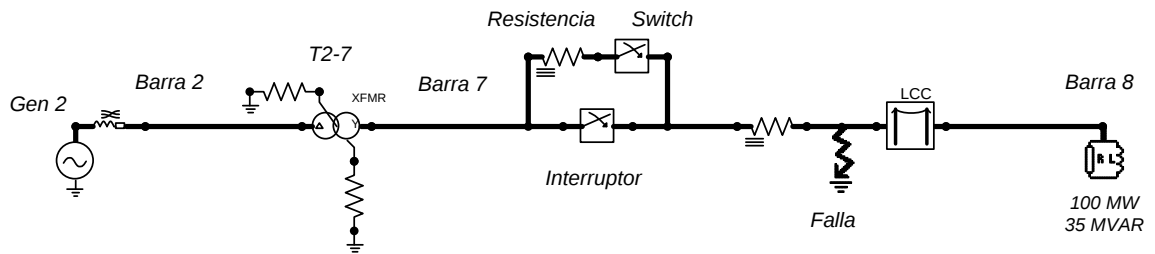
Figura 4.4 Sistema utilizado para la implementación de los métodos de mitigación de la TRV



4.3.1 Uso de resistencias

Al sistema de la Figura 4.4 se agrega una resistencia ubicada entre los polos del interruptor como se explicó en la sección 4.2.1, para verificar su efecto se realiza una falla en terminales aterrizada tal como se muestra en la Figura 4.5.

Figura 4.5 Ubicación de la resistencia de preinserción en el sistema

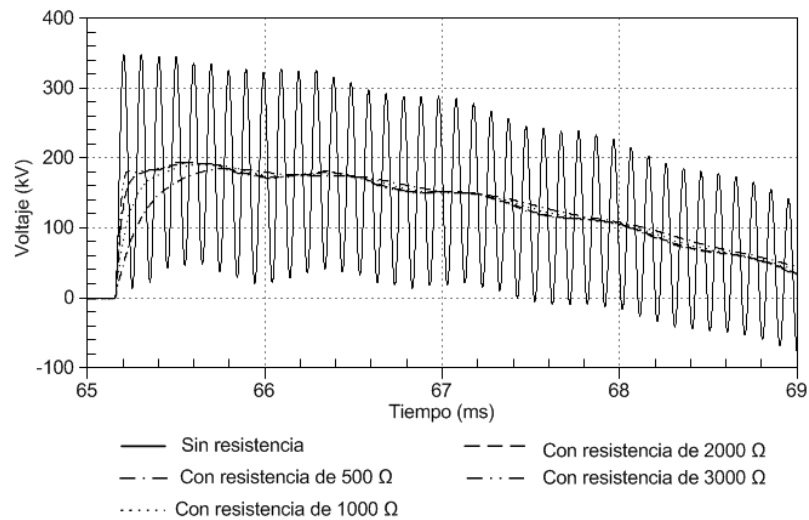


Para determinar el valor de resistencia que disminuya la tasa de crecimiento en un determinado porcentaje (ver ecuación 4.1) es importante conocer el valor de impedancia tanto del lado de la fuente como del lado de la carga. Debido a que en este caso se tiene una falla en terminales la impedancia del lado de la carga es cero, por lo tanto el valor de impedancia que se requiere en la ecuación 4.1 es netamente del lado de la fuente. Para verificar la influencia de la resistencia en el sistema se le dan distintos valores: 500 Ω , 1000 Ω , 2000 Ω y 3000 Ω , de igual manera se simula el sistema sin la adición de la resistencia para tener un punto de referencia. Los resultados obtenidos se encuentran en la Figura 4.6 así:

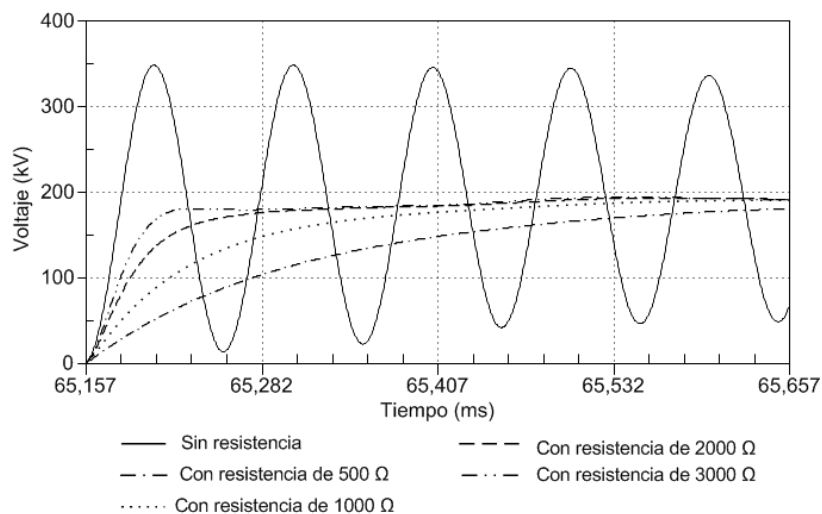
- La Figura 4.6 a) muestra la TRV obtenida en las simulaciones entre los 65 y los 69 ms con el fin de observa el comportamiento de las ondas de tensión.
- La Figura 4.6 b) se presenta una ampliación de la TRV obtenida en las simulaciones realizada entre los 65,157 ms y los 65,657 ms con el fin de observar la variación en la tasa de crecimiento y la magnitud de la TRV.

Figura 4.6 Comportamiento de la TRV con la implementación de resistencia de preinserción.

a) Tensión transitoria de recuperación



b) Ampliación de la tensión transitoria de recuperación



En la Figura 4.6 se observa que a medida que el valor de resistencia disminuye la tensión transitoria de recuperación crece más lentamente lo que hace que la tasa de crecimiento de la TRV sea menor al igual que el pico de tensión obtenido (ver Tabla 4.1), el cual es mucho mayor cuando no se utiliza la resistencia en el interruptor, sin embargo es importante notar que no es posible disminuir la resistencia a valores muy bajos ya que actuaría como un cortocircuito y el interruptor no cumpliría con su función de despejar la falla en el sistema. Además en la Figura 4.6 es muy notorio que la implementación de resistencias reduce considerablemente la forma de onda oscilatoria obtenida originalmente en el sistema.

Tabla 4.1 Valores de TRV con la implementación de resistencias

Valor de resistencia (Ω)	Valor pico de la TRV (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin resistencia	348,7	7,264
3000	193,83	2,378
2000	193,43	0,849
1000	191,46	0,397
500	184,49	0,307

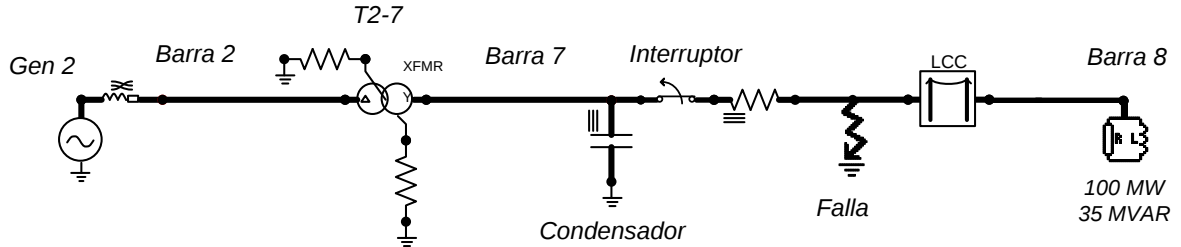
4.3.2 Uso de condensadores

4.3.2.1 Condensador ubicado del lado de la fuente

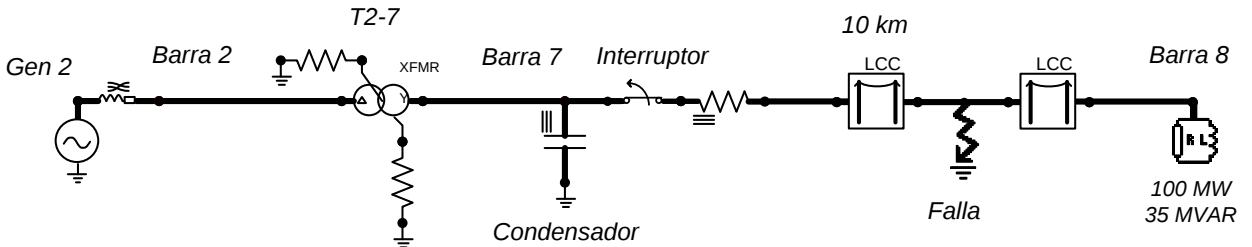
Se ubica el condensador del lado de la fuente del interruptor en el sistema de la Figura 4.4, se realiza una falla en terminales monofásica aterrizada y una falla en línea corta como se puede observar en la Figura 4.7 a) y b) respetivamente.

