



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**“ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS
SOBRETENSIONES TRANSITORIAS SOBRE EL
EQUIPO DE COMUNICACIÓN OPLAT POWER LINK”.**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

ISMAEL BARRALES MÉNDEZ

Asesores:

**DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SÁNCHEZ
M.C. ISMAEL ALBINO PADILLA**

Puebla, Pue.

Mayo 2017



BUAP

OFICIO SIEP No. 1073/2017

ING. ISMAEL BARRALES MÉNDEZ

Maestría en Ingeniería, Opción terminal Sistemas
Eléctricos de Potencia
Presente.

El suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de autorización de tema de tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **“ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS SOBRE EL EQUIPO DE COMUNICACIÓN OPLAT POWER LINK”**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas eléctricos de potencia. Asignándose como Asesor de Tesis al Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

Puebla, Puebla a 22 de febrero de 2017

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ

Director de la Facultad de Ingeniería



C.c.p. Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez - Asesor tema de Tesis.

C.c.p. Archivo.

ABH/GCC/dsm.

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

ASUNTO: Autorización de impresión

M. I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P R E S E N T E

El suscrito, **Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez** y el **MC. Ismael Albino Padilla**, asesores del tema de Tesis denominado "**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS SOBRE EL EQUIPO DE COMUNICACIÓN OPLAT POWER LINK**", presentado por el **C. ISMAEL BARRALES MÉNDEZ**, estudiante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia, me permito informar a usted que después de haber revisado el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la Tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Asimismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su examen profesional.

Lo hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

Atentamente

Puebla, Pue., 30 de Marzo del 2017



Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez



MC. Ismael Albino Padilla

c.c.p.- Exámenes Profesionales
Interesado
Archivo
JCES, IAP



*A las estrellas que
Dios envió en mi singladura
Para caminar juntos
Por este mundo
Mi esposa Ángeles
Y mi amado hijo
Mateo*



RESUMEN

La Red Nacional de Transmisión de Energía (RNTE) tan mallada y en constante crecimiento desde la generación en lugares lejanos hasta los centros de consumo, tales como ciudades y zonas industriales, requiere integrar redes inteligentes con equipos de telecomunicaciones sofisticados para brindar servicio de voz y todo tipo de datos como: Teleprotección, Telecontrol y Telemetría, estos equipos deben estar disponibles para cualquier eventualidad que pueda llegar a presentarse de tal forma que desde los centros de control hasta las plantas de generación o centros de consumo se puedan monitorear y enviar órdenes a la red para mantener su Continuidad, Confiabilidad, Seguridad y por ende su Estabilidad.

De forma que para satisfacer las necesidades de comunicación, la industria energética cuenta con una amplia variedad de sistemas implementados, dependiendo del ancho de banda requerido y medio de transmisión como puede ser Fibra Óptica, Microondas, Onda Portadora por Línea de Alta Tensión (OPLAT), etc.; este último para nuestro propósito en el caso de estudio posterior debido a que la industria energética es la única que cuenta con un medio físico confiable como son las líneas de transmisión que interconectan las plantas generadoras, centros de consumo y control para transmitir señales por medio de una Onda Portadora de Alta Frecuencia.

Debido a que en la actualidad se tiene un incremento en la cargabilidad de las líneas de transmisión y como consecuencia niveles de tensión cada vez mayores en las líneas, se requiere de equipos sofisticados para tener mayor confiabilidad del SEP, como consecuencia de la creciente expansión del mismo, esto implica la modernización de equipos de comunicación OPLAT Power Link en la Zona de Transmisión Puebla para satisfacer las necesidades específicas del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Hasta el momento en la Subestación (S.E.) TECALI se cuenta con 7 líneas de transmisión de 400 KV, 3 líneas de transmisión de 230 KV, 10 líneas de transmisión de 115 KV, 2 bancos de transformación con capacidades de: banco #1 de 375 MVA, banco #2 de 225 MVA, 4 bancos de capacitores y 2 reactores. Para este año se tiene la puesta en servicio de un 3er. banco de transformación. Específicamente se hace mención de la línea TCL-A3U40-CZM, de esta línea se desprende el estudio a realizar; la cual presenta una cargabilidad de 438 MWh y cuenta con sistemas de comunicación para brindar servicios de TELEPROTECCIÓN mediante el equipo de OPLAT Power Link y Fibra Óptica. El estudio se enfoca en el equipo Power Link debido a que el día 03 de junio del año 2015 reporta el operador del GCRORI, que tiene presente una alarma en su gestor del sistema sobre el equipo de comunicaciones OPLAT Power Link de Línea de Transmisión (L.T.) TCL-A3U40-CZM.



ABSTRACT

The ever-growing National Grid Transmission Network (RNTE), from generation in distant places to consumer centers such as cities and industrial areas, requires the integration of smart grids with sophisticated telecommunications equipment to provide voice and all types of data such as: Teleprotection, Telecontrol and Telemetry, these equipments must be available for any eventuality that can be presented in such a way that from the control centers to the generation plants or consumer centers can be monitored and sent to the network to maintain its Continuity, Reliability, Security and for its Stability.

In order to meet the communication needs, the energy industry has a wide variety of systems implemented, depending on the required bandwidth and transmission medium, such as Optical Fiber, Microwave, High Voltage Line Carrier Wave (OPLAT) , etc.; This last one for our purpose in the case of later study because the energy industry is the only one that counts on a reliable physical means as are the transmission lines that interconnect the generating plants, centers of consumption and control to transmit signals by means of a High Frequency Carrier Wave.

Due to the fact that there is now an increase in the loadability of the transmission lines and, as a consequence, increasing voltage levels in the lines, sophisticated equipment is required to have greater reliability of the Power system (SEP), as a consequence of the increasing expansion of the same, This involves the modernization of OPLAT Power Link communication equipment in the Puebla Transmission Zone to meet the specific needs of the SEP. So far in the substation (S.E.) TECALI has 7 transmission lines of 400 KV, 3 transmission lines of 230 KV, 10 transmission lines of 115 KV, 2 processing banks with capacities of: bank # 1 of 375 MVA, bank # 2 of 225 MVA, 4 capacitor banks and 2 reactors. For this year we have the commissioning of a 3rd. Processing bank Specifically mention is made of the TCL-A3U40-CZM line, from this line the study to be performed is shown; Which has a load capacity of 438 MWh and has communication systems to provide TELEPROTECTION services using the OPLAT Power Link and Fiber Optic equipment. The study focuses on the Power Link equipment because on June 03, 2015 reports the GCRORI operator, who has an alarm in his system manager about the communications equipment OPLAT Power Link of L.T. TCL-A3U40-CZM.



DEDICATORIAS

A dos ángeles que han partido de este mundo y se llevaron parte de mi corazón, dejando una cicatriz difícil de borrar pero sobre todo un gran vacío en mi interior; sin dudarlo uno que partió hace más de 15 años, el tiempo es tan efímero que parece que fue ayer pero sobre todo que aún es posible recordar sus enseñanzas, escuchar el susurro de sus palabras en mi cabeza y que dejó grabadas sus palabras en mi mente “A MI PADRE”.

La otra persona es ella “MI SOBRINA” que hace poco partió para estar a tu lado Padre; ella se fue dejando solo su recuerdo y sus sueños que tenía por delante, que aun mi vista es capaz de ver su silueta por las noches, en mis sueños ver su linda sonrisa y plasmar en el cielo sus lindos ojos que nos observan cumplir su cometido; escuchar en el viento sus dulces y tiernas palabras de amor.

Q.D.E.P.

“SERGIO Y LISSET”



AGRADECIMIENTOS

Al creador del universo que por años ha permitido iluminar mentes brillantes para crear nuevas ideas y desarrollar avances tecnológicos para proporcionar una mejor calidad de vida a los seres humanos.

A DIOS

A mi Familia que siempre me ha brindado el apoyo.

A mi esposa e hijo que siempre me alientan a descubrir nuevos horizontes, seguir luchando día con día para romper barreras y saber que los límites son cuestión de visión, que el límite más grande es uno mismo.

A mi madre y padre que siempre me motivaron a luchar por mis metas.

A mis hermanos que siempre me inspiran perseverancia

A mis sobrinos que siempre son mi motor para seguir adelante.

A todos mis compañeros de Posgrado en SEP

Y finalmente, a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por abrirme sus puertas y así poder desarrollarme profesionalmente en una de las mejores escuelas de Ingeniería en México.

*Mil gracias a todos
Ismael Barrales Méndez*



A mis compañeros:

DR. Juan Carlos Escamilla Sánchez

M.C. Ismael Albino Padilla

Ing. José Enrique Sánchez Flores

M.I. Eduardo Solís Olivos

Ing. Luis Contreras

Ing. Jacobo López Valle

Ing. Omar Díaz Rodríguez

Ing. Erik Pérez García

Ing. Claudia Cervantes Aquino

Ing. Miguel Ángel Maldonado Esquivel

Ing. José Encarnación Oliver

Lic. Liliana Vázquez Cuaquentzi

Ing. Oscar Luna Hernández

Ing. Gustavo García Vázquez

Ing. Giovanni Moncayo Ramírez

Por su apoyo



ÍNDICE

Resumen	
Abstract	
Dedicatorias	
Agradecimientos	
Índice	
Índice de Figuras	
Índice de Tablas	
Simbología	
Cuerpo de la tesis	
Conclusiones	
Referencias	

Introducción	1
---------------------------	---

CAPÍTULO I Protocolo de Investigación

1.1	Planteamiento del problema.....	3
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivos Particulares.....	9
1.2.2	Objetivo General.....	9
1.3	Justificación.....	9
1.4	Estado del arte.....	10
1.5	Limitaciones y alcance del trabajo.....	11
1.6	Aportaciones.....	11
1.7	Estructura de la Tesis.....	11

CAPÍTULO II Marco de Referencia

2.1	Generalidades.....	12
2.2	Antecedentes.....	14
2.2.1	Importancia de los equipos OPLAT Power Link.....	14
2.3	Líneas de transmisión.....	21
2.4	Modelos para el Análisis de los Transitorios Electromagnéticos en Líneas de Transmisión.....	22



CAPÍTULO III Líneas de Transmisión Aéreas

3.1	Modelado de Líneas de Transmisión.....	24
3.2	Ecuaciones del Telegrafista.....	25
3.3	Cálculo de parámetros En por unidad para una línea de transmisión monofásica.....	34
3.3.1	Inductancia en una Línea par abierto.....	34
3.3.2	Capacitancia en una Línea par abierto.....	37
3.4	Modelo de J. Martí.....	37
3.4.1	Desarrollo Matemático del Modelo de Martí.....	39

CAPÍTULO IV Análisis de las sobretensiones Transitorias sobre los equipos Power Link

4.1	Enlace OPLAT y sus características.....	42
4.2	Equipo primario.....	44
4.2.1	Trampa de onda.....	45
4.2.2	Dispositivo de potencial.....	53
4.2.3	Cable de Radio Frecuencia.....	59
4.2.4	Filtro de acoplamiento.....	60
4.3	Programa de Simular ATP/Draw.....	68
4.4	Cálculo de la Impedancia del sistema.....	79
4.5	Simulaciones en ATP/Draw.....	84

Conclusiones

Conclusiones.....	96
-------------------	----

Referencias.....	97
-------------------------	-----------



ÍNDICE FIGURAS

Fig. 1.1 Equipo Bloqueado presenta Alarmas de Tx, Rx, G y UN.....	4
Fig. 1.2 Inspección de eventos normales.....	4
Fig. 1.3 Último respaldo de configuración de Equipo.....	5
Fig. 1.4 Supervisión de configuración de servicio de voz normal.....	5
Fig. 1.5 Supervisión de configuración de servicio de Teleprotección normal.....	6
Fig. 1.6 Supervisión de configuración de equipo de Teleprotección normal.....	6
Fig. 1.7 Supervisión de nivel de Rx fuera de rango debido al bloqueo.....	7
Fig. 1.8 Diagrama Unifilar Subestación Tecali de la Zona de Transmisión Puebla.....	8
Fig. 2.1 Modelo Equipo OPLAT ESB 2000 Y Teleprotección SWT 2000 F6.....	15
Fig. 2.2 Modelo Equipo OPLAT Power Link Y Teleprotección SWT 3000.....	16
Fig. 2.3 Arreglo normalizado de Teleprotección para línea en 400Kv > 40Km, con medio de comunicación Fibra Óptica y respaldo por OPLAT (PP1-85L y PP2-21/21N).....	20
Fig. 3.1 Modelo del circuito básico de una línea de transmisión.....	24
Fig. 3.2 Modelo del circuito básico de una línea de transmisión cuando se cierra el interruptor S_1 surgen ondas de voltaje y corriente.....	26
Fig. 3.3 Modelo de los elementos de parámetros distribuidos de una línea de transmisión.....	27
Fig. 3.4 Modelado de los elementos de parámetros concentrados de una sección corta de línea de transmisión con pérdidas. La longitud de la sección es Δz	28
Fig. 3.5 Modelado de la inductancia de una línea bifilar.....	34
Fig. 3.6 Interpretación física de las funciones de peso de Meyer y Dommel.....	37
Fig. 3.7 Funciones de peso $a_1(t)$ y $a_2(t)$ para la nueva formulación.....	38
Fig. 3.8 Interpretación física de la función de peso $a_1(t)$ para la nueva formulación.....	38
Fig. 3.9 Nuevos modelos de línea dependientes de la frecuencia en los nodos k y m	41
Fig. 4.1 Diagrama de Comunicaciones Subarea Puebla “Red OPLAT- Fibra Óptica de 230 y 400 KV’s”.....	42
Fig. 4.2 Diagrama de Comunicaciones Subestación Tecali “OPLAT- Fibra Óptica” sobre la L.T. TCL-A3U40-CZM.....	43
Fig. 4.3 Elementos que influyen en un enlace OPLAT.....	45



Fig. 4.4	Principales componentes de la Trampa de Onda.....	46
Fig. 4.5	Trampa de Onda con sintonía de banda alta.....	47
Fig. 4.6	Trampa de Onda con sintonía de banda específica.....	48
Fig. 4.7	Trampa de Onda con sintonía de banda ancha.....	48
Fig. 4.8	Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia de la Trampa de Onda Fase “B”.....	50
Fig. 4.9	Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia de la Trampa de Onda Fase “C”.....	50
Fig. 4.10	Gráficas de las Pruebas de respuesta en frecuencia, atenuación de Bloqueo y pérdida de inserción de la Trampa de Onda Fase “B”.....	51
Fig. 4.11	Gráficas de las Pruebas de respuesta en frecuencia, atenuación de Bloqueo y pérdida de inserción de la Trampa de Onda Fase “C”.....	52
Fig. 4.12	Principales componentes del Dispositivo de Potencial.....	53
Fig. 4.13	Circuito eléctrico del Dispositivo de Potencial.....	54
Fig. 4.14	Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial Fase “B”.....	56
Fig. 4.15	Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial Fase “C”.....	57
Fig. 4.16	Gráficas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial fase “B”.....	58
Fig. 4.17	Gráficas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial fase “C”.....	58
Fig. 4.18	Conexión cable de Alta Frecuencia dentro de una unidad AKE 100.....	59
Fig. 4.19	Características eléctricas cable de RF de 150 Ω	60
Fig. 4.20	Elementos de la unidad de acoplamiento.....	62
Fig. 4.21	Acoplamiento entre fases y fase a tierra de la L.T.....	63
Fig. 4.22	Diagrama de acoplamiento de fase a tierra de la L.T.....	64
Fig. 4.23	Conexión del AKE 100 A3 para acoplamiento fase-tierra.....	65
Fig. 4.24	Diagrama de acoplamiento entre fases de la L.T.....	65
Fig. 4.25	Conexión del AKE 100 A2 o A3 a A4 para acoplamiento fase a fase.....	66
Fig. 4.26	Conexión del AKE 100 A3 para acoplamiento fase a fase.....	66
Fig. 4.27	Acoplamiento Inter-sistemas.....	67
Fig. 4.28	Interfaz gráfica del programa de simulación ATP.....	69



Fig. 4.29 Ajustes generales de simulación del programa ATP.....	69
Fig. 4.30 Parámetros de simulación en ATP.....	70
Fig. 4.31 Integración de fuentes para la simulación del circuito.....	71
Fig. 4.32 Parámetros para la fuente de voltaje CA tipo 14.....	72
Fig. 4.33 Integración de elementos lineales en ATP.....	73
Fig. 4.34 Parámetros de ajuste de los elementos resistivos.....	73
Fig. 4.35 Parámetros de ajuste del modelo J. Marti de la L.T.....	74
Fig. 4.36 Disposición geométrica y datos de los conductores para simulación del modelo J. Marti de la L.T.....	75
Fig. 4.37 Procedimiento para iniciar la simulación en ATP.....	76
Fig. 4.38 Avance de la simulación en ATP.....	77
Fig. 4.39 Selección para graficar resultados en ATP.....	78
Fig. 4.40 Diagrama unifilar SEP cortesía de CENALTE.....	80
Fig. 4.41 Flujo de potencia L.T. TCL -A3U40- CZM del día 25 de Enero de 2017 a las 18:00 horas en demanda máxima.....	80
Fig. 4.42 Flujo de potencia L.T. TCL -A3U40- CZM del día 25 de Enero de 2017 a las 16:00 horas en demanda mínima.....	81
Fig. 4.43 Flujo de potencia L.T. CZM -A3U40- TCL del día 25 de Enero de 2017 a las 18:00 horas en demanda máxima.....	81
Fig. 4.44 Flujo de potencia L.T. CZM -A3U40- TCL del día 25 de Enero de 2017 a las 16:00 horas en demanda mínima.....	82
Fig. 4.45 Diagrama unifilar SEP con generación en LAV de 1600 MW cortesía de CENALTE.....	82
Fig. 4.46 Comportamiento del flujo de potencia durante la semana del 15 al 21 de enero del 2017 L.T. TCL-A3U40-CZM.....	83
Fig. 4.47 Se proporcionan los datos reales para realizar la simulación.....	84
Fig. 4.48 Se proporcionan los datos reales de la disposición geométrica.....	84
Fig. 4.49 Simulación del circuito sin trampas de onda.....	85
Fig. 4.50 Gráfica de la Simulación del circuito sin trampas de onda.....	86
Fig. 4.51 Gráfica de simulación de sobretensiones por maniobra de la energización de un interruptor.....	86
Fig. 4.52 Simulación del circuito con trampas de onda.....	87