Figura 4.7 Ubicación del condensador del lado de la fuente del interruptor

a) Falla en terminales



b) Falla en línea corta

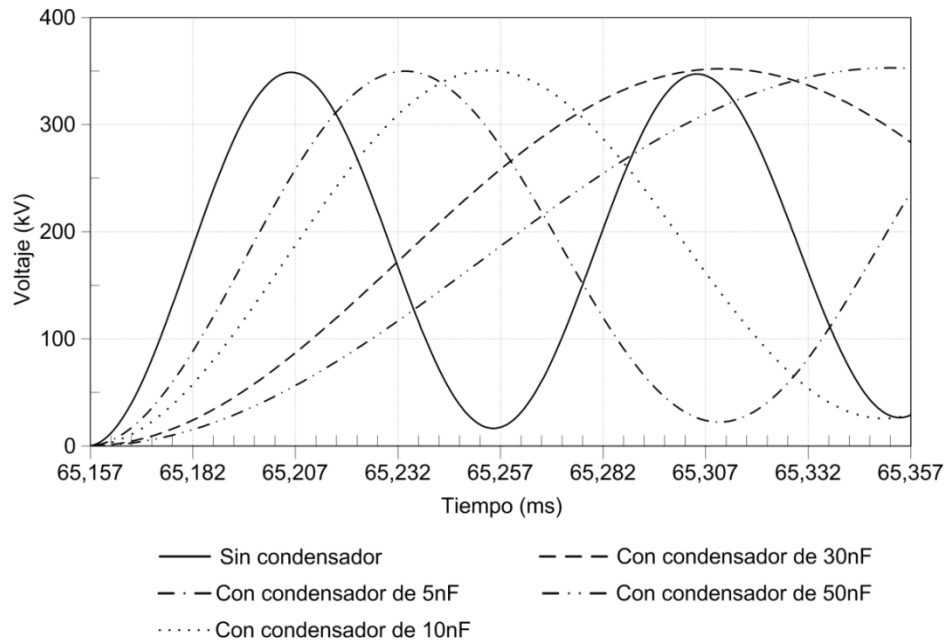


En la simulación se le dan valores de capacitancia entre 5 nF y 50 nF con lo que se pretende ver la variación de la tensión transitoria de recuperación en cada caso. En la Figura 4.8 se pueden observar los resultados obtenidos para los dos tipos de fallas.

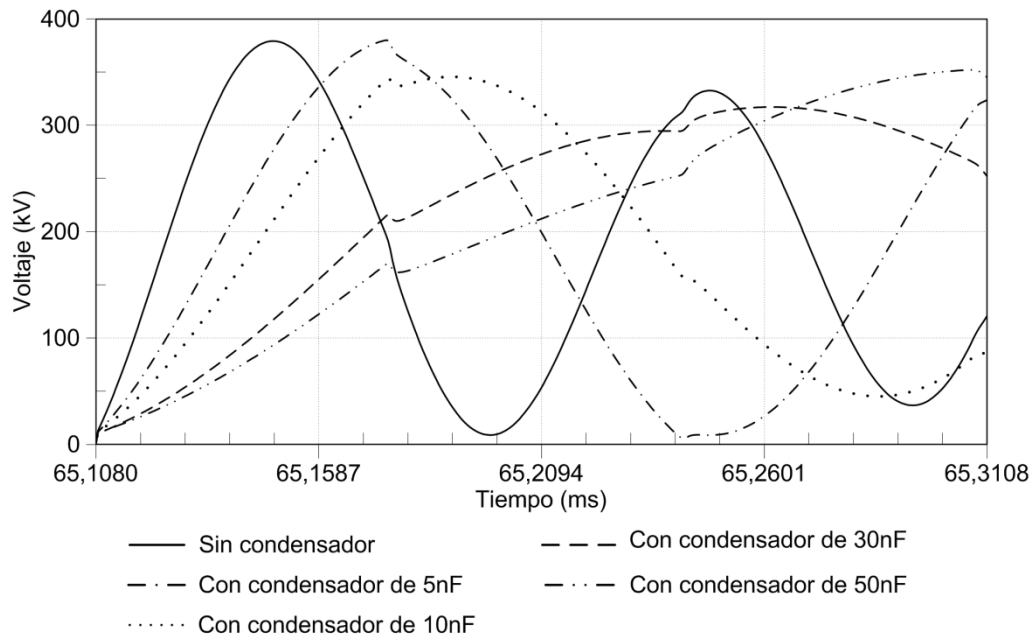
La Figura 4.8 se encuentran las formas de onda obtenidas por la tensión transitoria de recuperación para la falla en terminales (ver Figura 4.8 a) como para la falla en línea corta (ver Figura 4.8 b), cada una de las figuras muestran la respuesta del sistema sin la adición del condensador con el fin de tener un punto de referencia y con diferentes valores de capacitancia tal como se mencionó anteriormente.

Figura 4.8 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores del lado de fuente

a) Falla en terminales



b) Falla en línea corta



Los valores de magnitud de tensión y tasa de crecimiento para la falla en terminales y para la falla en línea corta se encuentran en la Tabla 4.2 y 4.3 respectivamente.

Se observa en los dos tipos de fallas que a medida que el valor de capacitancia aumenta, la tasa de crecimiento de la TRV es menor, además en la falla en terminales se obtienen valores de magnitud de tensión cada vez mayores (ver Tablas 4.2 y 4.3).

Tabla 4.2 Valores de TRV con la implementación de condensadores del lado de la fuente en una falla en terminales

Valor de capacitancia (nF)	Valor pico de la TRV (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin capacitancia	348,7	7,26
5	349,8	4,60
10	350,5	3,54
30	352,0	2,33
50	352,8	1,81

Tabla 4.3 Valores de TRV con la implementación de condensadores del lado de la fuente en una falla en línea corta

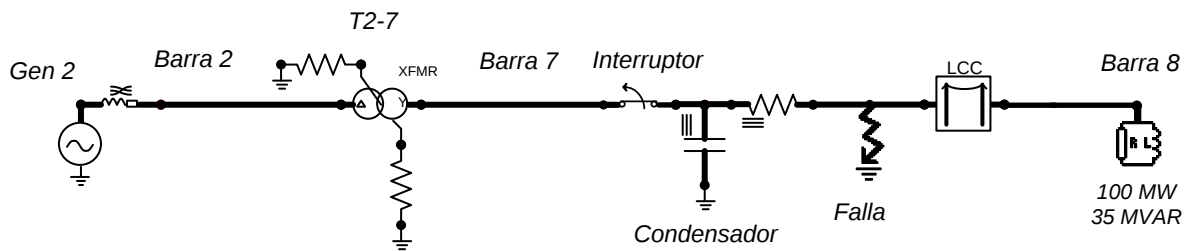
Valor de capacitancia (nF)	Valor pico de la TRV (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin capacitancia	381,7	9,51
5	379,8	5,77
10	345,5	4,27
30	317,1	2,07
50	351,9	1,76

4.3.2.2 Condensador ubicado del lado de la carga del interruptor

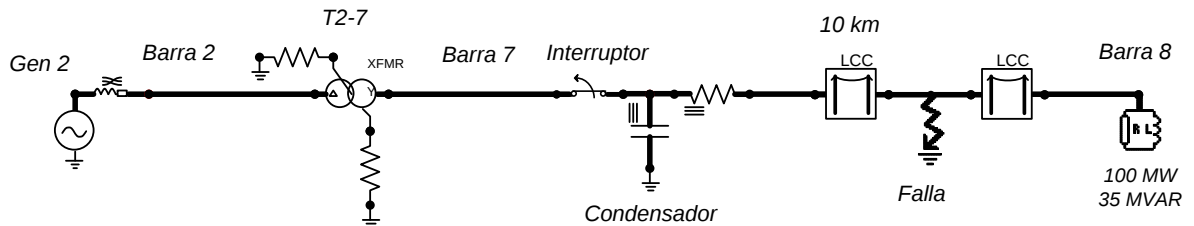
Se ubica el condensador del lado de la carga del interruptor, en éste caso se realiza una falla en terminales y una falla en línea corta tal como se observa en la Figura 4.9, a) y b) respectivamente.

Figura 4.9 Ubicación del condensador del lado de la carga del interruptor

a) Falla en terminales



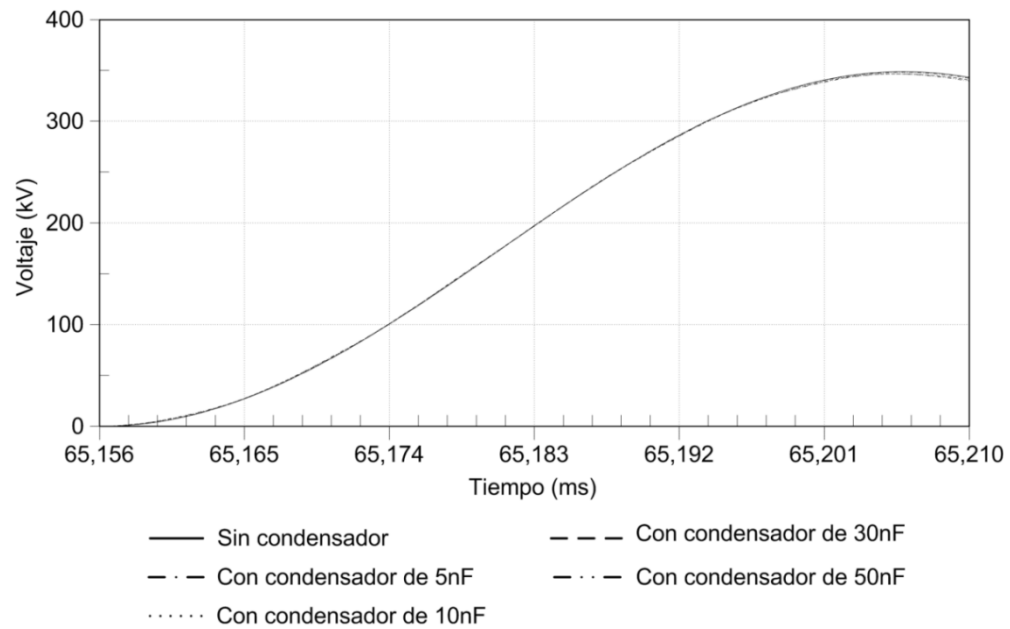
b) Falla en línea corta



Se le da valores de capacitancia al condensador entre 5 nF y 50 nF para así poder observar la tendencia de variación de la tensión transitoria de recuperación con el incremento o la disminución de ésta. En las Figuras 4.10 y 4.11 se pueden ver los resultados obtenidos para la falla en terminales y para la falla en línea corta.

Figura 4.10 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores del lado de la carga para una falla en terminales

a) Primer pico de la tensión transitoria de recuperación



b) Zoom de la tensión transitoria

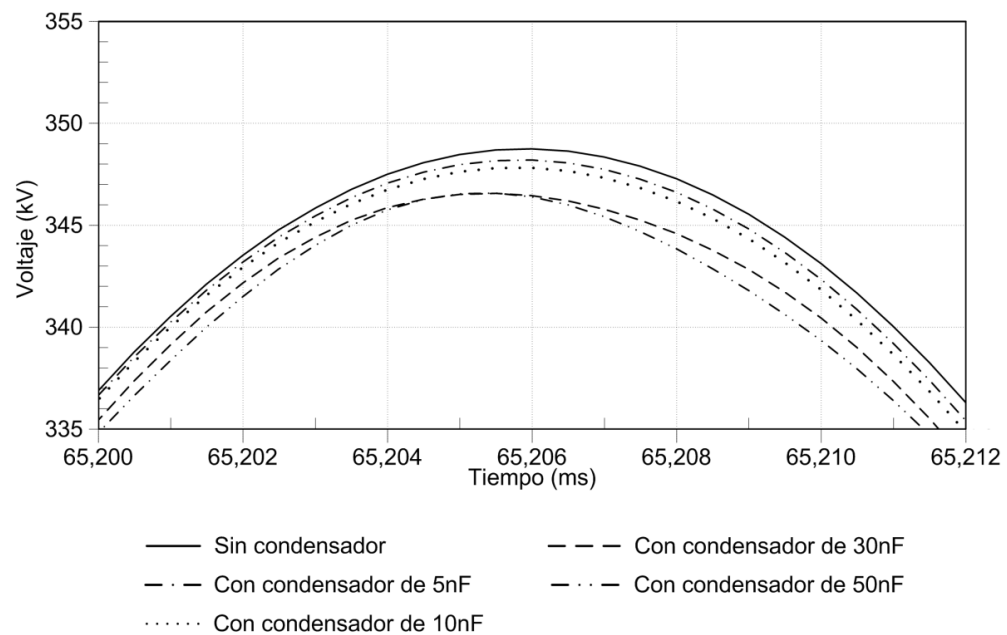
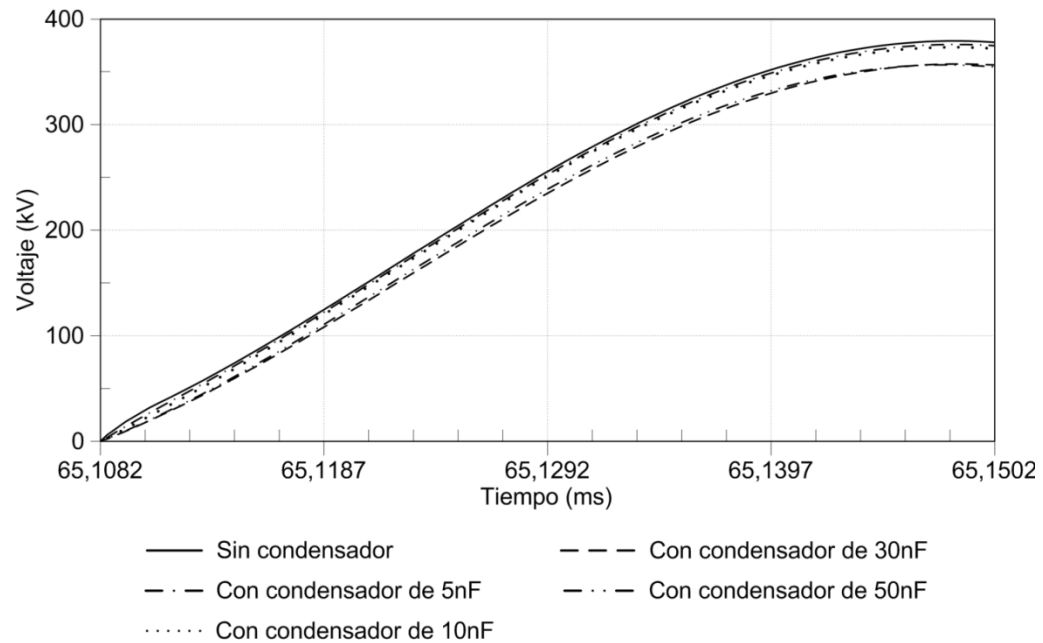
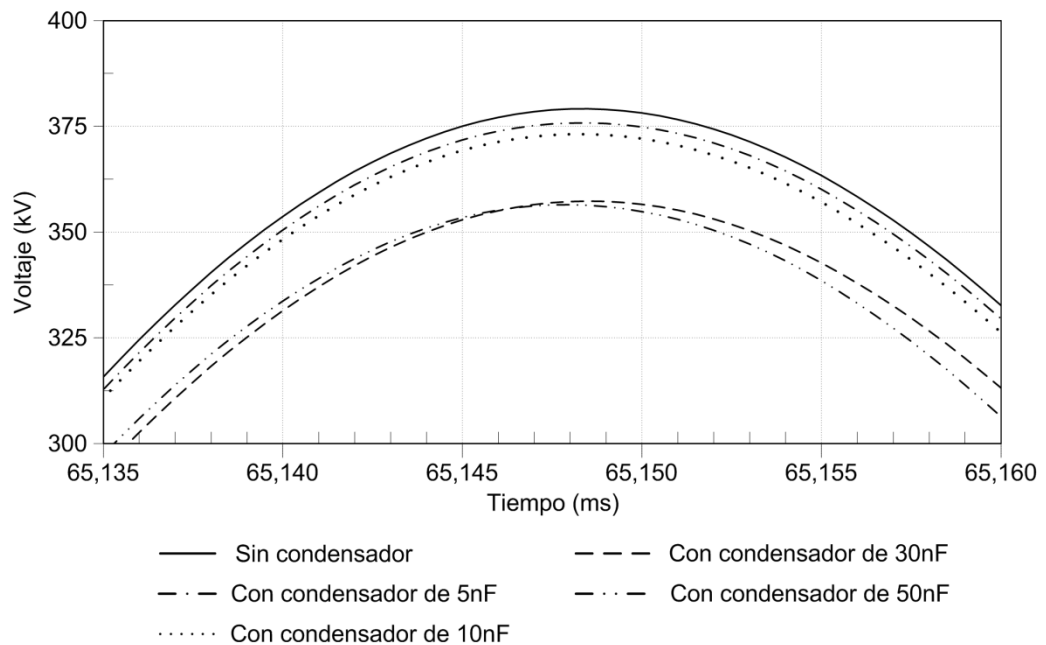