Fig. 4.53	Gráfica de la Simulación del circuito con trampas de onda.....	87
Fig. 4.54	Gráfica de la simulación de sobretensiones por maniobra en la energización de un interruptor.....	88
Fig. 4.55	Simulación del circuito con trampas de onda.....	89
Fig. 4.56	Gráfica de la Simulación del circuito con trampas de onda y dispositivo de potencia.....	89
Fig. 4.57	Gráfica de sobretensiones de la simulación por maniobra en la energización de un interruptor.....	90
Fig. 4.58	Simulación del circuito sin trampas de onda.....	91
Fig. 4.59	Gráfica de la Simulación del circuito sin trampas de onda.....	91
Fig. 4.60	Gráfica de la simulación de sobretensiones por descarga atmosférica.....	92
Fig. 4.61	Simulación del circuito con trampas de onda.....	92
Fig. 4.62	Gráfica de la Simulación del circuito con trampas de onda.....	93
Fig. 4.63	Gráfica de la simulación de sobretensiones por descarga atmosférica.....	93
Fig. 4.64	Simulación del circuito con trampas de onda.....	94
Fig. 4.65	Gráfica de sobretensión que alcanza a inducir el 50% de la tensión en las fases B y C.	94
Fig. 4.66	Gráfica de la simulación de sobretensiones por descarga atmosférica.....	95
Fig. 4.67	Prolongación de tiempo de las sobretensiones por descarga atmosférica.....	95



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tiempos de operación de las Protecciones por contacto seco.....	18
Tabla 1.2 Especificaciones para pruebas tecnológicas.....	19
Tabla 1.3 Comparación de los tipos de acoplamientos.....	67



ACRÓNIMOS

RNTE	Red Nacional de Transmisión de Energía
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SE	Subestación
OPLAT	Onda Portadora por Línea de Alta Tensión
AKE´s	Filtros de Acoplamiento
TO	Trampas de Onda
DPC	Dispositivos de Potencial Capacitivo
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
PW LINK	Power Link
CONORCFE	Comité de Normalización de CFE
FO	Fibra Óptica
UHF	Frecuencia ultra alta (<i>Ultra High Frequency</i>)
FSK	Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (<i>Frequency Shift Keying</i>)
DTD	Disparo transferido directo.
DTL	Disparo trasferido de línea
E1	Trama digital de 30 + 2 canales (2.048 kbps)
EDT	Equipo digital de Teleprotección
CH	Canal de comunicación
POTT	Esquema de disparo transferido permisivo por sobre alcance.
PUTT	Esquema de disparo transferido permisivo por bajo alcance.
OPGW	Cable de guarda con fibra óptica
RCD	Radiocomunicación digital.
TP	Equipo de Teleprotección de tonos
MUX	Equipo multiplexor
ETO	Equipo terminal óptico
PDH	Jerarquía Digital Plesiocrona (<i>Pleiosynchronocity Digital Hierarchy</i>)



SDH	Jerarquía Digital Síncrona (<i>Synchronocity Digital Hierarchy</i>)
RF	Radio Frecuencia
ZTP	Zona de Transmisión Puebla
GCRORI	Gerencia de Control Regional Oriental
ETP/Draw	Programa para Transitorios Electromagnéticos
CENALTE	Centro Nacional Alterno
EMC	Compatibilidad Electromagnética
CCITT	Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico
CZM	Cruz Azul Maniobras
TCL	Tecali

SIMBOLOGIA

ψ - Flujo Eléctrico.

B - Densidad de Flujo Eléctrico.

r - Radio del conductor.

μ_0 - Permeabilidad del vacío.

I - Corriente a través del conductor.

L - Inductancia del circuito par abierto.

C - Capacitancia del circuito par abierto.

R_1 - Resistencia.

$Z_{eq}(\omega)$ - Impedancia característica de la Línea dominio de la frecuencia.

$a_1(t)$ y $a_2(t)$ - Nuevas funciones de peso dominio del tiempo.

$F_m(\omega)$, $B_k(\omega)$, $F_k(\omega)$, $B_m(\omega)$ - Funciones para las ondas viajeras hacia adelante y atrás.

τ - Tiempo de retardo.

Δ_t - Paso de Integración

$e_k(t)$ y $B_m(t)$ - Voltajes a través dela red



Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia modernos han sido el resultado de más de 100 años de desarrollo el cual envuelve aspectos técnicos y económicos. La transmisión de grandes cantidades de potencia a grandes distancias juega un papel muy importante en este avance [1], [2].

El concepto moderno de Red Eléctrica tiene sus fundamentos en las invenciones del Ingeniero mecánico-eléctrico y físico *Nikola Tesla* que constituyen lo que hoy conocemos como generación, transmisión y distribución [14].

A principios del siglo pasado se construyó el primer sistema de transmisión de energía, de aproximadamente 100 kV, la tensión de transmisión ha aumentado considerablemente. Para 1965 entra en servicio el sistema canadiense de 735 kV, y en la actualidad varios países, entre ellos Estados Unidos, Brasil y Venezuela en el continente Americano, cuentan con sistemas de transmisión de energía de corriente alterna de 800 kV, aunque en muchas partes del mundo ya existen sistemas de transmisión de 1200 kV [1]. En México, los niveles de tensión utilizados en la red de transmisión son de 400, 230 y 115 kV. Al finalizar marzo del año 2008, esta red alcanzó una longitud de 48, 635 km [3].

La tendencia de utilizar tensiones de transmisión cada vez mayores radica en las considerables ventajas que se obtienen al transportar energía eléctrica a grandes distancias, ya que se logra minimizar las pérdidas y maximizar la potencia transportada [5].

Aumentar el nivel de tensión de transmisión conlleva a una disminución de la intensidad de corriente que circula por la línea para transportar la misma potencia. Por lo tanto, las pérdidas por calentamiento de los conductores y por efectos electromagnéticos también se reducen. Además, una mayor corriente requiere de conductores de mayor sección transversal, y en consecuencia, con un mayor peso por unidad de longitud. Al utilizar niveles de alta tensión, se pueden utilizar conductores de menor diámetro, y de esta manera reducir el costo de transmisión [5].

Debido al crecimiento en la infraestructura de la Red Nacional de Transmisión de Energía eléctrica los SEP se deben diseñar para soportar los esfuerzos más severos a que son sometidos durante su operación. Estos esfuerzos generalmente se originan durante la ocurrencia de fenómenos transitorios en el SEP.



Los transitorios en los SEP se pueden clasificar en dos categorías:

- I. Transitorios con una interacción entre la energía magnética almacenada en los inductores y la energía eléctrica almacenada en los capacitores.
- II. Transitorios con una interacción entre la energía mecánica almacenada en las máquinas rotatorias y la energía eléctrica almacenada en el sistema eléctrico [12].

La primera categoría comprende transitorios puramente eléctricos denominados transitorios electromagnéticos. Se requiere realizar estudios especializados que impactan directamente a la seguridad del SEP. Derivado de esto la importancia del análisis de las perturbaciones causadas por los diversos factores de acuerdo a su origen externo o interno para mantener la estabilidad dinámica del SEP [4].

Un Transitorio Electromagnético se define como un cambio repentino en la distribución de energía electromagnética de un sistema. Dichos fenómenos, muchas veces no son analizados ni tomados en cuenta, debido a que son difíciles de identificar [4,5].

Estos fenómenos son importantes debido a la creciente demanda, le acompaña el incremento de los niveles de tensión en los sistemas de transmisión, el incremento del nivel de cortocircuito, y el incremento de las capacidades de transformación de los transformadores de Potencia. Los transitorios electromagnéticos son causados principalmente por cambios en las condiciones de la red como puede ser apertura o cierre de interruptores para librar líneas de transmisión, fallas en equipos y descargas atmosféricas.



Capítulo 1 Protocolo de Investigación

1.1 Planteamiento del problema

Debido a que en la actualidad se tiene un incremento en la cargabilidad de las líneas de transmisión y como consecuencia niveles de tensión cada vez mayores en las líneas, se requiere de equipos sofisticados para tener mayor confiabilidad del SEP, como consecuencia de la creciente expansión del mismo, esto implica la modernización de equipos de comunicación OPLAT Power Link en la Zona de Transmisión Puebla para satisfacer las necesidades específicas del SEP. Hasta el momento en la S.E. TECALI se cuenta con 7 líneas de transmisión de 400 KV, 3 líneas de transmisión de 230 KV, 10 líneas de transmisión de 115 KV, 2 bancos de transformación con capacidades de: banco #1 de 375 MVA, banco #2 de 225 MVA, 4 bancos de capacitores y 2 reactores. En este año se tiene la puesta en servicio de un 3er. banco de transformación.

Específicamente se hace mención de la línea TCL-A3U40-CZM, de esta línea se desprende el estudio a realizar; la cual tiene una cargabilidad de 438 MWh debido que la fuente es la SE. CZM y cuenta con sistemas de comunicación para brindar servicios de TELEPROTECCIÓN mediante el equipo de Onda Portadora Power Link y Fibra Óptica. El estudio se enfoca especialmente en el equipo Power Link debido a que el día 03 de junio del año 2015 reporta el operador del GRCORI, que tiene presente una alarma en su gestor de equipo de comunicaciones OPLAT Power Link de L.T. TCL-A3U40-CZM por lo cual se acude al sitio para supervisar el estado del equipo, al llegar a la SE. TCL nos percatamos que el equipo se encuentra bloqueado Fig. 1.1. Por lo cual se procede a realizar la conexión local al equipo para supervisar el historial de alarmas presentes, se verifican los eventos ocurridos Fig. 1.2, niveles de Tx, Rx así como corroborar si presenta un cambio en su configuración, se accede al equipo y se realiza la comparación de la última configuración del equipo con fecha del 15 de Diciembre del 2013 Fig. 1.3, como a continuación se describe:

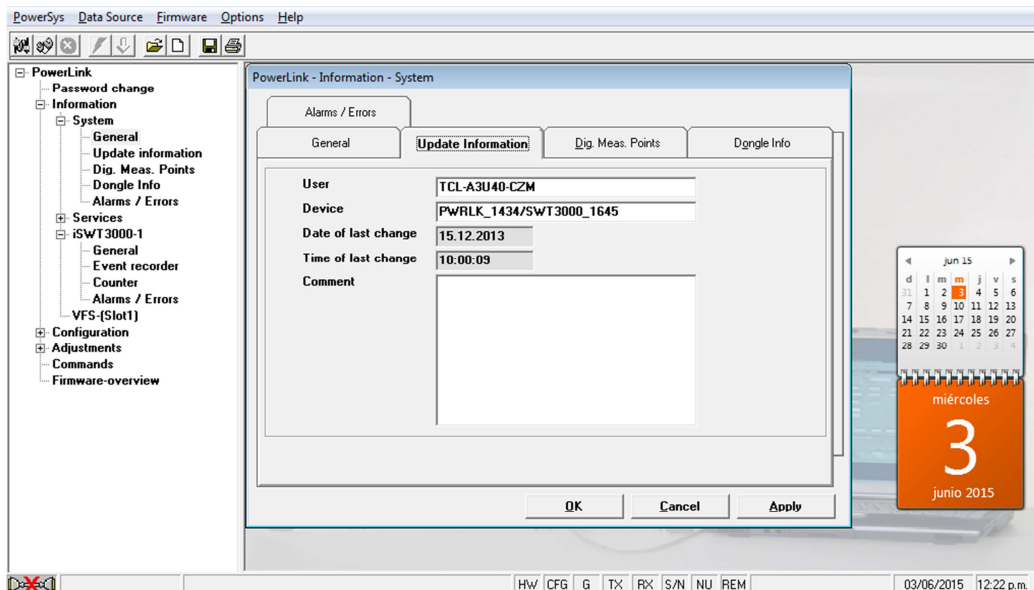


Fig. 1.3 Último respaldo de configuración de Equipo.

La correcta configuración del servicio de voz, con los niveles deseados así como la selección de la tarjeta con su respectivo puerto, se muestra en la Fig. 1.4.

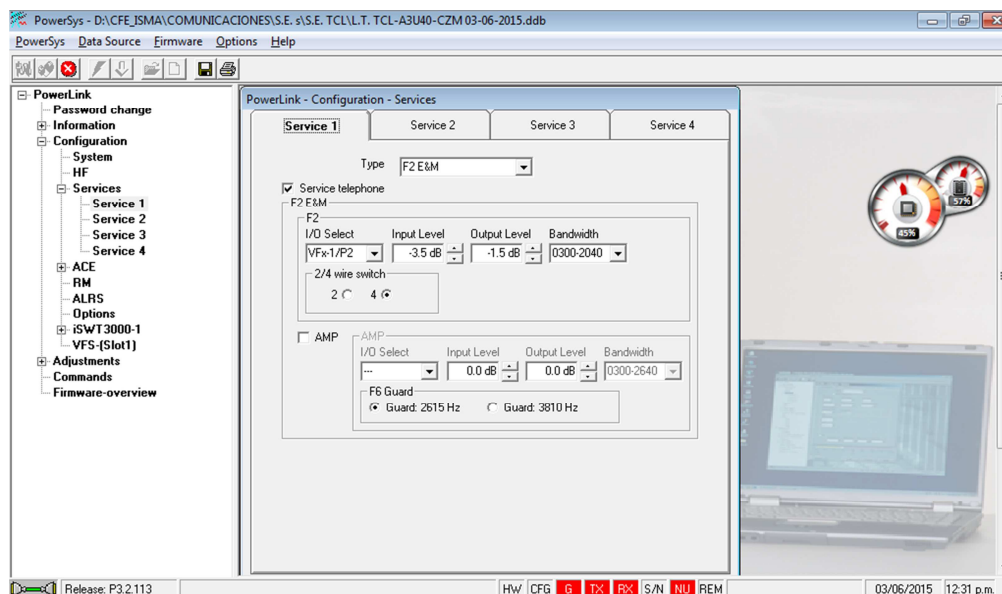


Fig. 1.4 Supervisión de la configuración de servicio de voz normal.

De la misma forma se realiza el procedimiento para el servicio de Teleprotección que se muestra en la Fig. 1.5.

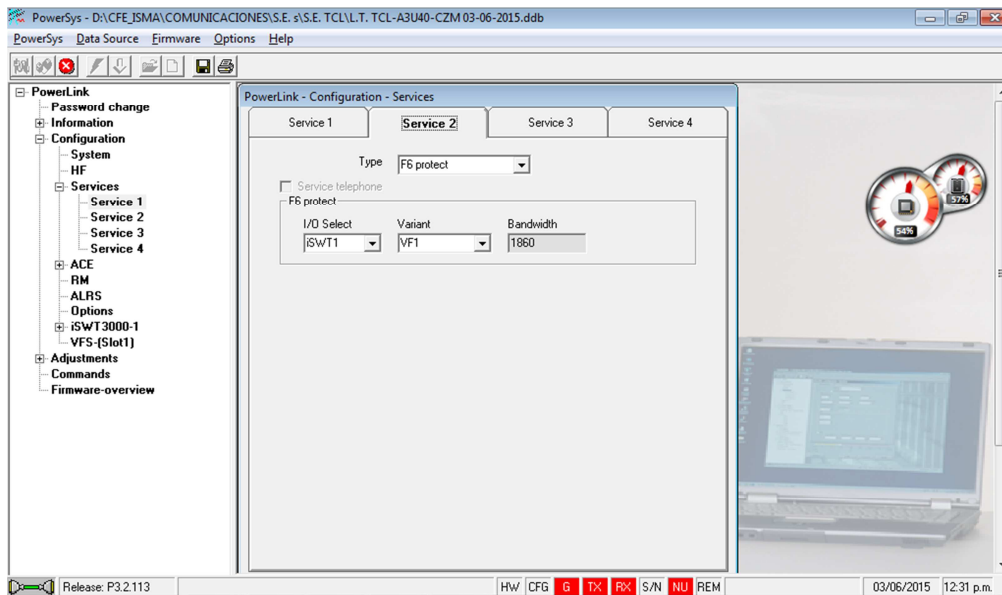


Fig. 1.5 Supervisión de la configuración del servicio de Teleprotección normal.

La Fig. 1.6 muestra el modo de operación del equipo de Teleprotección SWT 3000 (SWT es el modelo de la Teleprotección) y su tarjeta de conexión vía fibra Óptica.