Figura 4.11 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores del lado de la carga para una falla en línea corta

a) Tensión transitoria de recuperación



b) Zoom de la tensión transitoria



En las Tablas 4.4 y 4.5 se encuentran los valores del primer pico de tensión transitoria, el tiempo en el que se obtiene desde la apertura del interruptor y tasa de crecimiento que se obtiene en ese tiempo para cada valor de capacitancia en estudio y para cada tipo de falla.

Tabla 4.4 Valores de TRV para una falla en terminales con la implementación de condensadores del lado de la carga

Valor de capacitancia (nF)	Valor pico de la TRV (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin capacitancia	348,700	7,264
5	348,208	7,124
10	347,759	7,136
30	346,578	7,135
50	346,578	7,173

Tabla 4.5 Valores de TRV para una falla en línea corta con la implementación de condensadores del lado de la carga

Valor de capacitancia (nF)	Valor pico de la TRV (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin capacitancia	381,7	9,51
5	376,1	9,45
10	373,2	9,37
30	357,3	8,97
50	356,3	8,95

En la Figura 4.10 y en los datos de la Tabla 4.4 se comprueba que ubicar condensadores del lado de la carga en fallas en terminales no es de mucha utilidad ya que las variaciones del comportamiento de la tensión transitoria de recuperación y tasa de crecimiento son mínimas (sección 4.2.2.1). Sin embargo, sucede lo contrario para fallas en línea corta tal como se muestra en la Figura 4.11

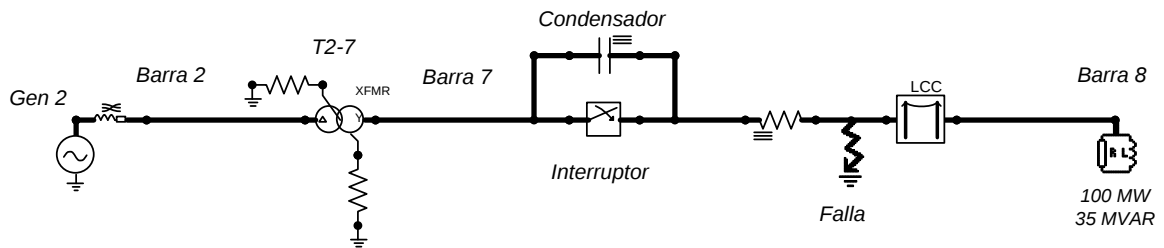
y en la Tabla 4.5 a medida que aumenta el valor de capacitancia del condensador, disminuye el valor tanto del pico de tensión transitoria como de la tasa de crecimiento, tal como se mencionó en la sección 4.2.2.1.

4.3.2.3 Condensador ubicado en paralelo con el interruptor

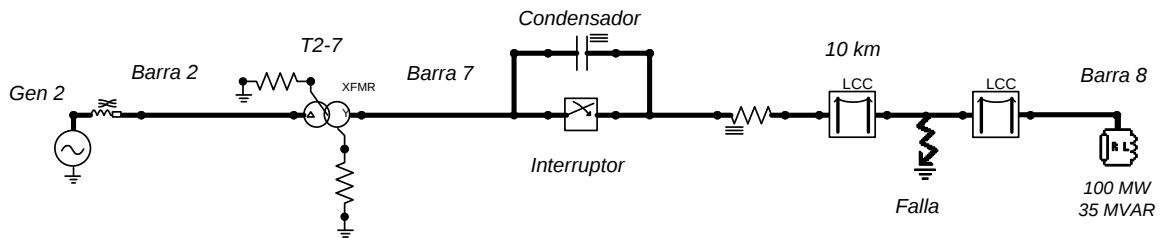
Se ubica el condensador entre los terminales del interruptor, se realizan dos fallas: una falla en terminales aterrizada y una falla en línea corta a 10 km de la barra 7 para poder observar el comportamiento de la tensión transitoria de recuperación, los sistemas simulados en ATPDraw se encuentran en la Figura 4.12.

Figura 4.12 Ubicación del condensador en paralelo con el interruptor

a) Falla en terminales



b) Falla en línea corta

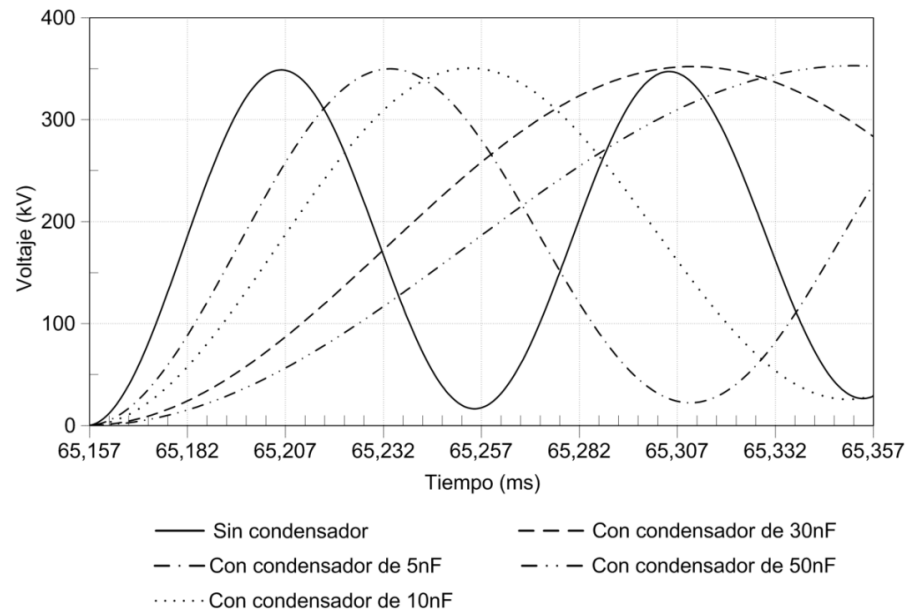


En cada una de las fallas el condensador toma valores de capacitancia entre 5 nF y 50 nF con lo que se pretende observar la variación de la tensión transitoria de recuperación, las formas de onda resultantes tanto para la falla en terminales

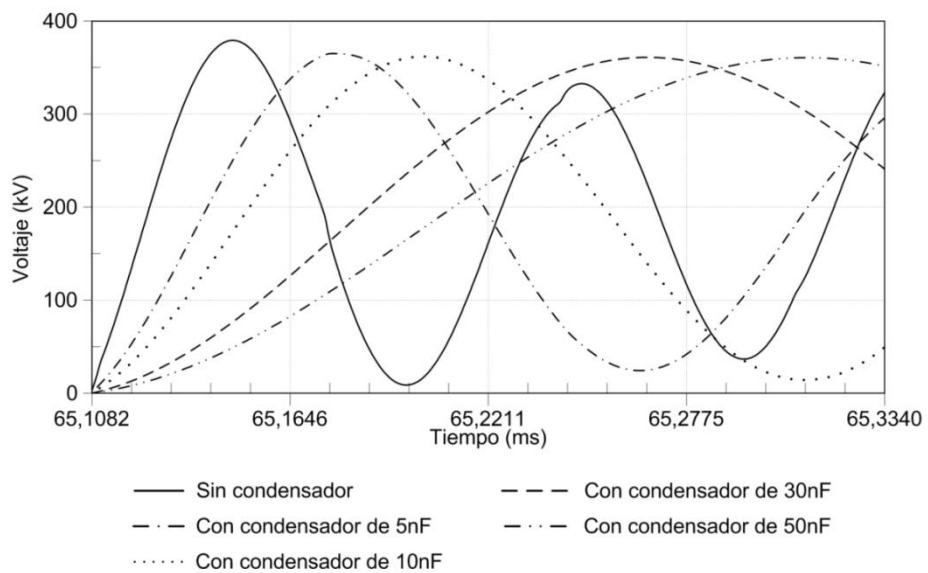
como para la falla en línea corta se puede ver en la Figura 4.13 a) y b) respectivamente.

Figura 4.13 Comportamiento de la TRV con la implementación de condensadores en paralelo al interruptor

a) Falla en terminales



b) Falla en línea corta



En la Figura 4.13 se muestra la tensión transitoria de recuperación en el sistema sin la adición del condensador con el fin de tener un punto de referencia y con diferentes valores de capacitancia en las dos fallas realizadas. Los valores de TRV obtenidos se encuentran en las Tablas 4.6 y 4.7.

Tabla 4.6 Valores de TRV para una falla en terminales con la implementación de condensadores en paralelo con el interruptor

Valor de capacitancia (nF)	Valor pico de la TRV (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin capacitancia	348,7	7,26
5	349,8	4,61
10	350,5	3,58
30	354,2	2,30
50	352,8	1,82

Tabla 4.7 Valores de TRV para una falla en línea corta con la implementación de condensadores en paralelo con el interruptor

Valor de capacitancia (nF)	Valor pico de la TRV (kV)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin capacitancia	381,7	9,51
5	364,8	5,22
10	361,7	3,88
30	360,8	2,28
50	360,5	1,77

En la Figura 4.13 se observa que tanto para la fallas en terminales como para la falla en línea corta a medida que el valor de capacitancia aumenta la tasa de crecimiento de la TRV es menor, por otro lado respecto a la magnitud de tensión

obtenida, se tiene que en la falla en terminales aumenta con el incremento en el valor de la capacitancia, mientras que en la falla en línea corta disminuye (ver Tablas 4.6 y 4.7).

4.3.3 Uso de pararrayos de óxido de Zinc

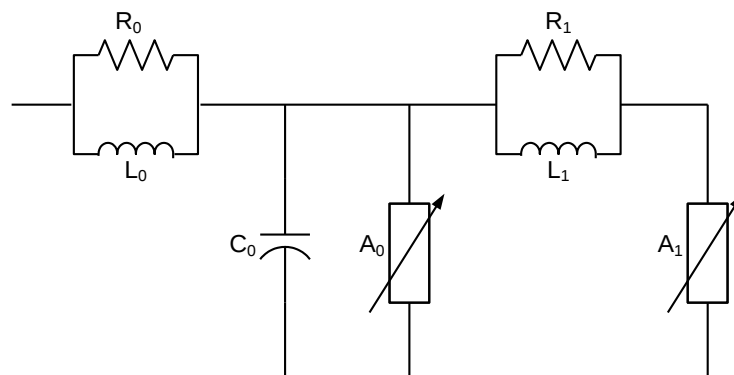
Se realiza la implementación de un pararrayos de óxido de zinc en el sistema de la Figura 4.4, para verificar su efecto en la tensión transitoria del interruptor. Las características del pararrayos utilizado se encuentran en la Tabla 4.8 [33].

Tabla 4.8 Características del pararrayos

Tensión Máxima del Sistema (kV)	Tensión nominal (kV)	Tensión continua de operación (kV)		Tensión residual con forma de onda de corriente 8/20 (kV)			
		Por IEC	Por ANSI/IEEE	5kA	10kA	20kA	40kA
245	210	156	170	469	494	543	608

El modelo de pararrayos utilizado en ATP es el IEEE que se basa en el modelo propuesto por D. W. Durbak, que se encuentra en la Figura 4.14. La característica V-I se encuentra representada por las resistencias no lineales A_0 y A_1 [34].

Figura 4.14 Modelo IEEE (Durbak)



Los valores de cada elemento fueron obtenidos de la siguiente manera:

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} \quad [\mu H] \quad (4.2)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} \quad [\Omega] \quad (4.3)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} \quad [\mu H] \quad (4.4)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} \quad [\Omega] \quad (4.5)$$

$$C_0 = 100 \frac{n}{d} \quad [pF] \quad (4.6)$$

donde

d : es la altura del pararrayos (m)

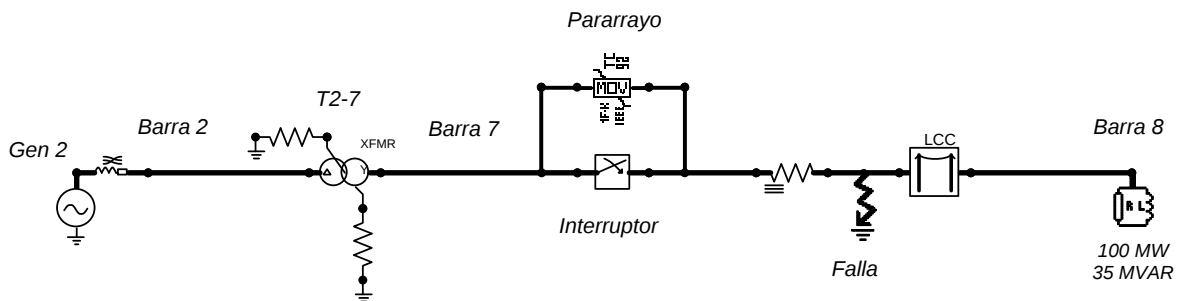
n : es el número de columnas paralelas de discos de óxidos metálicos.

El pararrayos simulado posee una altura de 1397 mm y está conformado por una columna de óxido de zinc.