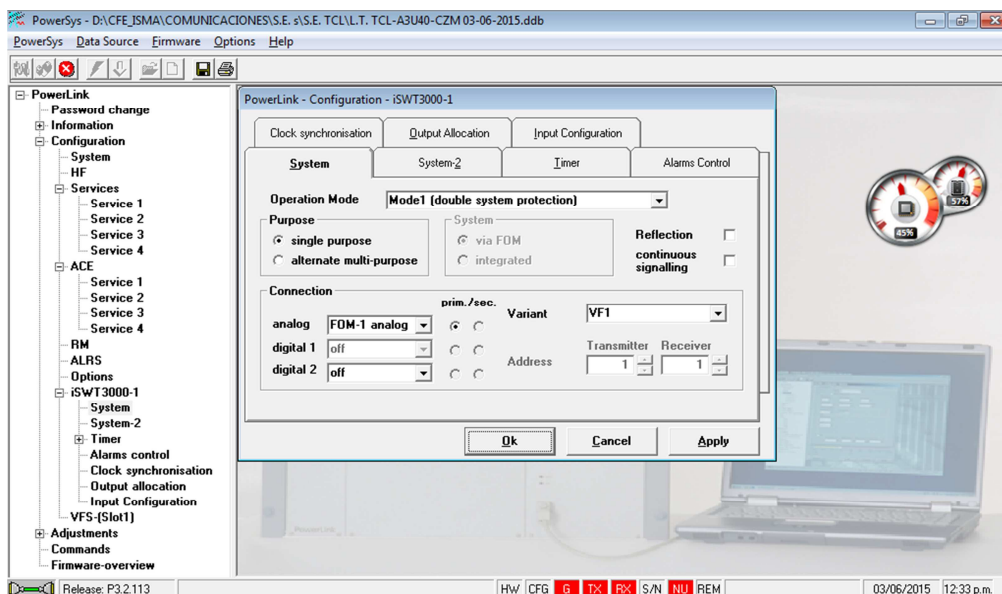


Fig. 1.6 Supervisión de la configuración del equipo de Teleprotección normal.

El nivel de recepción fuera de rango se muestra en la Fig. 1.7 donde se presenta la alarma de Rx.

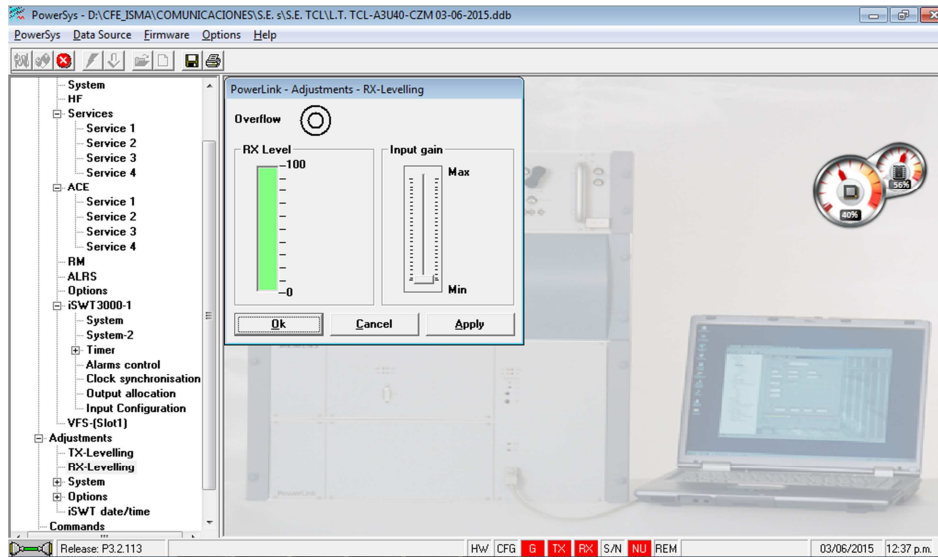


Fig. 1.7 Supervisión de nivel Rx fuera de rango debido al bloqueo.

Se recurre al personal de la SE. TCL, informan que las alarmas son constantes al energizar las líneas de transmisión adyacentes a la línea en cuestión, cuando los interruptores de la línea realizan funciones propias de recierre, al insertar el banco de capacitores de la línea TCL-A3540-TMT o factores externos como descargas atmosféricas que derivan la presencia de sobretensiones transitorias inducidos por estas condiciones; dichas sobretensiones son de gran magnitud que ocasionan daños en los equipos y el bloqueo de las Teleprotecciones.

Para mitigar este efecto, las líneas de comunicación deben instalarse a distancias seguras de la línea de potencia, razón por la cual es necesario estimar los niveles de radio-interferencia a diferentes distancias de ella, debido a la magnitud que adquieren los voltajes y corrientes sobre el equipo, mediante simulaciones que tomen las características de la línea y proporcionen resultados relevantes para determinar las causas precisas y tomar acciones remediales. En la Fig. 1.8 se presenta el diagrama unifilar de la SE. Tecali cortesía de la Zona de Transmisión Puebla.

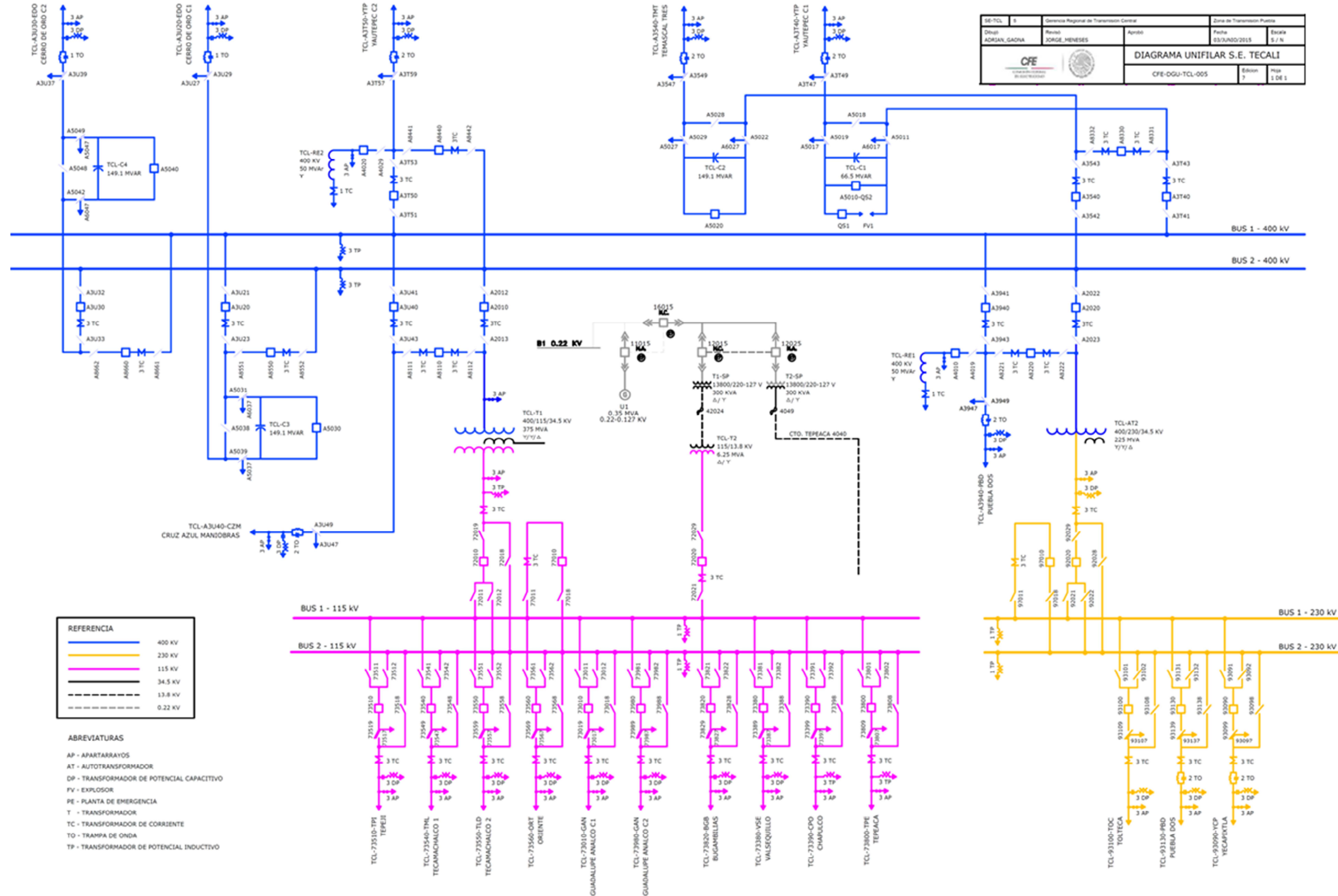


Fig. 1.8 Diagrama Unifilar Subestación Tecali de la Zona de Transmisión Puebla.



1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Particulares

- Analizar los transitorios electromagnéticos sobre el impacto que tienen en los equipos OPLAT Power Link.
- Proponer un circuito equivalente del sistema para realizar la simulación pertinente de los transitorios electromagnéticos.

1.2.2 Objetivo General

- Realizar simulaciones de transitorios electromagnéticos a través del programa de simulación ATP/Draw para analizar el comportamiento de las sobretensiones que se presentan en la L.T. TCL-A3U40-CZM.

1.3 Justificación

El estudio se basa en analizar las sobretensiones transitorias ya que presentan oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia, que generan campos de radio-interferencia en la vecindad de la línea, si la frecuencia de la emisión electromagnética debida al transitorio coincide con la frecuencia de alguna señal de comunicación cercana a la línea, esta última puede ser distorsionada. Al analizar minuciosamente los eventos presentados en los equipos de comunicación OPLAT Power Link referente a las sobretensiones transitorias que impactan en su desempeño para cumplir satisfactoriamente con los factores antes mencionados, una vez que se presentan sobretensiones transitorias, el equipo OPLAT Power Link indica alarmas de sobre flujo, posterior a estas condiciones se pierde el enlace, estas alarmas suceden cuando se energiza la línea, una vez que los interruptores realizan las operaciones propias de recierre o por descargas atmosféricas, esto por consiguiente produce que la L.T. quede “**sin protección de respaldo**”, sin protección alguna por consecuencia de la pérdida del enlace de comunicación, de modo que es útil proponer la simulación del equivalente de la línea en cuestión para analizar el impacto que esos fenómenos pueden producir sobre los equipos de comunicaciones y así proporcionar confiabilidad en el servicio de Teleprotección de las líneas de transmisión mediante el correcto funcionamiento de los equipos Power Link; sin duda que es de gran importancia su estudio para que en el futuro se tomen en cuenta estas consideraciones y puedan corregir de forma rápida las posibles anomalías que presentan los equipos y se liberen las fallas de forma correcta.



1.3 Estado del arte

Algunos de los trabajos más recientes han sido presentados por Zajc, Suljanovic, Mujcic y Tasic, quienes en 2004 publicaron los resultados de mediciones de ruido debido a corona en una línea de 400 kV, la cual también se utiliza para transmitir señales de comunicación por medio de PLC (Power Line Communication). Para realizar sus mediciones utilizaron unidades LTU (Line Trap Unit), circuitos de acoplamiento y analizadores de espectros [4]. Un año después, en 2005, los mismos autores desarrollaron un algoritmo para el cálculo de ruido por corona en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. En el dominio de la frecuencia, el ruido por corona es representado por una densidad espectral de potencia, mientras que en el dominio del tiempo se hace a través de un ruido gaussiano de voltaje [4]. Finalmente en 2007, publicaron los resultados de mediciones en un rango bajo de frecuencias sobre una línea de alta tensión bajo diferentes condiciones ambientales. El conocimiento de las características de frecuencia es utilizado para el correcto diseño de sistemas PLC.

Otro de los trabajos relacionados con las emisiones electromagnéticas de líneas de transmisión fue el realizado por Rangel y Linares, quienes en 2007 propusieron un método para cuantificar las emisiones de campo radiadas por líneas de transmisión cuando se utilizan como medio de comunicación con tecnología BPL (Broadband Power Line). En ese mismo año, Ramírez y Figueroa realizaron mediciones de tensión inducida y campo eléctrico de 60 Hz bajo líneas de transmisión de 115 y 230 kV, utilizando sondas capacitivas a diferentes alturas sobre el terreno [12].

1.5 Limitaciones y alcance del trabajo

Limitaciones:

El estudio se centra en la línea TCL-A3U40-CZM por lo cual para el análisis en trabajos posteriores se proponen realizar estos en L.T. de diferentes características.

Alcances:

Se propone la aportación del estudio en particular para ampliar el panorama sobre el impacto de los fenómenos a los cuales están sometidas las L.T. del SEP.



1.6 Aportaciones de la tesis

Como aportaciones notables del trabajo presentado se pueden citar los siguientes:

Presentar un circuito equivalente para el análisis de sobretensiones transitorias en una línea de alta tensión incluyendo el equipo Power Link.

Analizar y describir las sobretensiones que se presentan a lo largo de la línea y sus efectos en el equipo de comunicaciones Power Link.

1.7 Estructura del trabajo de tesis

Capítulo 1 Protocolo de investigación

Se propone el planteamiento del problema, los objetivos, justificación, alcance y aportaciones.

Capítulo 2 Marco de referencia

Presentación de las generalidades, antecedentes, relevancia de los equipos Oplat, modelos para análisis de las líneas de transmisión.

Capítulo 3 Modelado de líneas de transmisión

Estudio de las líneas de transmisión, desarrollo de las ecuaciones del telegrafista, ecuaciones diferenciales en la línea, parámetros de las líneas, modelo de J. Marti.

Capítulo 4 Análisis de las sobretensiones transitorias sobre los equipos Power link

Se indican los elementos de un enlace Oplat mediante el equipo primario, simulaciones en ATP y cálculo de los parámetros de la impedancia del sistema.

Conclusiones

Una vez desarrolladas las simulaciones se proporcionan los resultados obtenidos y se enuncian las particularidades de los mismos.



Capítulo 2 Marco de Referencia

2.1 Generalidades

Los fenómenos electromagnéticos aparecen al ocurrir una transición de un estado estable a otro. Los transitorios electromagnéticos tienen una duración de tiempo muy breve, la fracción de tiempo de operación del SEP en condiciones transitorias es insignificante comparada con su tiempo de operación en estado estable, el tiempo transitorio que puede ser de micro a milisegundos es extremadamente perjudicial para el SEP [4,5].

Las causas fundamentales de estos disturbios en un SEP son:

- 1.- Maniobras de interruptores u otros equipos de switcheo.
- 2.- Descargas atmosféricas.
- 3.- Ocurrencia o liberación de fallas en Líneas de Transmisión.

Los fenómenos electromagnéticos consecuentes son ondas viajeras en las líneas y oscilaciones entre inductores y capacitores del SEP. La severidad de las oscilaciones está determinada por las impedancias características y los tiempos de viaje de las líneas interconectadas.

Estos fenómenos se pueden clasificar de acuerdo a su origen:

- Internos, debidos a maniobras en interruptores y fallas en los equipos.
- Externos, debidos a descargas atmosféricas.

Se sabe que las sobretensiones de origen interno dependen del voltaje del sistema.

Para sistemas de alto voltaje las sobretensiones de origen interno son las de mayor importancia.

Sobretensiones por maniobra de interruptores son causadas por la energización de equipo, rechazo de carga, liberación de fallas, etc. La probabilidad de ocurrencia de los transitorios depende del número de fallas en el SEP y las



operaciones de maniobra en el mismo. Este tipo de sobretensiones se reduce por medio de compensación inductiva en paralelo y resistencias de pre-inserción.

Sobretensiones temporales debido a la forma, frecuencia y diversas maneras de inicio de las sobretensiones ofrecen varias posibilidades para su clasificación. De acuerdo a su frecuencia de oscilación se pueden clasificar en tres grupos [4]:

1. Sobretensiones debidas a armónicas pares ó impares (2^a , 3^a , 5^a , etc.) de la frecuencia de 60 Hz. Esta sobretensión es una superposición de las armónicas y la fundamental. En mayor parte causadas por elementos no lineales en el SEP, como transformadores, reactores, inversores de CA y CD, sistemas de control, dispositivos electrónicos, etc.
2. Sobretensiones con frecuencias de oscilación menores a la frecuencia fundamental. Estas sobretensiones no aparecen como sobretensiones línea a tierra sino a través de capacitores serie. El problema radica en la corriente subarmónica. El rango de frecuencias en el cual aparece este tipo de fenómeno es de 5 ó 15 ciclos.

Por otro lado las sobretensiones de origen externo son causadas por descargas atmosféricas son la causa principal de interrupciones de energía eléctrica. Existen 3 mecanismos de flameo del sistema aislante del SEP por descargas atmosféricas.

1. Mecanismo de inducción este fenómeno se presenta cuando un rayo incide cerca de una línea de transmisión pero sin estar en contacto con ninguna parte de ella e induce una sobretensión en el conductor. Sobretensión por descarga tipo indirecta.
2. Mecanismo de falla de protección, este fenómeno ocurre cuando existe una descarga atmosférica que incide directamente en la línea de transmisión en cualquiera de los conductores de fase. En la práctica para evitar este tipo de fenómenos se colocan hilos de guarda arriba de los conductores de fase, con lo cual se intercepta la descarga atmosférica y se conduce a tierra.
3. Mecanismo de flameo de regreso este fenómeno ocurre por una descarga atmosférica que incide en la torre o en el conductor de guarda. Para drenar la descarga atmosférica a tierra es necesario que la resistividad del suelo al pie de la torre sea adecuada. Al ocurrir este fenómeno la onda viaja del punto de contacto a tierra de acuerdo a las características de propagación que presenta el medio conductor [13].