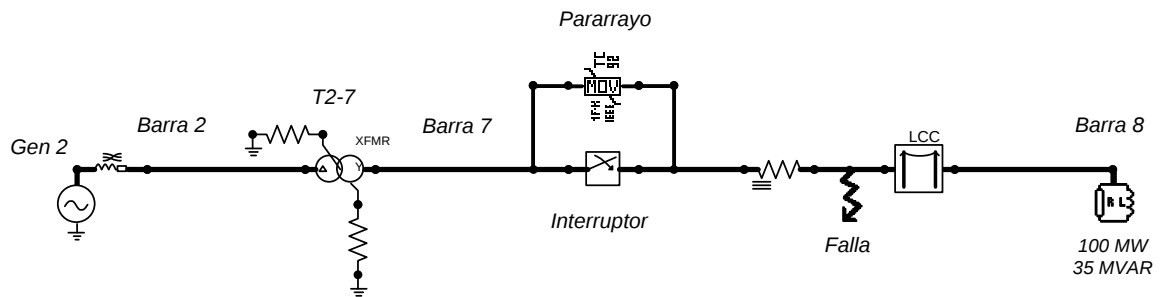
Se ubica el pararrayos entre los terminales del interruptor, se realizan dos fallas, una en terminales de la barra 7 aterrizada y una en terminales trifásica sin aterrizar como se muestra en los sistemas de la Figura 4.15 a) y b).

Figura 4.15 Ubicación de un elemento de óxido de zinc en el sistema

a) Falla en terminales aterrizada



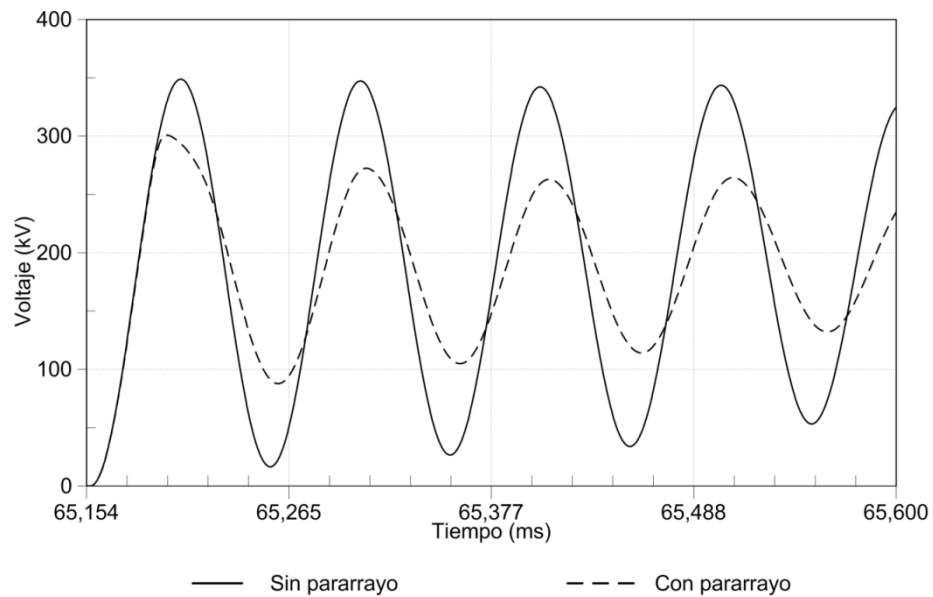
b) Falla en terminales sin aterrizar



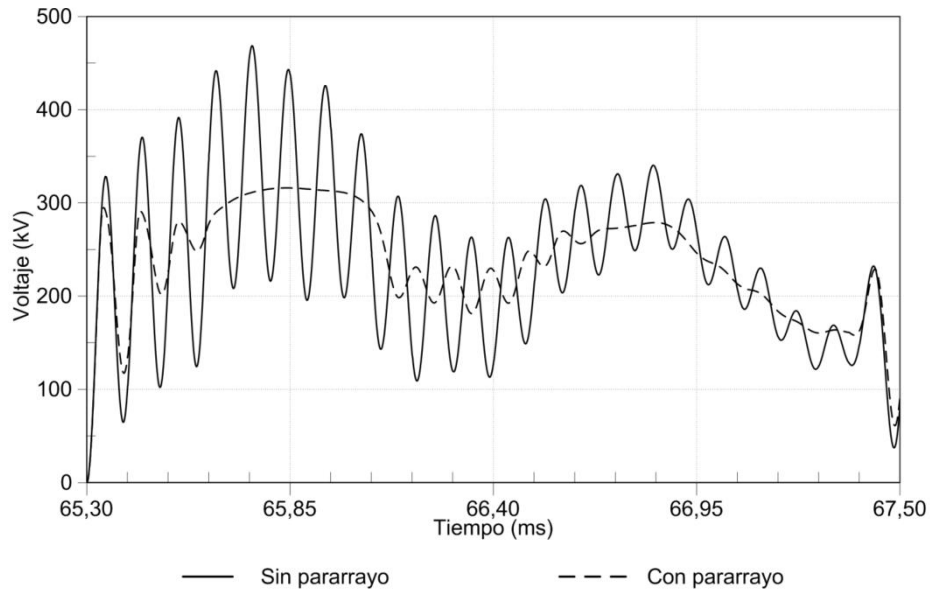
Con las características del pararrayos mencionado anteriormente se obtiene las siguientes formas de onda:

Figura 4.16 Comportamiento de la TRV con la implementación del pararrayos

a) Falla en terminales aterrizada



b) Falla en terminales sin aterrizar



En la Figura 4.16 se muestra la tensión transitoria de recuperación en el sistema sin la implementación del pararrayo y con la implementación del mismo tanto para una falla en terminales aterrizada (Figura 4.16 a) como para la falla en terminales sin aterrizar (Figura 4.16 b), y en las Tablas 4.9 y 4.10 se encuentran los valores alcanzados por la TRV en cada caso.

Para los dos tipos de fallas se observa que sin la adición del pararrayo el pico de tensión transitoria máxima sobrepasa el valor permitido por la norma (ver Tabla 3.13). En la falla en terminales (ver Figura 4.16 a) el pico máximo se da en la primera oscilación por lo tanto cuando se agrega el pararrayo recorta la onda para que no alcance ese valor.

Por otro lado en la falla en terminales sin aterrizar (ver Figura 4.16 b) el pico máximo no se da en la primera oscilación lo que hace que el pararrayo recorte la onda para disminuir el pico de tensión algunos milisegundos más adelante, lo que hace que se obtenga una forma de onda de la TRV similar a la observada en la

simulación realizada en el artículo Device to Limit Transient Recovery Voltage [26] en una falla trifásica sin aterrizar.

En las dos simulaciones se verifica que la implementación de un pararrayos, reduce la tensión máxima de la onda siempre y cuando sus características sean apropiadas, sin embargo no genera un cambio significativo en la tasa de crecimiento lo que se debe a que la función del pararrayo es recortar la onda de tensión cuando ésta sobrepasa cierto valor (ver Tablas 4.9 y 4.10).

Tabla 4.9 Valores de TRV con la implementación de un pararrayo en una falla en terminales aterrizada

	Valor pico de la TRV (kV)	Tiempo en el que se obtiene el TRV pico (μ s)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin pararrayo	348,7	48	7,26
Con pararrayo	300,7	41	7,33

Tabla 4.10 Valores de TRV con la implementación de un pararrayo en una falla en terminales sin aterrizar

	Valor pico de la TRV (kV)	Tiempo en el que se obtiene el TRV pico (μ s)	Tasa de crecimiento (kV/ μ s)
Sin pararrayo	468,6	50	6,57
Con pararrayo	316,0	45	6,55

4.4 COMPARACIÓN DE MÉTODOS

En la siguiente Tabla 4.11 se realiza la comparación de la tendencia de los métodos implementados en las secciones anteriores.

Tabla 4.11 Comparación de los métodos de mitigación

Elemento	Magnitud de tensión	Tasa de crecimiento
Resistencia	✓	✓
Condensadores	X	✓
Pararrayos	✓	X

De acuerdo a los resultados de las simulaciones realizadas y a la teoría estudiada en el inicio de este capítulo se observa:

- Utilizar resistencias en paralelo con el interruptor es el método más efectivo para mitigar la tensión transitoria de recuperación y su tasa de crecimiento.
- La implementación de condensadores es efectiva para reducir la tasa de crecimiento de la TRV y puede elevar o disminuir su magnitud en algunos casos.
- Aunque los pararrayos no se usan con frecuencia para mitigar la magnitud de la tensión transitoria de recuperación, su aplicación puede ser de mucha utilidad.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

En éste trabajo se presentaron las características de la tensión transitoria de recuperación que se corroboraron mediante la simulación de un sistema de potencia en una herramienta computacional como es el ATP, de igual manera se realizó la verificación de los métodos utilizados para mitigar la tensión transitoria de recuperación con los que se puede obtener los valores permitidos en la norma para cada sistema.

De acuerdo con el trabajo realizado se encontró que:

- La forma de onda de la tensión transitoria de recuperación varía dependiendo de las características del sistema en el que sea generada y los elementos conectados a él, esto se debe a que es resultado de dos componentes: una que es aportada por el lado de la fuente y otra por el lado de la falla o de la carga.
- La tensión transitoria de recuperación obtenida en fallas en terminales sin aterrizar poseen valores de magnitud mayores a los obtenidos con otros tipos de fallas, debido a que la componente de tensión del lado de la falla intenta restablecer la tensión del sistema, lo que genera una tensión transitoria de magnitud mayor por el aporte de ésta componente, algo que no sucede en fallas aterrizadas ya que la componente del lado de la falla se establece fácilmente en el valor de cero.
- La implementación de condensadores en un sistema es un método efectivo para la reducción de la tasa de crecimiento de la TRV.

- La implementación de resistencias de switcheo son efectivas cuando se trata de mitigar la tensión transitoria (magnitud y tasa de crecimiento) sin embargo es un método que ha ido siendo reemplazado por las nuevas tecnologías.
- Se han iniciado estudios acerca del efecto de utilizar pararrayos para la mitigación de la tensión transitoria, su aplicación es únicamente para mitigar la magnitud de la tensión.
- Los métodos utilizados para realizar la mitigación de la tensión transitoria de recuperación se utilizan de acuerdo a las necesidades de cada sistema, es decir, es necesario saber que se desea reducir, la magnitud, la tasa de crecimiento o ambas, ya que cada método tiene una función específica en el sistema.
- El uso de herramientas de simulación es de gran ayuda para analizar los fenómenos que se presentan en los sistemas de potencia.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo de grado permite el inicio de nuevos trabajos de investigación que podrían estar enfocados en:

- Determinar un método que permita establecer el valor de capacitancia y resistencia más adecuado en un sistema de potencia cualquiera para reducir la tasa de crecimiento de la tensión transitoria de recuperación a valores permitidos por la norma.
- Realizar estudios de comparación con las otras herramientas de simulación (EMTP_{RV}, PSCAD, DigSilent, NEPLAN).

ANEXO A

RESPUESTAS DE UN CIRCUITO RLC

En el Capitulo 2 se da solución a un circuito RLC paralelo en sus tres formas de respuesta: circuito sobreamortiguado, críticamente amortiguado y subamortiguado. Para ello se tiene en cuenta la respuesta general obtenida en la ecuación 2.26:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} [e^{ts_1} - e^{ts_2}]$$

Se obtienen distintas ecuaciones para cada respuesta, las obtenidas a de el circuito sobreamortiguado y subamortiguado serán explicadas detalladamente a continuación:

Circuito sobreamortiguado

Un circuito presenta sobreamortiguamiento cuando:

$$\frac{1}{4(RC)^2} > \frac{1}{LC} \quad (\text{A.1})$$

Por lo tanto la s_1 y s_2 son números reales iguales a:

$$s_1 = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}} \quad y \quad s_2 = -\frac{1}{2RC} - \sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}} \quad (\text{A.2})$$

Para simplificar un poco el procedimiento se toma:

$$x = \frac{1}{2RC} \quad (\text{A.3})$$

$$y = \sqrt{\frac{1}{4(RC)^2} - \frac{1}{LC}} = \frac{\sqrt{LC - 4(RC)^2}}{2RC\sqrt{LC}} \quad (\text{A.4})$$

$$z = \frac{V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} \quad (\text{A.5})$$

Reemplazando los valores anteriores la ecuación 2.26 queda:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = z[e^{t(-x+y)} - e^{-t(x+y)}] \quad (\text{A.6})$$

Simplificando la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{-1}[f(s)] &= z \left[\frac{e^{ty}}{e^{tx}} - \frac{1}{e^{t(x+y)}} \right] = z \left[\frac{e^{ty}}{e^{tx}} - \frac{1}{e^{tx}e^{ty}} \right] = z \left[\frac{e^{ty}e^{tx}e^{ty} - e^{tx}}{e^{tx}e^{tx}e^{ty}} \right] \\ &= z \left[\frac{e^{tx}(e^{2ty} - 1)}{e^{2tx}e^{ty}} \right] \\ \mathcal{L}^{-1}[f(s)] &= z \left[\frac{e^{-tx}(e^{2ty} - 1)}{e^{ty}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Se tiene que el sinh (a), siendo a un valor cualquiera en su forma exponencial esta dado por:

$$\sinh(a) = \frac{e^a - e^{-a}}{2} \quad (\text{A.8})$$

Expresado de otra manera quedaría:

$$\begin{aligned} \sinh(a) &= \frac{e^a}{2} - \frac{e^{-a}}{2} = \frac{e^a}{2} - \frac{1}{2e^a} = \frac{2e^ae^a - 2}{4e^a} = \frac{1}{2} \left(\frac{e^{2a} - 1}{e^a} \right) \\ \sinh(a) &= \frac{e^{-a}}{2} (e^{2a} - 1) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Haciendo la comparación de la ecuación 7 y la ecuación 9 se llega a:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = z \left[\frac{e^{tx}(e^{2ty} - 1)}{e^{2tx}e^{ty}} \right] = \frac{2}{2} z e^{-tx} e^{-ty} (e^{2ty} - 1)$$

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = 2 z e^{-tx} \sinh(ty) = \quad (A.10)$$

Reemplazando los valores de x, y y z, llegamos a la ecuación A.10:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{2V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} e^{-t(\frac{1}{2RC})} \sinh\left(\frac{\sqrt{LC - 4(RC)^2}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \quad (A.11)$$

Derivando esta ultima ecuación obtenemos el valor de Vc(t) (ver ecuación 2.23):

$$V_c(t) = \frac{d}{dt} \mathcal{L}^{-1}[f(s)] + F(0)$$

$$V_c(t) = V_c(0) e^{-t(\frac{1}{2RC})} \left[\cosh\left(\frac{\sqrt{LC - 4(RC)^2}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) - \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{LC - 4(RC)^2}} \sinh\left(\frac{\sqrt{LC - 4(RC)^2}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \right] \quad (A.12)$$

Circuito subamortiguado

Un circuito presenta subamortiguamiento cuando:

$$\frac{1}{4(RC)^2} < \frac{1}{LC} \quad (A.13)$$

por lo tanto s_1 y s_2 son números complejos:

$$s_1 = -\frac{1}{2RC} + j \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}} \quad y \quad s_2 = -\frac{1}{2RC} - j \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}} \quad (A.14)$$

Para simplificar un poco el procedimiento se toma:

$$x = \frac{1}{2RC} \quad (A.15)$$

$$y = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4(RC)^2}} = \frac{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}{2RC\sqrt{LC}} \quad (A.16)$$

$$z = \frac{V_c(0)RC\sqrt{LC}}{j\sqrt{4(RC)^2 - LC}} \quad (A.17)$$

Reemplazando los valores anteriores la ecuación 2.26 queda:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = z[e^{t(-x+jy)} - e^{-t(x+jy)}] \quad (A.18)$$

Simplificando la ecuación anterior:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = z\left[\frac{e^{jty}}{e^{tx}} - \frac{1}{e^{t(x+jy)}}\right] = z\left[\frac{e^{jty}}{e^{tx}} - \frac{1}{e^{tx}e^{jty}}\right] = z\left[\frac{1}{e^{tx}}\left(e^{jty} - \frac{1}{e^{jty}}\right)\right]$$

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = ze^{-tx}(e^{jyt} - e^{-jty}) \quad (A.19)$$