Para proveer un servicio de Energía Eléctrica confiable se requiere un nivel de aislamiento idóneo de las líneas de transmisión y equipos conectados tal que puedan soportar el estrés generado por las Sobretensiones.

Estas se comportan como ondas viajeras y sus oscilaciones dependen de la interacción de energía entre los elementos inductivos y capacitivos, de modo que su amplitud y forma de onda están sujetas a una atenuación y distorsión que depende de las características propias de la línea de transmisión y su configuración geométrica. La principal fuente de distorsión es el proceso continuo de reflexión de energía que resulta de las pérdidas resistivas en serie [7].

2.2 Antecedentes

2.2.1 Importancia de los equipos OPLAT Power Link

La Red Nacional de Transmisión de Energía (RNTE) tan mallada y en constante crecimiento desde la generación en lugares lejanos hasta los centros de consumo, tales como ciudades y zonas industriales, requiere integrar redes inteligentes con equipos de telecomunicaciones sofisticados para brindar servicio de voz y todo tipo de datos como: Teleprotección, Telecontrol y Telemetría, estos equipos deben estar disponibles para cualquier eventualidad que pueda llegar a presentarse de tal forma que desde los centros de control hasta las plantas de generación o centros de consumo se pueda monitorear y enviar órdenes a la red para mantener su Continuidad, Confiabilidad y Seguridad por ende su Estabilidad [8].

De forma que para satisfacer las necesidades de comunicación, la industria energética cuenta con una amplia variedad de sistemas implementados, dependiendo del ancho de banda requerido y medio de transmisión como puede ser Fibra Óptica, Microondas, Onda Portadora por Línea de Alta Tensión (OPLAT), etc.; este último para nuestro propósito en el caso de estudio posterior debido que la industria energética es la única que cuenta con un medio físico confiable como son las líneas de transmisión que interconectan las plantas generadoras, centros de consumo y control para transmitir señales por medio de una Onda Portadora de Alta Frecuencia [8].

Hasta junio de 1992 en la RNTE se contaba con 1366 equipos OPLAT distribuidos en todo el país, incorporados en los procesos de producción, transmisión y distribución, así como centrales de conmutación para el manejo de señales de voz y datos, en conjunto con equipos de Teleprotección para los diversos esquemas

de Protección, Filtros de Acoplamiento (AKE's), Trampas de Onda (T.O.) y Dispositivos de Potencial (D.P.) [8].

Las funciones fundamentales que cumplen estas redes son por el orden de importancia:

- Transmisión de señales de Teleprotección (seguridad del SEP).
- Supervisión y Coordinación de la operación del SEP, mediante la información de estados y medición de parámetros del flujo de energía por medio de la transmisión de voz y datos [8].

Los equipos OPLAT desde sus inicios en la implementación de los modelos ESB 400, ESB 500, ESB 2000, ESB 2000i hasta el presente a evolucionado drásticamente con el constante avance tecnológico hoy en día se han incorporado equipos OPLAT Power Link (PW LINK). Como se puede apreciar en las Figuras 2.1 y 2.2:

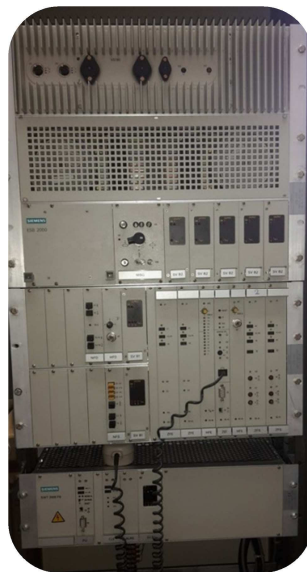


Fig. 2.1 Modelo Equipo OPLAT ESB 2000 Y Teleprotección SWT 2000 F6.



Fig. 2.2 Modelo Equipo OPLAT Power Link Y Teleprotección SWT 3000.

Por la norma de referencia NRF-041-CFE-2005 que hace mención a los esquemas Normalizados de protecciones para líneas de Transmisión, Subtransmisión y Distribución de acuerdo a las Reglas de Operación del Comité de Normalización de CFE (CONORCFE), que operan en intervalos de tensión desde 2.4 Kv hasta 400 Kv y que en sus definiciones aplica en la sección [10]:

- **4.2 Canal Digital** - Medio para la Transmisión de Señales Digitales. El canal puede ser Fibra Óptica, OPLAT, Microondas o Radios UHF.
- **4.3 Canal Multiplexado** - Medio de Comunicación que utiliza un Multiplexor para la transmisión y recepción de Señales Digitales (Equipo: FOX-515).
- **4.4 Canal Tipo FSK** - Comunicación OPLAT, a través del cual se dan comandos mediante conmutación de la frecuencia transmitida de la posición de guarda a la posición de disparo.
- **4.8 Líneas de Distribución** - Que operan en intervalos de tensión desde 2,4 kV y hasta 34,5 kV.
- **4.9 Líneas de Subtransmisión** - Que operan en intervalos de tensión desde 69 kV y hasta 161 kV.



- **4.10 Líneas de Transmisión** - Que operan en intervalos de Tensión desde 230 Kv hasta 400 Kv y mayores.
- **4.11 Medio de Comunicación** – Conjunto de equipos utilizados por los relevadores para conformar los esquemas de protección y con esto realizar su función. A través de este medio, el esquema de protección envía y recibe señales digitales o señales a través de contacto seco, de acuerdo con el tipo de relevador.
- **4.12 Multiplexor** – Equipo de comunicación utilizado para hacer más eficiente la explotación de un canal digital. Cuenta con una capacidad de transmisión y recepción de señales digitales a altas velocidades. Proporciona canales digitales de menor velocidad que son combinados dentro de un solo canal de alta velocidad.
- **4.17 Sistemas de Comunicación** – Son aquellos requeridos por los esquemas de protección para realizar las funciones de Teleprotección.
“Teleprotección – Protección a Distancia”
 - **4.17.1 Sistema OPLAT** - Onda Portadora tipo FSK capaz de transmitir señales de contacto, voz y datos. Estos sistemas se utilizan en los sistemas de protección como medios para la transmisión y recepción de permisos y disparos transferidos.
 - **4.17.2 Sistema Óptico** – Aquel que cuenta con fibras ópticas para el enlace de dos subestaciones y en los equipos de protección deben conectarse con dos opciones: directamente a la fibra o por medio de un canal de comunicación multiplexado [10].



5 CARACTERÍSTICAS Y CONSIDERACIONES GENERALES

5.1 Esquemas normalizados

Para establecer los esquemas normalizados para protecciones de líneas de transmisión y Subtransmisión con tensión de operación de 69 Kv y mayores, se han considerado los siguientes casos:

- Línea larga > 40 Km
- 15 Km < Línea media ≤ 40 km
- Línea corta ≤ 15 km

Todos los esquemas normalizados deben contar con lo siguiente:

- PP1** protección primaria 1 (Líneas de Transmisión)
- PP2** protección primaria 2 (Líneas de Transmisión)
- PR** protección de respaldo (Líneas de Transmisión)
- 50FI** protección contra falla de interruptor (Líneas de Transmisión)

[7]

5.2 Tiempo de operación

Los esquemas de protección deben contar con un tiempo de operación por contacto seco de conformidad con lo establecido con la tabla 1.1 Los tiempos de operación de disparo para la publicación de mensajes GOOSE se definen en la normatividad vigente por CFE.

Tabla 1.1 Tiempos de operación de las Protecciones por contacto seco.

TENSIÓN	PROTECCIÓN	TIEMPO DE OPERACIÓN POR CONTACTO
400 kV	PP1	< 20 ms
400 kV	PP2	< 25 ms
230 kV	PP1 y PP2	< 25 ms



La tabla 1.2 muestra las especificaciones normalizadas para equipos y aprobadas por la CONORCFE.

Tabla 1.2 Especificaciones para pruebas tecnológicas [10].

PRUEBA		NIVEL DE SEVERIDAD REQUERIDO
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA	1	Onda oscilatoria amortiguada $1 \text{ MHz} < f < 1.5 \text{ MHz}$ $2.5 \text{ Kv} < \text{Kv} < 3 \text{ Kv}$ de cresta del primer ciclo
	2	Transitorios rápidos $\pm 4 \text{ Kv}$ a $\pm 5 \text{ Kv}$ 5 / 50ns
	3	Inmunidad a campos electromagnéticos radiados 10 V/m; 80 MHz a 1000MHz AM 80%, 400Hz
	4	Interrupciones y caídas de tensión Interrupciones 95% / 5 s Caídas 30% / 10 ms, 60% / 100ms
	5	Descargas electrostáticas Nivel 4 $\pm 8 \text{ Kv}$ contacto, $\pm 15 \text{ Kv}$ aire
AISLAMIENTO	6	Tensión de impulso 5 Kv (valor cresta) 1.2/50 μs tres impulsos positivos y tres impulsos negativos

Arreglo normalizado para el esquema de protección así como su medio de comunicación, Fig. 2.3.

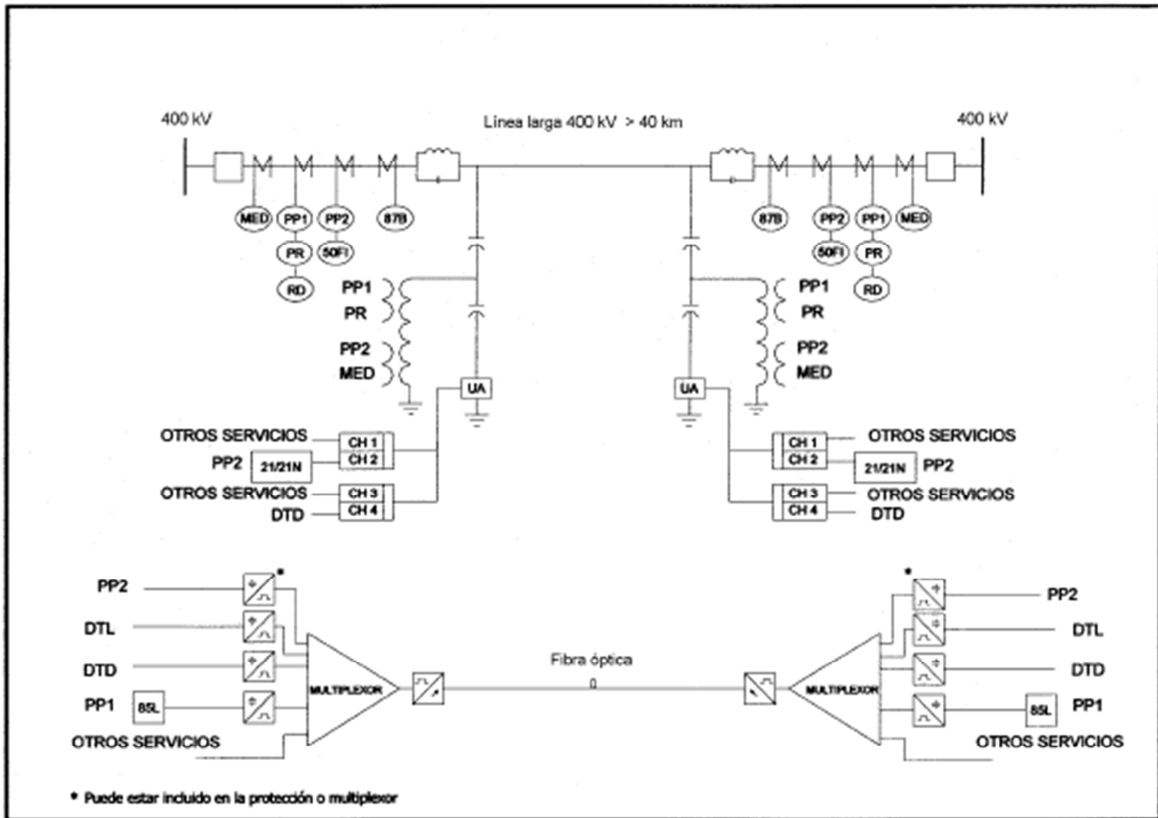


Fig. 2.3 Arreglo normalizado de Teleprotección para línea en 400Kv > 40Km, con medio de comunicación Fibra Óptica y respaldo por OPLAT (PP1-85L y PP2-21/21N). [10]

Para el caso de servicio de Protección se implementa la incorporación del equipo OPLAT Power Link acompañado de su respectiva “Teleprotección” SWT 3000, estos equipos proporcionan la comunicación entre los relevadores multipropósito localizados en las Subestaciones Eléctricas para brindar seguridad en la operación contra fallas localizadas en las líneas de transmisión.

El análisis de los Transitorios Electromagnéticos que afectan el buen desempeño de los equipos Power Link, un caso extremo puede ser el daño del mismo; no se le ha brindado una atención especializada y que impacte en la seguridad del SEP que se pudiera presentar, esto nos direcciona al estudio de los severos Transitorios que para su análisis se cuenta con simuladores que proporcionan resultados muy específicos. Estos simuladores se enuncian a continuación:



- Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP).
- Programa de Transitorios Electromagnéticos mediante un procesador gráfico dirigido por el ratón a la versión ATP (ATP/DRAW).
- Diseño Asistido por Computador de Sistemas de Potencia (PSCAD)
- Diseño asistido de ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia comerciales, industriales y a gran escala (DIGSILENT)

2.3 Líneas de transmisión

Es a través de las líneas de transmisión que la energía se transmite desde los centros de generación a los centros de consumo, actualmente los modelos que representan su comportamiento se adecuan dependiendo de los fenómenos que se quieran analizar.

Dependiendo de su diseño las líneas pueden ser:

- Aéreas
- Subterráneas

Una línea de Transmisión tiene 4 parámetros eléctricos fundamentales que afectan su capacidad para cumplir su función:

- Resistencia
 - Inductancia serie
- } Impedancia Serie
- Capacitancia
 - Admitancia Paralelo
- } Conductancia



Y tanto por el número, como por la extensión territorial que ocupan, constituyen los elementos del SEP que están sujetos a mayor riesgo de falla, aún cuando se conoce de forma práctica el comportamiento de las Líneas de Transmisión, ya sea por medio de curvas de cargabilidad o por experiencia operativa; la gran diversidad de condiciones del SEP exige la obtención de modelos que lo representen adecuadamente y que además permitan obtener resultados de simulación confiables. Se utiliza una notación matricial para representar, inicialmente en forma independiente, los efectos inductivos y capacitivos. Posteriormente se integran los dos efectos para derivar circuitos equivalentes [6,7].

2.4 Modelos para el Análisis de los Transitorios Electromagnéticos en Líneas de Transmisión

Las sobretensiones que surgen ya sea cuando se energizan las Líneas de Transmisión o por descargas atmosféricas se han estudiado por diferentes métodos. En sus inicios los métodos gráficos fueron los que dieron pauta para comprender el fenómeno físico a través de las ondas viajeras (Fenómeno Ondulatorio), empleando los conceptos de impedancia característica y coeficientes de reflexión.

El método más conocido es el de Bewley, también llamado diagrama de Lattice; originalmente fue creado para resolver problemas en las tuberías de agua y por analogía al flujo de potencia eléctrica se adaptó para análisis de sobretensiones y sobre corrientes en SEP; debido a sus limitaciones se restringía el estudio a cargas resistivas y líneas sin pérdidas [4].

Más tarde se dieron a conocer los métodos de Weedy y Barthold-Carter, que hacen referencia al uso de tablas para relacionar las conexiones entre los nodos y los valores de tiempo de viaje de onda, coeficientes de reflexión y refracción [4].

Otro método gráfico es el de Bergeron, que considera la línea sin pérdidas, en otras palabras no se considera la relación lineal que existe entre tensión y corriente, esta onda no cambia de magnitud durante su recorrido en la línea sino hasta que llega a un punto o nodo de transición [4].

Debido al avance tecnológico y con la introducción de las computadoras analógicas se diseñó un simulador que se llamó "Analizador Transitorio de Redes" (TNA-Transient Network Analyzer) que emplea el uso de parámetros concentrados para representar a escala fenómenos que ocurren en el sistema. Sin embargo con



la incorporación de las computadoras digitales se ha perdido el uso de los simuladores mencionados [4].

A principios de los 60's se realizaron los primeros estudios ya con la integración de la computadora digital, que empleaba el método de Bergeron. Dommel realizó diversos estudios para extender a redes multinodo con parámetros concentrados y distribuidos, que a partir de estos se desarrolla el EMTP (Electromagnetic Transients Program), que surgió de la combinación del método de Bergeron y la regla Trapezoidal. El análisis consiste en relacionar las ecuaciones de la línea de transmisión y las expresiones de las corrientes de rama de las terminaciones de la línea. Para poder así implementar modelos matemáticos y técnicas de solución precisas que tomen en cuenta la naturaleza distribuida de los parámetros. El EMTP modela cada componente en el dominio del tiempo a través de resistencias equivalentes y fuentes de corrientes de historia, finalmente el sistema es solucionado usando métodos numéricos para la solución de las ecuaciones simultáneas resultantes [4].

Más adelante surgió la versión alterna como el ATP (Alternative Transients Program) que fue desarrollado por S. Meyer en 1974.

Sin duda que para modelar transitorios electromagnéticos en las líneas de transmisión uno de los aspectos importantes es la dependencia frecuencial de los parámetros eléctricos.

En los 80's J. Marti propone un modelo de línea de transmisión para su estudio transitorio, el modelo incluye la dependencia frecuencial de los parámetros eléctricos a través de la función de propagación y la impedancia característica [4].

Capítulo 3 Líneas de Transmisión Aéreas

3.1 Modelado de líneas de transmisión

Para realizar estudios de transitorios electromagnéticos la línea de transmisión juega un papel importante debido a que es primordial representarla con modelos de parámetros distribuidos para poder considerar la propagación de la energía.

Los parámetros eléctricos que la conforma son:

R - La resistencia representa las pérdidas distribuidas a lo largo del conductor.

L - La inductancia representa el flujo magnético debido a la corriente a través del conductor.

C - La capacitancia representa la corriente de desplazamiento que fluye entre dos conductores, o bien, entre un conductor y el plano tierra.

G - La conductancia representa la corriente de conducción debida a las pérdidas del dieléctrico.

Los parámetros mencionados se muestran en la Fig. 3.1.

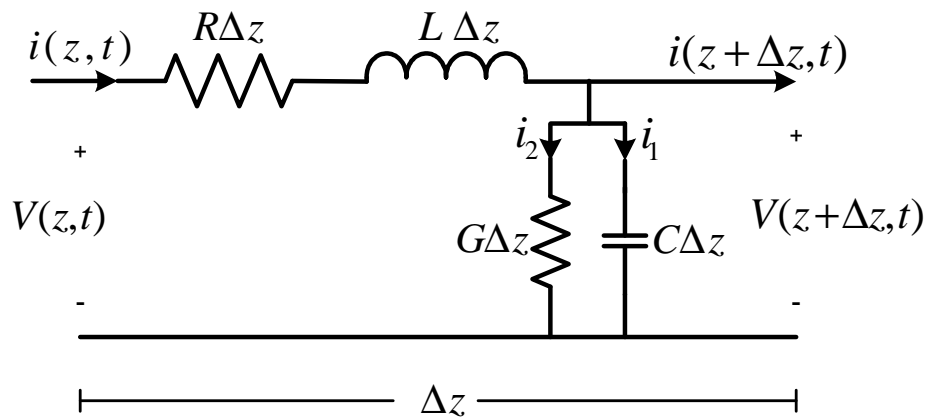


Fig. 3.1 Modelo del circuito básico de una línea de transmisión.



La impedancia serie está formada por la resistencia y la reactancia inductiva serie de la línea.

La admitancia en derivación está formada por la capacitancia y la conductancia.

La impedancia serie tiene 3 componentes:

1. La primera debida a la impedancia interna del conductor.
2. La segunda es consecuencia del efecto de retorno por tierra.
3. La tercera es función de la disposición geométrica de los conductores.

3.2 Ecuaciones del Telegrafista

Las ecuaciones del telegrafista gobiernan el comportamiento de la línea en estado transitorio.

Estas ecuaciones fueron primeramente usadas por Heaviside para el telégrafo y se desarrollaron a partir de las leyes de Maxwell [13].

Consideramos una línea sin pérdidas como la que se muestra en la Fig. 3.2.

Mediante la expresión sin pérdidas se manifiesta que toda la potencia enviada a la línea en el extremo de entrada llegará eventualmente al extremo de salida. Una fuente con un voltaje V_0 se conecta a la entrada a través de un interruptor S_1 en el tiempo $t = 0$. Cuando el interruptor se cierra, el envío de un voltaje, $V^+ = V_0$. Este voltaje no aparece instantáneamente en todas partes en la línea, sino que comienza a viajar, a cierta velocidad, desde la fuente hacia la carga. El frente de onda simbolizado con la línea discontinua vertical en la Fig. 3.2, representa la frontera instantánea entre la sección de la línea que ha sido cargada a un voltaje V_0 y la sección de la línea que aún está por cargarse. Así mismo, representa la frontera entre la sección de la línea que lleva la corriente de carga, I^+ , y la sección restante que no lleva corriente.

A medida que la línea se carga, el frente de onda se mueve de izquierda a derecha a una velocidad v . Una vez que ha llegado al extremo lejano, una fracción o todo el voltaje y la corriente de la onda se reflejarán. Si la carga en el extremo lejano se deja desconectada por medio del interruptor S_2 entonces el voltaje incidente se reflejara. El interés en este momento se centra en los factores que

determinan la velocidad de ondas. La clave para el análisis de esto es advertir que la línea de transmisión tendrá capacitancias e inductancias susceptibles de expresarse en términos de unidades de longitud.

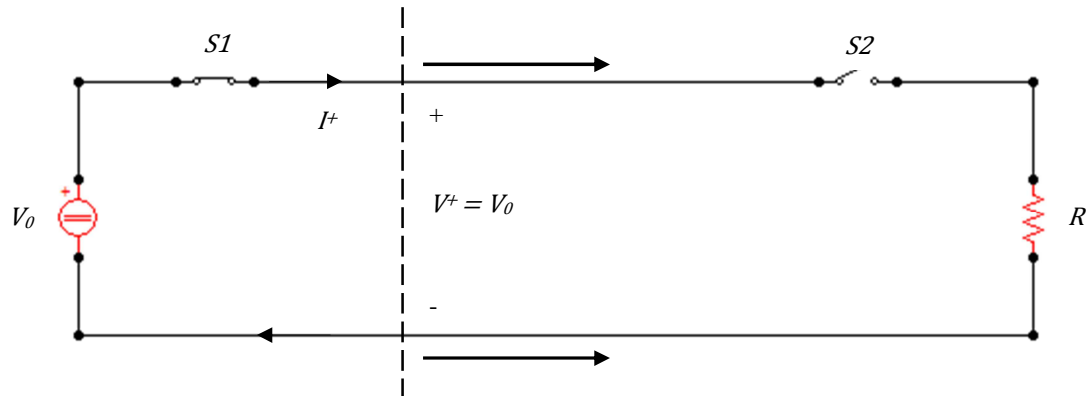


Fig. 3.2 Modelo del circuito básico de una línea de transmisión cuando se cierra el interruptor S_1 surgen ondas de voltaje y corriente.

Una vez que conocemos las características de la línea podemos construir un modelo de línea utilizando capacitancias e inductancias concentradas, como lo muestra la Fig. 3.3, Red formadora de pulsos.

Como se puede apreciar en la Fig. 3.3, cuando se cierra el interruptor S_1 la corriente en L_1 comienza a aumentar, por lo que el capacitor C_1 se carga. A medida que C_1 alcanza su máxima carga, la corriente en L_2 aumenta y provoca que C_2 se cargue. Este proceso progresivo de carga continúa a través de la red hasta que todos los elementos de la línea alcancen su carga máxima. A medida que el proceso de carga continúa, el frente de onda se mueve de izquierda a derecha. Su velocidad depende de qué tan rápido cada inductancia alcanza su estado de carga total y, simultáneamente, de qué tan rápido se carga al máximo voltaje cada capacitor. La onda es más rápida para valores de L y C menores. Por lo tanto esperamos que la velocidad de la onda sea inversamente proporcional a una función que involucre el producto de la inductancia y la capacitancia.

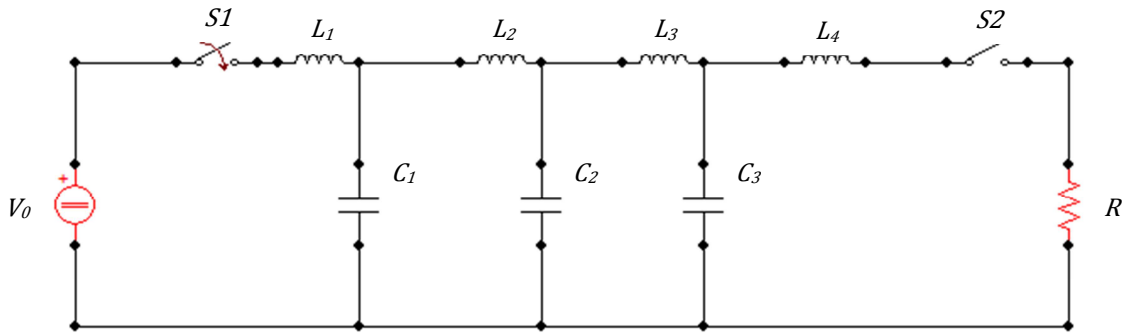


Fig. 3.3 Modelado de los elementos de parámetros distribuidos de una línea de transmisión.

En una línea de transmisión sin pérdidas la velocidad de la onda está dada por

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Donde L y C están especificadas por unidad de longitud.

Un comportamiento similar puede verse en la línea y la red, cuando se conecta la carga por medio del interruptor S_2 al modelo de la línea en el extremo lejano, como se observa en la Fig. 3.3, el capacitor más cercano al extremo derivado (C_3) se descarga primero a través de la carga, seguido del capacitor más cercano y así sucesivamente. Cuando la red se haya descargado por completo se habrá formado un pulso de voltaje a través de la carga. En esencia, observamos un comportamiento idéntico en una línea de transmisión cargada cuando conectamos la resistencia entre los conductores en el extremo de salida. Los voltajes conmutados ejercidos, como se utilizan en el análisis, son ejemplos de transitorios en las líneas de transmisión.

Se tienen dos métodos posibles para analizar las líneas de transmisión:

1. Se pueden resolver las ecuaciones de Maxwell sujetas a la configuración de la línea con el fin de obtener los campos y, con estos, hallar expresiones generales para obtener la potencia y la velocidad de las ondas.

2. Se pueden evitar los campos hallando los voltajes y corrientes aplicando el modelo del circuito apropiado.

La contribución de la teoría de campo es solo en la inicial evaluación de los parámetros de la inductancia y capacitancia.

El modelo de nuestro circuito contiene las constantes principales de la línea de transmisión. La capacitancia C , la inductancia L , la conductancia en derivación G y la resistencia R . La conductancia en derivación se utiliza para modelar la corriente de fuga a través del dieléctrico que se pudiera presentar a lo largo de la línea, la suposición es que el dieléctrico podría tener una conductividad, α_d , además de una constante dieléctrica ϵ_r , donde esta última afecta la capacitancia. La resistencia en serie está asociada con cualquier conductividad finita σ_c , en los conductores. Cualquiera de estos parámetros, R y G , será responsable de la pérdida de potencia en la línea de transmisión. Están en función de la frecuencia, si se conocen la frecuencia y las dimensiones, se pueden determinar los valores de R , G , L y C .

Suponiendo que la propagación está en la dirección de \mathbf{a}_z . El modelo corresponde a una sección de línea de longitud Δz que contiene una resistencia $R \Delta z$, una inductancia $L \Delta z$, una capacitancia $C \Delta z$ y una conductancia $G \Delta z$, como se muestra en la Fig. 3.4, visto de cualquier extremo, se dividen en dos los segmentos en serie para producir una red simétrica.

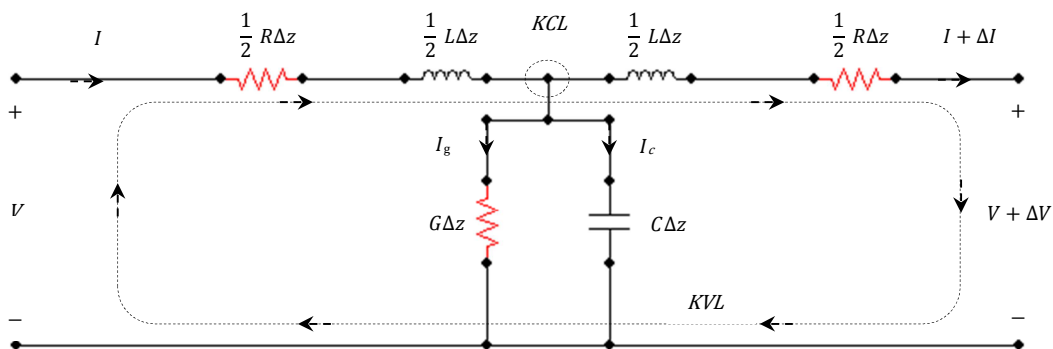


Fig. 3.4 Modelado de los elementos de parámetros concentrados de una sección corta de línea de transmisión con pérdidas. La longitud de la sección es Δz .

Se determina la variación del voltaje de salida y la corriente con respecto a sus valores de entrada en el límite a medida que la longitud se aproxima a un valor muy pequeño. A partir de esto se obtienen un par de ecuaciones diferenciales que describen la rapidez de cambio del voltaje y la corriente con respecto a z , en la Fig. 3.4, los voltajes y las corrientes de entrada y salida difieren en cantidades ΔV y ΔI , se obtienen las ecuaciones mediante la aplicación de las leyes de Kirchhoff (*KVL, KCL*).

Aplicando *KVL* al circuito que incluye toda la longitud de la sección Δz , como se muestra en la Fig. 3.3, de aquí se obtiene lo siguiente:

$$V = \frac{1}{2}RI\Delta z + \frac{1}{2}L\frac{\partial I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}L\left(\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial \Delta I}{\partial t}\right)\Delta z + \frac{1}{2}R(I + \Delta I)\Delta z + (V + \Delta V) \quad (3.1)$$

Despejando de la ecuación (3.1) la razón de cambio del voltaje con respecto a z , $\frac{\Delta V}{\Delta z}$

Se expande la ecuación para realizar las operaciones necesarias:

$$V = \frac{1}{2}RI\Delta z + \frac{1}{2}L\frac{\partial I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}L\frac{\partial I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}L\frac{\partial \Delta I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}RI\Delta z + \frac{1}{2}R\Delta I\Delta z + V + \Delta V \quad (3.2)$$

Se realiza la suma de términos semejantes:

$$V = RI\Delta z + L\frac{\partial I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}L\frac{\partial \Delta I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}R\Delta I\Delta z + V + \Delta V \quad (3.3)$$

Se traslada al primer miembro $V + \Delta V$ y se cancela V :

$$V - V - \Delta V = RI\Delta z + L\frac{\partial I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}L\frac{\partial \Delta I}{\partial t}\Delta z + \frac{1}{2}R\Delta I\Delta z \quad (3.4)$$



Factorizando el segundo miembro con respecto a Δz :

$$-\Delta V = \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{2} L \frac{\partial \Delta I}{\partial t} + \frac{1}{2} R \Delta I \right) \Delta z \quad (3.5)$$

Se traslada al primer miembro Δz :

$$-\frac{\Delta V}{\Delta z} = \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{2} L \frac{\partial \Delta I}{\partial t} + \frac{1}{2} R \Delta I \right) \quad (3.6)$$

Por lo tanto se obtiene como resultado:

$$\frac{\Delta V}{\Delta z} = - \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{2} L \frac{\partial \Delta I}{\partial t} + \frac{1}{2} R \Delta I \right) \quad (3.7)$$

Entonces se tiene que:

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial z} \Delta z \quad \text{y} \quad \Delta V = \frac{\partial V}{\partial z} \Delta z \quad (3.8)$$

Ahora se sustituye (3.8) en (3.7) para obtener la siguiente expresión:

Como:

$$\frac{\Delta V}{\Delta z} = \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.9)$$

Entonces se sustituye $\frac{\Delta V}{\Delta z}$:



$$\frac{\partial V}{\partial z} = - \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{2} L \frac{\partial \Delta I}{\partial t} + \frac{1}{2} R \Delta I \right) \quad (3.10)$$

Se prosigue sustituyendo ΔI :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{2} L \frac{\partial \left(\frac{\partial I}{\partial z} \Delta z \right)}{\partial t} + \frac{1}{2} R \frac{\partial I}{\partial z} \Delta z \right) \quad (3.11)$$

Expandiendo la expresión en:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{2} L \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial z} \Delta z + \frac{1}{2} R \frac{\partial I}{\partial z} \Delta z \right) \quad (3.12)$$

Factorizando

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \Delta z \right) \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (3.13)$$

Por lo tanto se evalúa el límite de Δz cuando tiende a cero (un valor lo suficientemente pequeño)

$$\frac{\partial V}{\partial z} = - \left(RI + L \frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (3.14)$$

La ecuación (3.14) representa la primera ecuación del telegrafista para voltajes



Para hallar la segunda ecuación se requiere aplicar *KCL* al nodo central del circuito de la Fig. 3.4, el voltaje en el nodo se propone que por simetría sea $V + \frac{\Delta V}{2}$; entonces por lo tanto se tiene que:

$$I = I_g + I_c + (I + \Delta I) = G\Delta z \left(V + \frac{\Delta V}{2} \right) + C\Delta z \frac{\partial}{\partial t} \left(V + \frac{\Delta V}{2} \right) + (I + \Delta I) \quad (3.15)$$

Expandiendo la expresión anterior:

$$I = G\Delta z V + G\Delta z \frac{\Delta V}{2} + C\Delta z \frac{\partial}{\partial t} V + C\Delta z \frac{\partial}{\partial t} \frac{\Delta V}{2} + I + \Delta I \quad (3.16)$$

Se traslada $I + \Delta I$ al primer miembro y se cancela I :

$$I - I - \Delta I = G\Delta z V + G\Delta z \frac{\Delta V}{2} + C\Delta z \frac{\partial}{\partial t} V + C\Delta z \frac{\partial}{\partial t} \frac{\Delta V}{2} \quad (3.17)$$

Factorizando con respecto a Δz :

$$\Delta I = - \left(GV + G \frac{\Delta V}{2} + C \frac{\partial}{\partial t} V + C \frac{\partial}{\partial t} \frac{\Delta V}{2} \right) \Delta z \quad (3.18)$$

Trasladando Δz al primer miembro:

$$\frac{\Delta I}{\Delta z} = - \left(GV + G \frac{\Delta V}{2} + C \frac{\partial}{\partial t} V + C \frac{\partial}{\partial t} \frac{\Delta V}{2} \right) \quad (3.19)$$

Se sustituye $\Delta I = \frac{\partial I}{\partial z} \Delta z$ y $\Delta V = \frac{\partial V}{\partial z} \Delta z$ en la expresión (3.19):

Primero se sustituye $\frac{\Delta I}{\Delta z} = \frac{\partial I}{\partial z}$ en la ecuación (3.19):

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - \left(GV + G \frac{\partial V}{\partial z} \Delta z + C \frac{\partial}{\partial t} V + C \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial V}{\partial z} \Delta z \right) \quad (3.20)$$

Entonces se tiene que:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - \left(GV + \frac{1}{2} G \frac{\partial V}{\partial z} \Delta z + C \frac{\partial}{\partial t} V + \frac{1}{2} C \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial V}{\partial z} \Delta z \right) \quad (3.21)$$

Por lo tanto se factoriza la expresión anterior:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - \left(\left(1 + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \Delta z \right) \left(GV + C \frac{\partial V}{\partial t} \right) \right) \quad (3.22)$$

A medida que el límite de Δz tiende a cero:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - \left(GV + C \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (3.23)$$

La ecuación (3.23) representa la segunda ecuación del telegrafista para corrientes

Las ecuaciones (3.14) y (3.23) describen la razón de cambio del voltaje y la corriente en cualquier línea de transmisión. En nuestro modelo la propagación sin pérdidas se presenta cuando la $R = G = 0$. Bajo las condiciones anteriores solo el primer término del segundo miembro en las ecuaciones (3.14) y (3.23) se eliminan por lo que se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = - \left(L \frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad \text{1era. Ecuación del Telegrafista} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - \left(C \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad \text{2da. Ecuación del Telegrafista} \quad (3.25)$$

[7].