Se tiene que el sin (a), siendo a un valor cualquiera en su forma exponencial esta dado por:

$$\sin(a) = \frac{e^{ja} - e^{-ja}}{2j} \quad (A.20)$$

Haciendo la comparación de la ecuación A.19 y A.20 se llega a:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{2j}{2j}ze^{-tx}(e^{jyt} - e^{-jty})$$

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = 2jze^{-tx}\sin(ty) = \quad (A.21)$$

Reemplazando los valores de x, y y z, llegamos a la ecuación 2.26:

$$\mathcal{L}^{-1}[f(s)] = \frac{2V_c(0)RC\sqrt{LC}}{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}e^{t(-\frac{1}{2RC})}\sin\left(\frac{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}{2RC\sqrt{LC}}t\right) \quad (A.22)$$

Derivando esta ultima ecuación obtenemos el valor de Vc(t) (ver ecuación 2.23)

$$\begin{aligned}
 V_c(t) &= \frac{d}{dt} \mathcal{L}^{-1}[f(s)] + F(0) \\
 V_c(t) &= V_c(0) e^{-t(\frac{1}{2RC})} \left[\cosh\left(\frac{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{4(RC)^2 - LC}} \sinh\left(\frac{\sqrt{4(RC)^2 - LC}}{2RC\sqrt{LC}} t\right) \right]
 \end{aligned} \tag{A.23}$$

ANEXO B

DATOS DEL SISTEMA

Tabla B.1 Datos de los generadores del sistema WSCC [35]

Generador	1	2	3
MVA	247,5	192	128
kV	16,5	18	13,8
fp	1	0,85	0,85
Tipo	Hidro	Vapor	Vapor
Velocidad (rpm)	1800	3600	3600
X_d	0,146	0,8958	13,125
X_q	0,0969	0,8645	12,587
X_d'	0,0608	0,1198	0,1813
X_q'	0,0969	0,1969	0,25
T_d'	89,600	60,000	58,900
T_q'	0	0,535	0,6
X_d''	0,04	0,055	0,08
X_q''	0,04	0,055	0,08
T_d''	0,2	0,3	0,4
T_q''	0,2	0,3	0,4
X_L	0,0336	0,0521	0,0742
r_a	0,0001	0,0001	0,0001
H(s)	236,400	64,000	30,100
T_{fi}	10,000	10,000	10,000
b_{fi}	0,02	0,02	0,02

Tabla B.2 Datos de las barras del sistema WSCC [21]

Barra	Voltaje (kV)	Carga (MW)	Carga (MVAR)
1	16,5	0	0
2	18	0	0
3	13,8	0	0
4	230	0	0
5	230	125	50
6	230	90	30
7	230	0	0
8	230	100	35
9	230	0	0

Tabla B.3 Características de los elementos del sistema implementado en ATP

Elemento	Barra de interconexión	Resistencia (Ω/km)	Reactancia (Ω/km)	Suceptancia (mho/km)
Línea de Transmisión	4 a 5	4,4644	22,7366	1,78E-04
Línea de Transmisión	4 a 6	7,5909	38,6595	3,03E-04
Línea de Transmisión	5 a 7	14,2887	72,7706	5,70E-04
Línea de Transmisión	6 a 9	17,4144	88,6895	6,95E-04
Línea de Transmisión	7 a 8	3,7954	19,3296	1,52E-04
Línea de Transmisión	8 a 9	5,3135	27,0613	2,12E-04

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEC 60071-1 Insulation Co-ordination, Part I: “Definitions, principles and rules,” 7. Edition, 2011.
- [2] IEEE Std 1313.1 “Standard for insulation Co-ordination – Definitions, Principles and Rules,” 1996.
- [3] IEC 60071-4 Insulation Co-ordination, Part 4: “Computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks,” 1. Edition, 2004.
- [4] Naef O., Zimmerman C. P., Beehler J. E., “Proposed Transient Recovery Voltage Ratings for Power Circuit Breakers” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: 84 , Issue: 7, 1965.
- [5] IEEE Std C 37.011TM “Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers”, 2011.
- [6] Juan A. Martinez Velasco, “Power System Transients Parameter Determination”, Taylor and Francis Group, 2010.
- [7] Das J. C., “Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation”, Mc Graw Hill, 2010.
- [8] Ruben D. Garzon, Square D Co. and Smyrna Tennessee, “High Voltage Circuit Brakers: Desing and Application, Second Edition, Revised and Expanded”, Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [9] Stewart S., “Distribution Switchgear”, The Institution of Engineering and Technology”, London, 2008.
- [10] IEEE Std C37.016TM “Standard for AC High-Voltage Circuit Switchers Rated 15.5 kV Through 254 kV”, 2006
- [11] ABB, “Live Tank Circuit Breakers. Buyer’s Guide”, 2009.

- [12] Siemens, “Informaciones de Productos: 3AP Dead Tank”, 2012.
- [13] IEEE Std C37.04bTM “IEEE Standard for Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis. Amendment 2: To Change the Description of Transient Recovery Voltage for Harmonization with IEC 62271-100”, 2008.
- [14] Greenwood, A. “*Electrical transients in power systems*”, *Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [15] Castro, F., Guillermo A., “Coordinación de aislamiento: Notas de clases”, 2012.
- [16] Glover J. Ducan Sarma, Malukuta S, “Sistemas de Potencia: Análisis y diseño”, International Thomsom Editores S.A, 2004.
- [17] Dommel, H.W., "Digital computer solution of electromagnetic transient in single and multiphase networks," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 4, pp.388-399, April 1969.
- [18] EMTP-RV, EMTP-RV: The reference for power system transients [en línea] <<http://www.emtp.com/>>, [Citado 15 de enero de 2013].
- [19] PSCAD [en línea], <<https://hvdc.ca/pscad/>>, [Citado 15 de enero de 2013]
- [20] Alternative Transients Program, <<http://www.emtp.org/>>, [Citado 15 de enero de 2013]
- [21] Anderson P. M., Fouad A. A., Power System Control and Stability, 2nd Edition., John Wiley & Son, New York , 2003
- [22] Centelsa, “Catálogo: Conductores de aluminio desnudo”, 2012.
- [23] Battista Ronaldo C., Rodrigues Rosangela S., Pfeil Michele S. “Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91, 2003.

- [24] Lakervi E., Holmes E. J. "Electricity distribution network desing" Peter Peregrinus Ltd, 2003.
- [25] Weedy B. M. "Sistemas electricos de gran potencia", Reverté S.A., 1982.
- [26] Azevêdo Wilker V. S., Washington L. A. Neves, Damásio Fernandes Jr., Benemar A. Souza "Device to Limit Transient Recovery Voltage" Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2010.
- [27] Skeats W. F., Titus C. H., Wilson, W. R "Severe Rates of Rise of Recovery Voltage Associated with Transmission Line Short Circuits" 1958.
- [28] ABB, "Live Tank Circuit Breakers, Application Guide", 2010.
- [29] Hedman D. E., Lambert S. R. "Power circuit breaker transient recovery voltages", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systeus, Vol. PAS-95, no. 1, January/February 1976.
- [30] Colclaser R. G., Berkebile L. E., Buettner D. E. "The effect of capacitors on the short-line fault component of transient recovery voltage", IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol. PAS-90, NO. 2, March/April 1971.
- [31] Peelo, D.F.; Polovick, G.S.; Sawada, J.H.; Diamanti, P.; Presta, R.; Sarshar, A.; Beauchemin, R "Mitigation of Circuit Breaker Transient Recovery Voltages Associated with Current Limiting Reactors" IEEE Transactions on Power Delivery, Volumen: 11 , Issue: 2, 1996.
- [32] IEEE Std C62.11 "IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)", 2012.
- [33] ABB, "High Voltage Surge Arresters, Buyer's Guide", 2012.

- [34] IEEE Std C62.22, "IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", 1997.
- [35] K. Shanti Swarup "Artificial neural network using pattern recognition for security assessment and analysis", Neurocomputing Volumen 71, Issues 4–6, January 2008