3.3 Cálculo de parámetros En por unidad para una línea de transmisión monofásica

3.3.1 Inductancia en una Línea par abierto

Imagínese una línea bifilar como su nombre lo indica consta de dos conductores paralelos cilíndricos, r_a y r_b son los radios respectivamente, los cuales se encuentran separados por una distancia d , tal que es mucho mayor que cualquiera de los radios por lo que $d \gg r_a, r_b$, como se muestra en la Fig. 3.5.

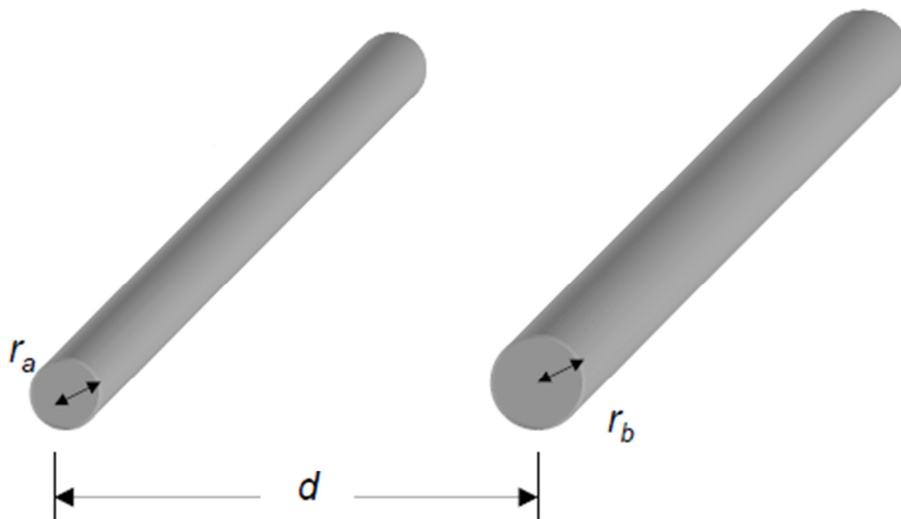


Fig. 3.5 Modelado de la inductancia de una línea bifilar.

Para un conductor circular la densidad de flujo está dado por:

$$\psi = \iint B \, ds = \iint \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3.26)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 \quad (3.27)$$

Definiendo los límites en función de la Fig. 3.5 se obtiene:

$$\psi_1 = \int_{r=r_1}^{r=d-r_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \, dr \quad (3.28)$$

$$\psi_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ln r \Big|_{r_1}^{d-r_2} \quad (3.29)$$

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi r} [\ln(d - r_2) - \ln r_1] \quad (3.30)$$

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \left[\ln \left(\frac{d-r_2}{r_1} \right) \right] \quad (3.31)$$

$$\psi_2 = \int_{r=r_2}^{r=d-r_1} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \, dr \quad (3.32)$$

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi r} [\ln(d - r_1) - \ln r_2] \quad (3.33)$$

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi r} \left[\ln \left(\frac{d-r_1}{r_2} \right) \right] \quad (3.34)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \left[\ln\left(\frac{d-r_2}{r_1}\right) + \ln\left(\frac{d-r_1}{r_2}\right) \right] \quad (3.35)$$

Por las propiedades de los logaritmos se tiene que $\ln(a) + \ln(b) = \ln(ab)$ aplicando esto a la ecuación (3.35):

$$\psi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ln\left[\frac{(d-r_2)(d-r_1)}{r_1 r_2}\right] \quad (3.36)$$

Considerando la siguiente relación

$$\psi = LI \quad (3.37)$$

r_2 y r_1 son pequeños en comparación con d , $r_2 = r_1 = r_w$, y además $r_w \ll d$

$$L = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ln\left[\frac{(d-r_2)(d-r_1)}{r_1 r_2}\right] \quad (3.38)$$

Entonces se tiene que:

$$L = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \ln\left[\frac{d}{r_w}\right]^2 \quad (3.39)$$

$$L = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} 2\ln\left[\frac{d}{r_w}\right] = \frac{\mu_0 I}{\pi r} \ln\left[\frac{d}{r_w}\right] \quad (3.40)$$

La expresión (3.40) es la ecuación de la inductancia para el circuito a par abierto.

3.3.2 Capacitancia en una Línea par abierto

Para un conductor circular el campo eléctrico transversal está dado por:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \quad (3.41)$$

La expresión (3.41) es la ecuación de la capacitancia para el circuito a par abierto

3.4 MODELO DE J. MARTI

El desarrollo de este modelo se puede explicar de mejor manera por medio de la interpretación física del concepto de las funciones de peso desarrolladas por Meyer y Dommel.

Del sistema mostrado en la Fig. 3.6 se puede observar que si la resistencia R_l se reemplaza por una red equivalente cuya respuesta a la frecuencia es igual a la impedancia característica de la línea, $Z_c(\omega)$, no habrá ninguna reflexión en los extremos.

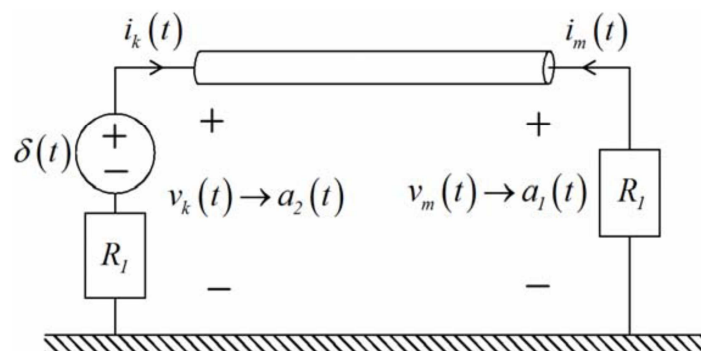


Fig. 3.6 Interpretación física de las funciones de peso de Meyer y Dommel [12].

Si se pudiera encontrar una red equivalente, la nueva función de peso $a_1(t)$ tendría solo el primer pico y la función $a_2(t)$ sería cero, esto se muestra en la Fig. 3.7

Las formas de las nuevas funciones de peso se muestran en la Fig. 3.8. Con este nuevo modelo se elimina el problema de la parte final de la forma de onda y la determinación exacta de la función $a_2(t)$.

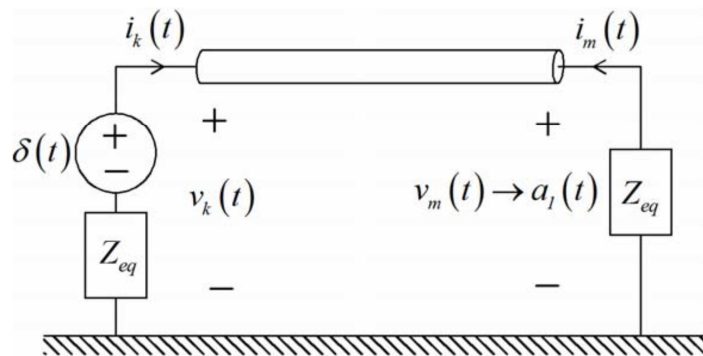


Fig. 3.7 Interpretación física de la función de peso $a_1(t)$ para la nueva formulación[12].

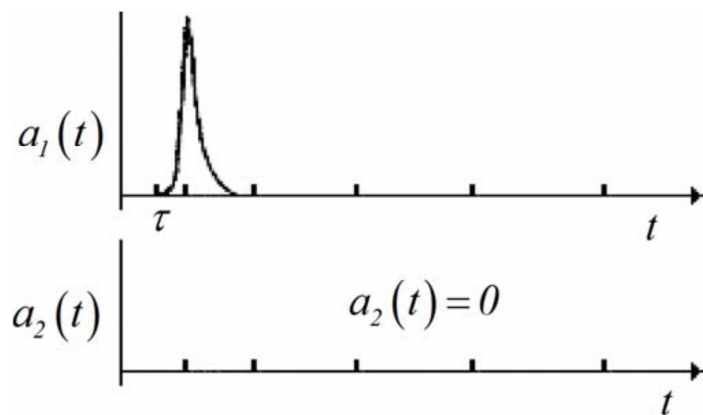


Fig. 3.8 Funciones de peso $a_1(t)$ y $a_2(t)$ para la nueva formulación[12].



3.4.1 Desarrollo Matemático del Modelo de Martí

Al remplazar la resistencia R_l por la impedancia característica de la línea Z_{eq} con el fin de generar las nuevas funciones de peso, las funciones para las ondas viajeras hacia adelante y atrás se pueden definir en el dominio de la frecuencia de la siguiente manera:

$$F_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (3.42)$$

$$B_k(\omega) = V_k(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (3.43)$$

y

$$F_k(\omega) = V_k(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (3.44)$$

$$B_m(\omega) = V_m(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (3.45)$$

donde $Z_{eq}(\omega)$ es la impedancia de la red lineal que aproxima a $Z_c(\omega)$.

Comparando las ecuaciones (3.42) a la (3.45) con la solución general en el dominio de la frecuencia representada por las ecuaciones (3.43) y (3.44), resulta:

$$B_k(\omega) = A_1(\omega)F_m(\omega) \quad (3.46)$$

y

$$B_m(\omega) = A_1(\omega)F_k(\omega) \quad (3.47)$$

donde:

$$A_1(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{1}{\cosh[\gamma(\omega)l] + \sinh[\gamma(\omega)l]} \quad (3.48)$$

La forma en el dominio del tiempo de $A_1(\omega)$ es la función de peso $a_1(t)$ mostrada en la Fig. 3.8. La forma en el dominio del tiempo de las ecuaciones (3.46) y (3.47) está dada por las integrales de la convolución:

$$b_k(t) = \int_{\tau}^{\infty} f_m(t-u)a_1(u) du \quad (3.49)$$

y

$$b_m(t) = \int_{\tau}^{\infty} f_k(t-u)a_1(u) du \quad (3.50)$$



El límite inferior de estas integrales es τ debido a que, como se puede ver en la Fig. 3.8, la función de peso $a_1(t)=0$ para $t < \tau$. El tiempo de retardo τ representa el tiempo de viaje de la componente de frecuencia más rápida del impulso aplicado.

En las ecuaciones (3.49) y (3.50) se puede observar que los valores de b_k y b_m en el paso de tiempo t se definen completamente de los valores de historia de las funciones f_m y f_k , siempre que el paso de integración Δt de la solución de la red sea más pequeño que τ . Con b_k y b_m conocidos, la forma en el dominio del tiempo de las ecuaciones (3.44) y (3.45) lleva directamente a los circuitos equivalentes deseados en las terminales de la línea de transmisión, esto es:

$$b_k(t) = E_{kh} \tag{3.51}$$

y

$$b_m(t) = E_{mh} \tag{3.52}$$

Entonces de las Ecuaciones (3.44) y (3.45) se tiene

$$V_k(t) = e_k(t) + E_{kh} \tag{3.53}$$

$$V_m(t) = e_m(t) + E_{mh} \tag{3.54}$$

donde $e_k(t)$ y $e_m(t)$ son los voltajes a través de la red Z_{eq} . Después de la conversión a la representación modal, las ecuaciones (3.42) y (3.43) arrojan para cada paso de tiempo t los modelos de línea equivalentes mostrados en la Fig. 3.9.

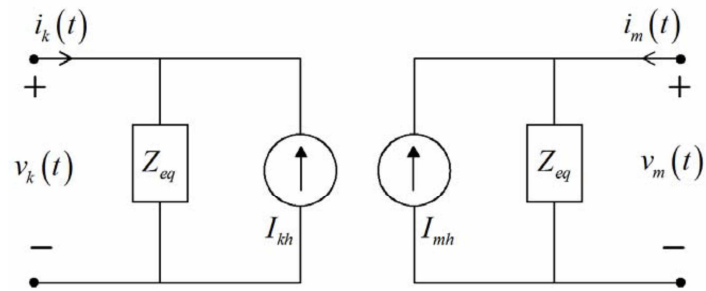


Fig. 3.9 Nuevos modelos de línea dependientes de la frecuencia en los nodos k y m .

Una vez que se tiene conocimiento previo de las características de la Red OPLAT, se procede a identificar los elementos involucrados para realizar un enlace OPLAT; antes de continuar con la identificación de los elementos es importante mencionar estos conceptos básicos para dar un claro seguimiento:

- El principio de comunicaciones OPLAT se basa en la transmisión de señales en RF.
- Modulación Bajo el principio de Banda Lateral Única con portadora suprimida. (BLU).
- Muy baja potencia comparada con la potencia de transmisión de energía.
- Envío de señales de Teleprotección confiables.
- Manejo de interfaces para señales de voz y datos.

Como se puede apreciar en el diagrama de la Fig. 4.2, se muestran los elementos que constituyen un enlace OPLAT.

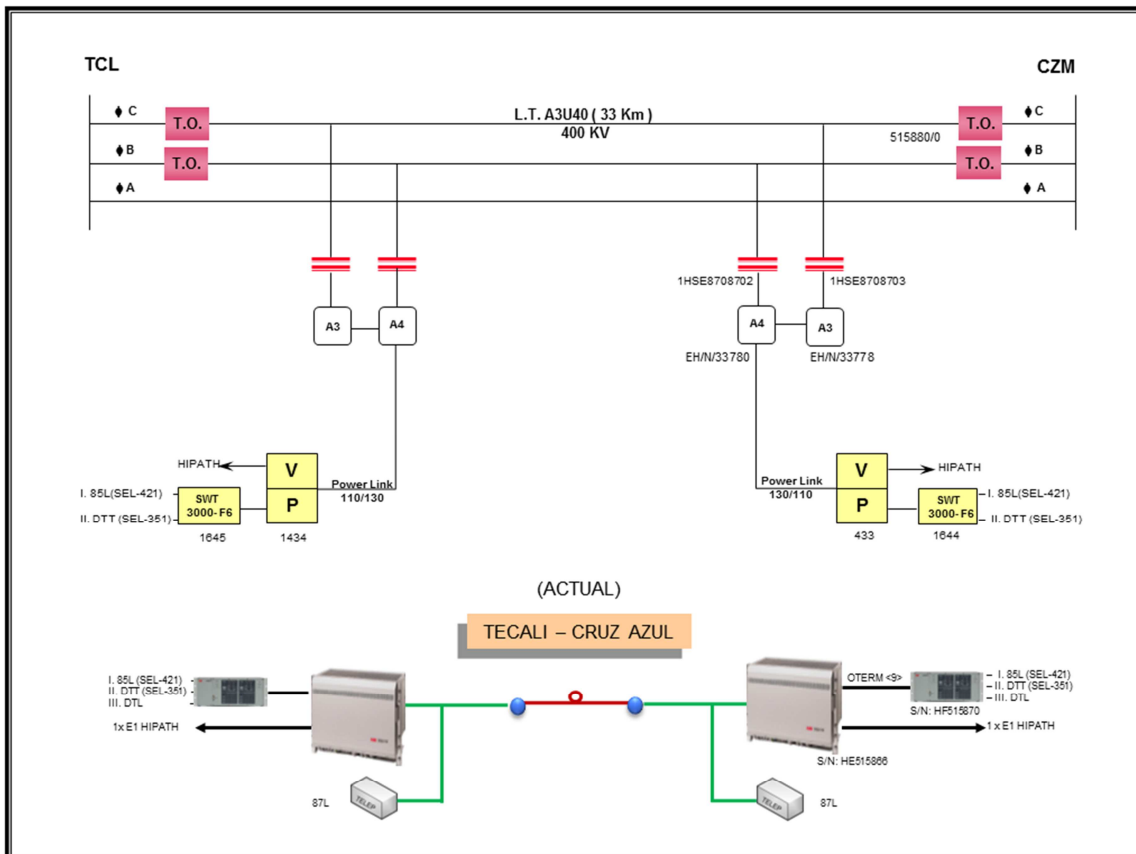


Fig. 4.2 Diagrama de Comunicaciones Subestación Tecali “OPLAT- Fibra Óptica” sobre la L.T. TCL-A3U40-CZM.

4.2 Equipo primario

EQUIPO PRIMARIO COMO:

- T.O. - Trampa de Onda
- D.P. - Dispositivo de Potencial
- AKE – Filtro de Acoplamiento
- Cable de RF

LINEA DE TRANSMISION.

Las líneas de Alta Tensión son construidas para la transmisión de energía y sus características son:

- a) Calculos para la transmisión de energía con frecuencias de 60 Hz. Por lo que la transmisión de RF (Frecuencias altas) son totalmente inadecuadas para la propagación.
- b) El ruido generado sobre la línea es muy alto comparado con la señal útil a transmitir (RUIDO CORONA).
- c) Las transposiciones que normalmente se instalan en las líneas actúan como trampas de onda en muchas ocasiones.
- d) Normalmente las líneas no son homogéneas y pueden producir interferencias.
- e) Se requieren ciertos niveles de relación señal a ruido para lograr una comunicación confiable.
- f) Los cambios climáticos (Hielo, Humedad, Calor Etc.) son elementos que influyen drásticamente en el enlace.

Como se puede apreciar en la Fig. 4.3 los elementos que influyen drásticamente en pérdidas en un enlace OPLAT.

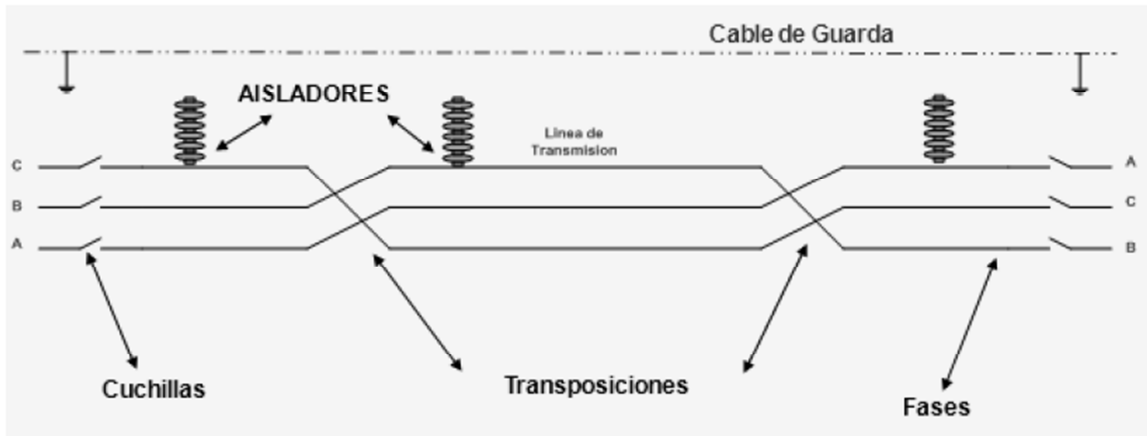


Fig. 4.3 Elementos que influyen en un enlace OPLAT.

Elementos de las líneas de transmisión que afectan a las Comunicaciones:

- Fases
- Cuchillas
- Transposiciones
- Aisladores
- Cable de Guarda

[21]

4.2.1 Trampa de onda

TRAMPA DE ONDA.

Las trampas de onda son parte del equipo primario de las subestaciones de potencia, utilizadas para evitar pérdidas excesivas de potencia de la señal portadora, cualquiera que sea la configuración de la red imponiendo una impedancia de bloqueo entre el bus de la subestación y la línea. Es básicamente una Inductancia sintonizada mediante un circuito resonante que se emplea para el bloqueo de ciertas frecuencias para dirigir las señales útiles en sentidos que nos interesen.

Las trampas de Onda se clasifican de acuerdo con el tipo de montaje en Auto soportadas (de pedestal vertical, de pedestal horizontal, de canal horizontal, acoplada con capacitor en montaje horizontal o acoplada con capacitor en montaje

vertical y universal) y suspendidas; por el tipo de construcción en encapsuladas y tipo abierto; por el rango y tipo de frecuencias.

Cálculo de la Impedancia inductiva (Z_L) en una Trampa de Onda:

$$Z_L = \sqrt{(R^2 + X_L^2)} \quad (4.1)$$

En donde:

X_L es la Reactancia Inductiva y está dada por:

$$X_L = 2\pi fL \quad (4.2)$$

R es la Resistencia Inductiva y está dada por:

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.3)$$

En la Fig. 4.4 se muestra el montaje de una trampa de onda en pedestal y sus componentes principales.

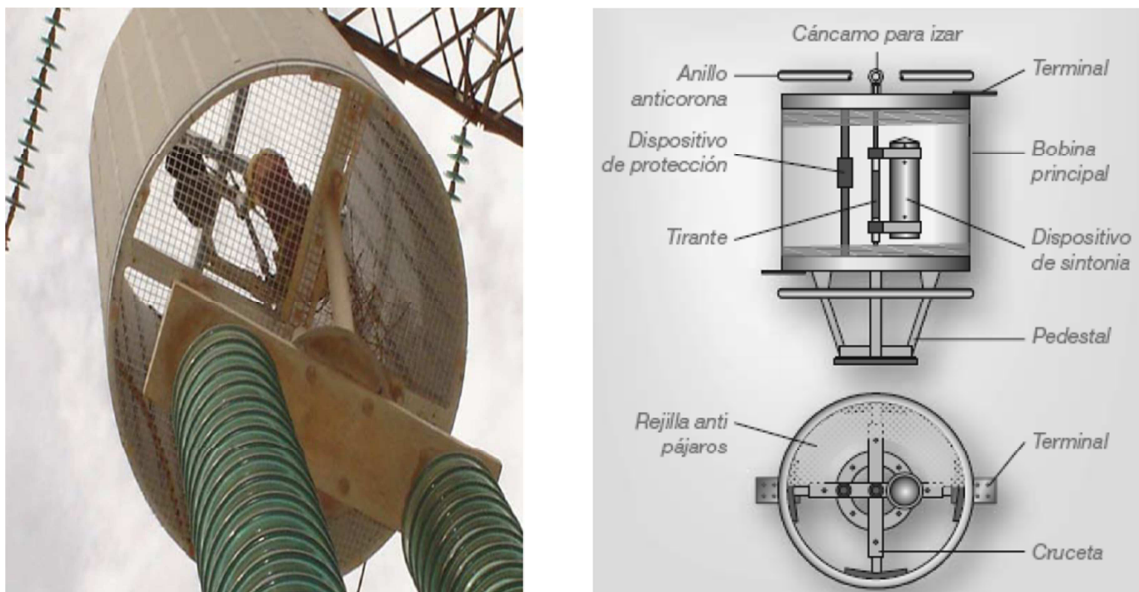


Fig. 4.4 Principales componentes de la Trampa de Onda.

a) Dispositivo de Sintonía:

Su misión es hacer relativamente elevada la impedancia de bloqueo para una o varias frecuencias o banda de frecuencias; está formado por condensadores y eventualmente por inductancias y resistencias conectadas en paralelo con la bobina principal y el dispositivo de protección.

b) Dispositivo de Protección:

Su misión es proteger la bobina de bloqueo contra las sobretensiones transitorias que pudieran presentarse en sus bornes y va conectado en paralelo con el dispositivo de sintonía y la bobina principal.

c) Bobina Principal:

Es el elemento por el cual circula la corriente de línea; su inductancia nominal L_n es el valor al que se refieren las características especificadas de la bobina de bloqueo a la frecuencia de 60 Hz.

TIPOS DE SINTONIA DE LA TRAMPA DE ONDA.

En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se presenta el circuito correspondiente de las diferentes trampas onda con sus respectivas sintonías de banda alta, específica y banda ancha así como su respuesta en frecuencia.

a) Sintonía de Banda Alta:

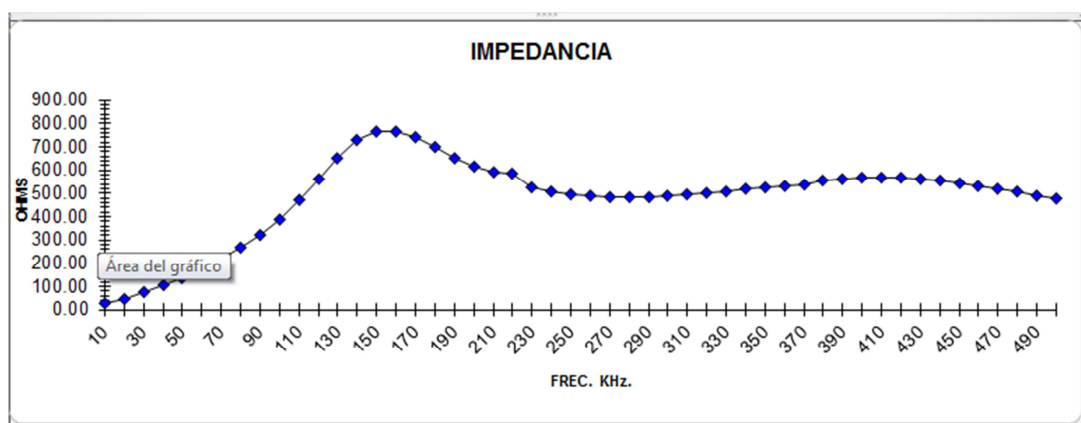


Fig. 4.5 Trampa de Onda con sintonía de banda alta

b) Sintonía Específica:

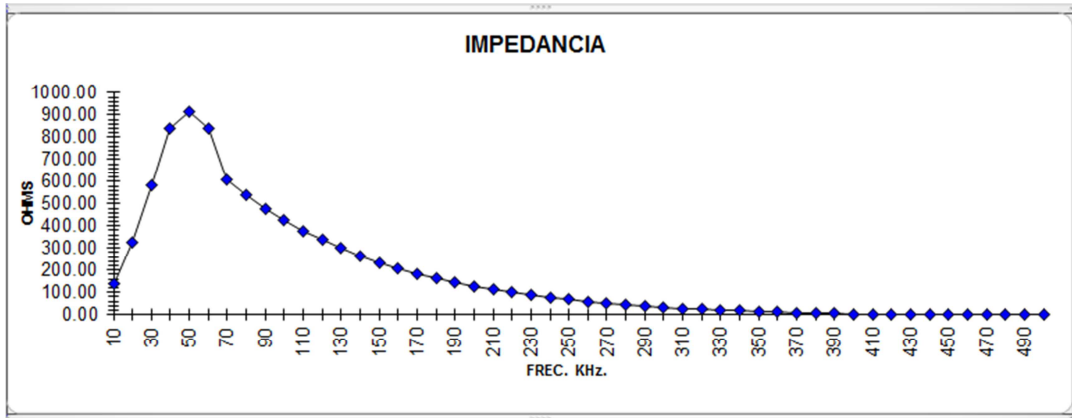


Fig. 4.6 Trampa de Onda con sintonía de banda específica

c) Sintonía de Banda Ancha:

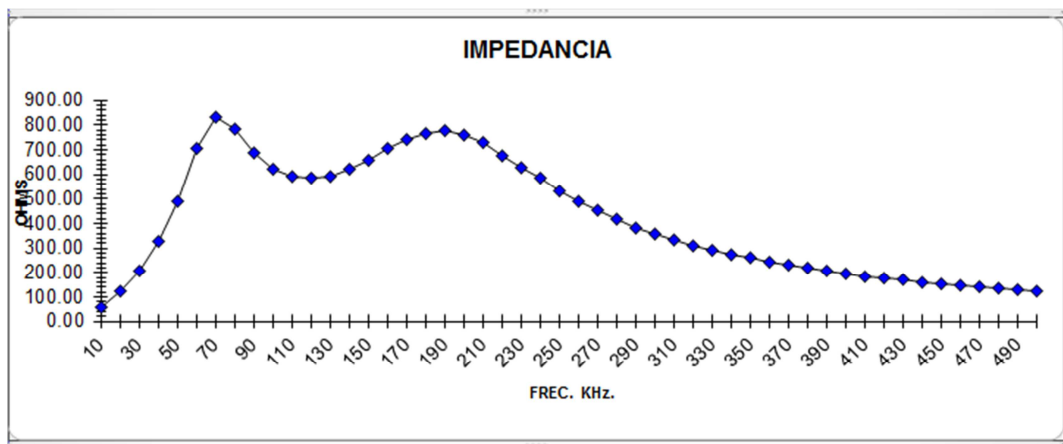


Fig. 4.7 Trampa de Onda con sintonía de banda ancha

CARACTERÍSTICAS DE LA TRAMPA DE ONDA:

a) Impedancia de Bloqueo:

Es la impedancia completa de la bobina de bloqueo (Z_b) dentro de las frecuencias especificadas.

b) Impedancia Nominal:

Es el valor de la componente resistiva de la impedancia de bloqueo.

c) Atenuación de Servicio Nominal:

Es la determinada por la conexión en paralelo de la componente resistiva de la impedancia de la bobina de bloqueo.

**d) Ancho de Banda:**

Es el rango de frecuencias donde la impedancia de bloqueo y la atenuación de servicio no son inferiores a un valor mínimo especificado.

e) Frecuencia Central o Nominal:

Es la frecuencia media de las frecuencias extremas del ancho de banda nominal [21].

Circuito resonante

Es un circuito formado por una bobina L y un condensador eléctrico C . En el circuito LC hay una frecuencia para la cual se produce un fenómeno de resonancia eléctrica, llamada frecuencia de resonancia, para la cual la reactancia inductiva (parte imaginaria de la impedancia de la bobina) es igual a la reactancia capacitiva (parte imaginaria de la impedancia del condensador) ($X_C = X_L$). Por lo tanto, la impedancia será mínima e igual a la resistencia óhmica.

En un circuito resonante, la impedancia total vendrá dada por:

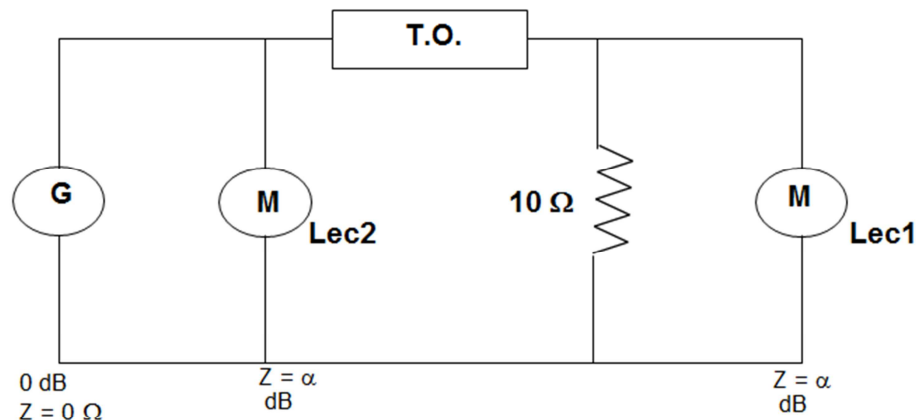
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2} \quad (4.4)$$

y siendo $X_C = X_L$ entonces $Z = \sqrt{R^2}$ y así $Z = R$

La frecuencia de resonancia está dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi(\sqrt{LC})} \quad (4.5)$$

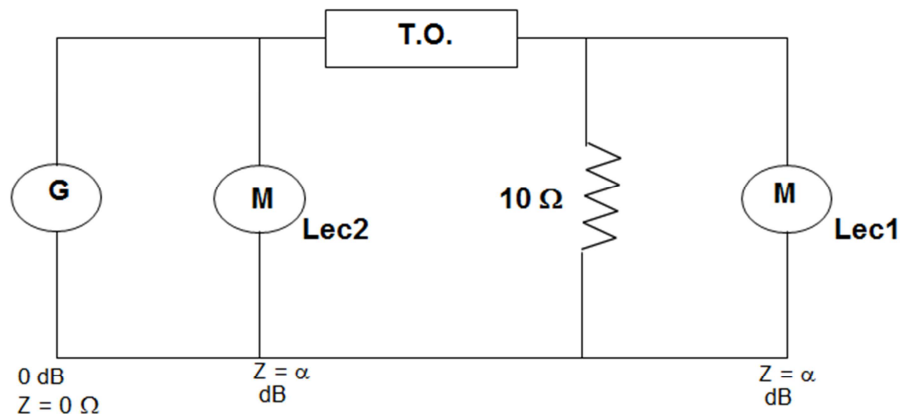
Como se puede apreciar en las figuras 4.8 y 4.9 se especifican los diagramas utilizados para llevar a cabo las pruebas de respuesta en frecuencia realizadas en campo de las Trampas de Onda, se obtiene los resultados mediante instrucciones de trabajo proporcionadas por la gerencia de comunicaciones por medio de formatos en hojas de Excel, se observa la lectura del medidor 2 a la salida del generador para obtener un margen de error con el generador que se inserta en la tabla de respuesta en frecuencia (anexo "D").



RESPUESTA EN FRECUENCIA DE TRAMPA DE ONDA

LUGAR:	CZM	MARCA:	ABB	VALOR:	2000a
LINEA:	A3U40	SERIE:		Z. DE LINEA:	600 Ω
COLATERAL:	TCL	ANCHO DE BANDA:	332 -542	IMP. S.E.:	600 Ω
FASE:	B	FECHA:	03/07/2013	R. MEDIC.:	10 Ω

Fig. 4.8 Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia de la Trampa de Onda Fase “B”.



RESPUESTA EN FRECUENCIA DE TRAMPA DE ONDA

LUGAR:	CZM	MARCA:	ABB	VALOR:	2000a
LINEA:	A3U40	SERIE:	515880/0	Z. DE LINEA:	600 Ω
COLATERAL:	TCL	ANCHO DE BANDA:	332 -542	IMP. S.E.:	600 Ω
FASE:	C	FECHA:	03/07/2013	R. MEDIC.:	10 Ω

Fig. 4.9 Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia de la Trampa de Onda Fase “C”.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran las gráficas de Impedancia, donde se puede observar que al incrementar la frecuencia en intervalos de 10 KHz, el nivel de la Impedancia aumenta debido a la respuesta en frecuencia esperada por la Reactancia Inductiva (anexo “D”).

Cálculo de la Impedancia inductiva (Z_L) en una Trampa de Onda:

$$Z_L = \sqrt{(R^2 + X_L^2)} \tag{4.6}$$

donde:

$$X_L = 2\pi fL \tag{4.7}$$

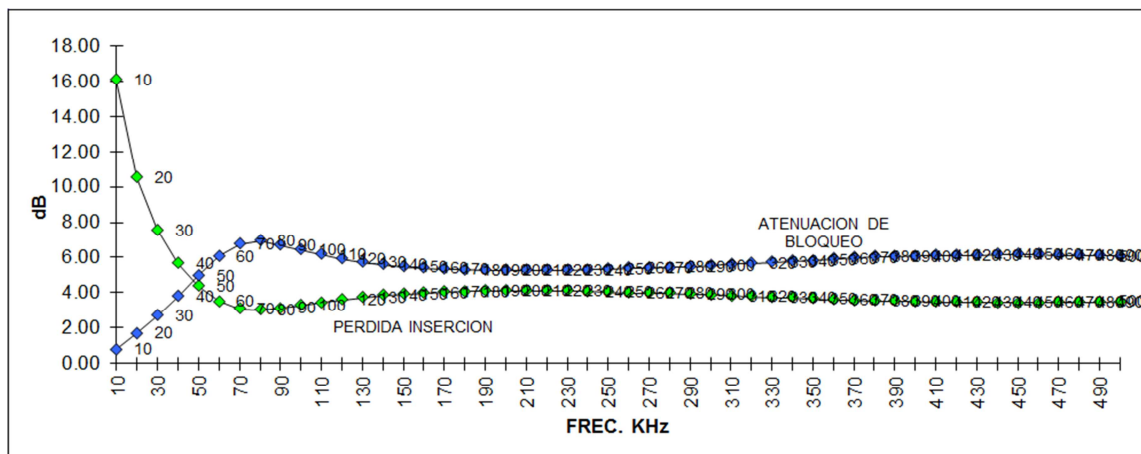
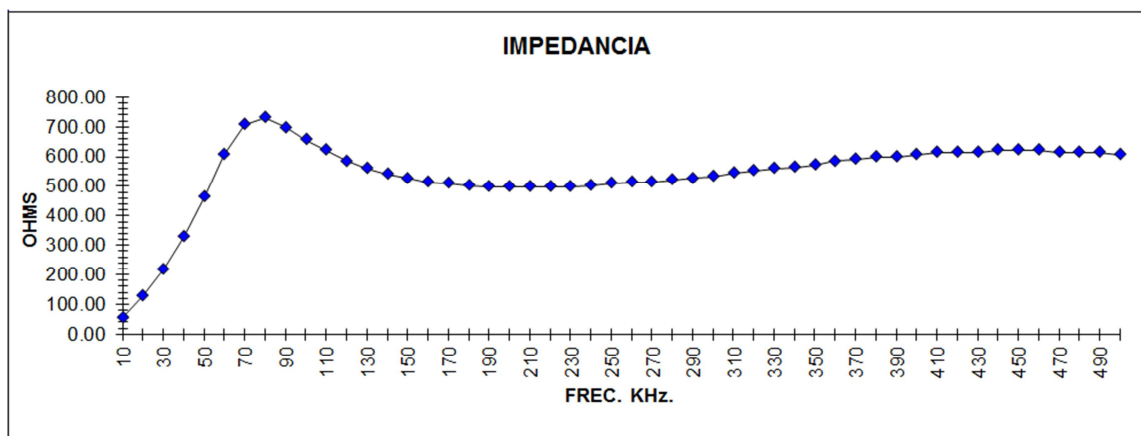


Fig. 4.10 Gráficas de las Pruebas de respuesta en frecuencia, atenuación de Bloqueo y pérdida de inserción de la Trampa de Onda Fase “B”.

de la misma forma se persive claramente en las figuras 4.10 y 4.11, que las Trampas de Onda son de sintonía de Banda Alta.

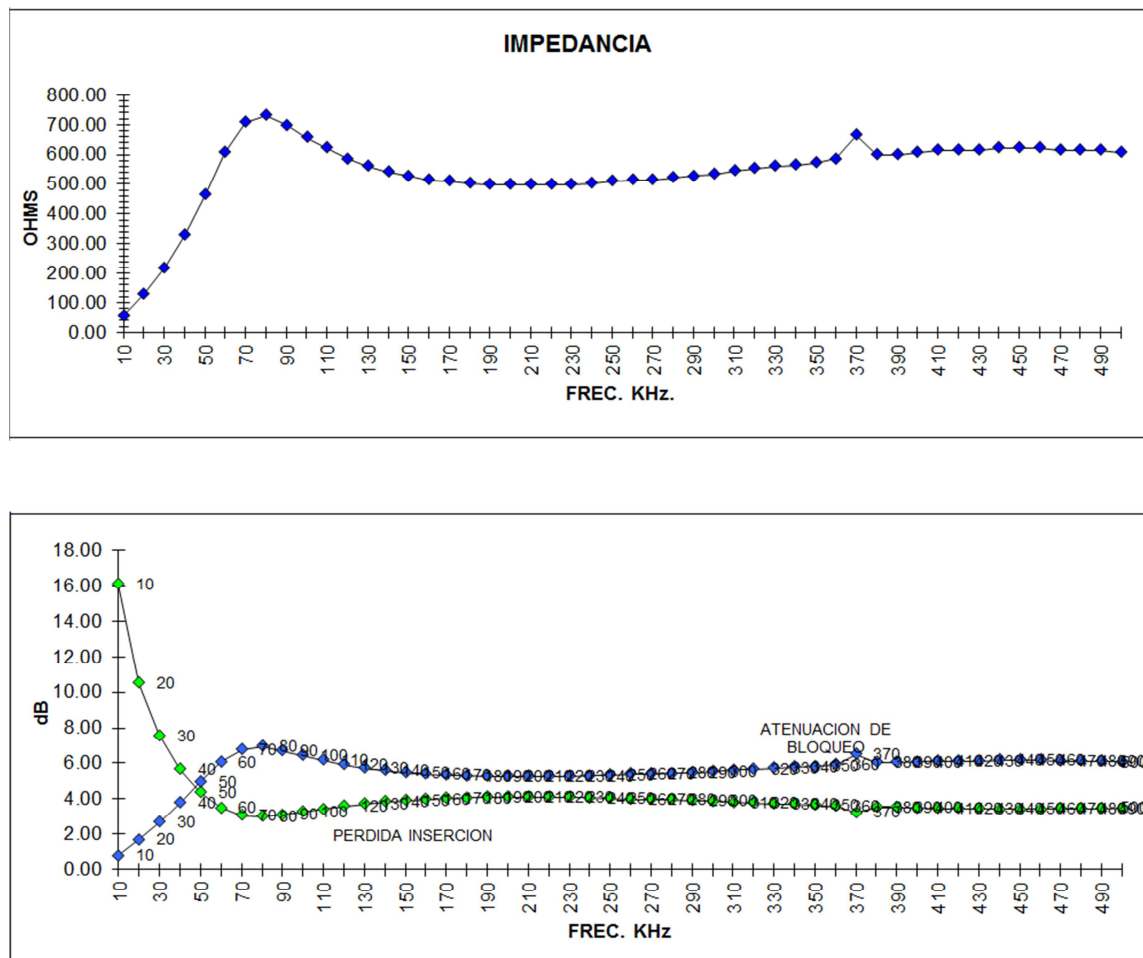


Fig. 4.11 Gráficas de las Pruebas de respuesta en frecuencia, atenuación de Bloqueo y pérdida de inserción de la Trampa de Onda Fase "C".

(Anexo "D").

4.2.2 Dispositivo de potencial

DISPOSITIVO DE POTENCIAL

El TPC, DPC o Capacitor de Acoplamiento es un arreglo de capacitancias que se utiliza para el bloqueo de la Corriente Alterna (bajas frecuencias) y un paso franco en las Radiofrecuencias para acoplar las señales útiles a la línea de Transmisión.

Los dispositivos de potencial capacitivo son parte del equipo de línea primario de las subestaciones de potencia, los cuales se utilizan para tomar señales de voltaje en los esquemas de protección y medición, además se usa la capacidad total para acoplar los sistemas OPLAT a la línea de alta tensión, esto en un rango de frecuencias de 30-500 kHz. Actúan simultáneamente como un transformador de tensión y un capacitor de acoplamiento. La mayoría de los tipos de transformadores de tensión capacitivos pueden soportar trampas de onda, como el mostrado en la Fig. 4.12.

Estos dispositivos de acoplamiento aseguran:

- 1) La transmisión eficaz de señales portadoras entre el circuito de conexión y la línea de energía.
- 2) La seguridad del personal y la protección de las partes de instalación contra los efectos de la tensión a la frecuencia de red y las sobretensiones transitorias.

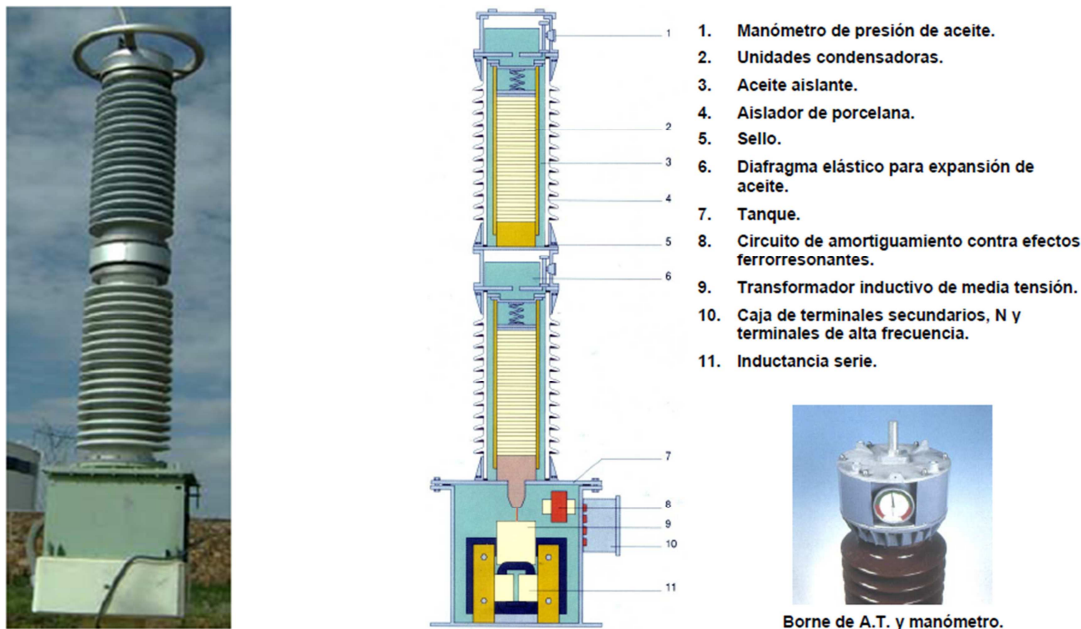
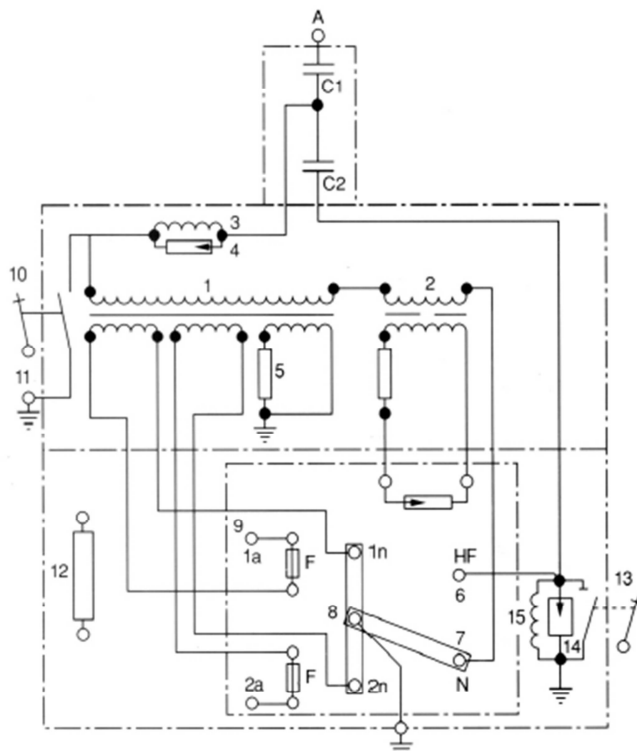


Fig. 4.12 Principales componentes del Dispositivo de Potencial [21].

Cuando se trabaja con tensiones nominales elevadas, iguales o superiores a 220 KV se pueden y suelen utilizarse transformadores de tensión capacitivos.

Estos transformadores se componen básicamente de un divisor de tensión capacitivo consistente en varios condensadores conectados en serie, contenidos dentro de aisladores huecos de porcelana, con el fin de obtener una tensión intermedia. En este punto de acceso a la tensión intermedia del divisor de tensión se conecta un transformador de tensión intermedia, igual que uno inductivo, a través de una inductancia que compensa la reactancia capacitiva del divisor. El transformador puede tener 1, 2 o 3 secundarios de utilización según los casos y modelos.

En la Fig. 4.13 se muestra la descripción de cada elemento que constituye el circuito eléctrico del dispositivo de potencial [21].



- A: Borne primario de A.T.
- C1: Capacitor de A.T.
- C2: Capacitor de M.T.
- 1. Transformador de M.T.
- 2. Inductancia de compensación.
- 3. Inductancia de choque para la onda portadora.
- 4. Descargador.
- 5. Circuito amortiguador ferro resonante.
- 6. Borne terminal de HF.
- 7. Borne terminal de tierra N de A.T.
- 8. Borne terminal de tierra secundario.
- 9. Caja de bornes de baja tensión.
- 10. Interruptor de tierra.
- 11. Borne de tierra del tanque.
- 12. Resistencia calefactora.

Fusibles (F) del arrollamiento secundario o interruptores miniatura.

Accesorios para portadora de HF

- 13. Interruptor de tierra de HF.
- 14. Descargador de sobretensión.
- 15. Bobina.

Fig. 4.13 Circuito eléctrico del Dispositivo de Potencial [21].



La respuesta de un transformador de tensión capacitivo en régimen transitorio no es tan rápida como la de un transformador inductivo, por lo que no se recomienda su utilización cuando las exigencias de las protecciones sean las de unas respuestas rápidas por parte del transformador de tensión.

Sin embargo, además de su utilización para medida y protección, los transformadores de tensión permiten utilizar la línea en alta tensión para comunicación y telemando dada su especial capacidad para la sintonización de ondas portadoras de alta frecuencia.

Estos transformadores permiten la medición de altas tensiones y la transmisión de ondas portadoras desde 30 a 500 kHz. Trabajan simultáneamente como un transformador de tensión y un capacitor de acoplamiento de onda portadora.

De la Fig. 4.13 se puede observar que los componentes de un divisor capacitivo, son los siguientes: el capacitor de acoplamiento, el reactor de compensación, el transformador de potencial reductor, bobina de drenado y cuchilla de tierra.

De las partes antes mencionadas, sólo el capacitor de acoplamiento, la bobina de drenado y la cuchilla de tierra son los elementos útiles para el sistema de acoplamiento OPLAT. El transformador de potencial reductor y el reactor de compensación son elementos usados para las necesidades de protección y medición [21].

a) El capacitor de acoplamiento:

Es un ensamble de uno o varios módulos de capacitores conectados en serie, montados sobre un gabinete, donde van los otros elementos.

La función de este capacitor es presentar una alta impedancia a la frecuencia de la red de 60 Hz y prácticamente un corto circuito a la radio frecuencia; basado en la fórmula de la reactancia capacitiva.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4.8)$$

En donde:

f = Frecuencia

C = Capacitancia en μF

Para proporcionar un panorama más amplio se sustituyen los valores de capacidad y de frecuencia en la fórmula, se aprecia que para la frecuencia de 60 Hz y una capacidad de 4,400 μF ; la X_C (Reactancia Capacitiva) es de 603.16 k Ω , para 30 KHz es de 1,206 Ω y para la frecuencia de 500 KHz se tiene 72,3 Ω .

b) La bobina de drenado:

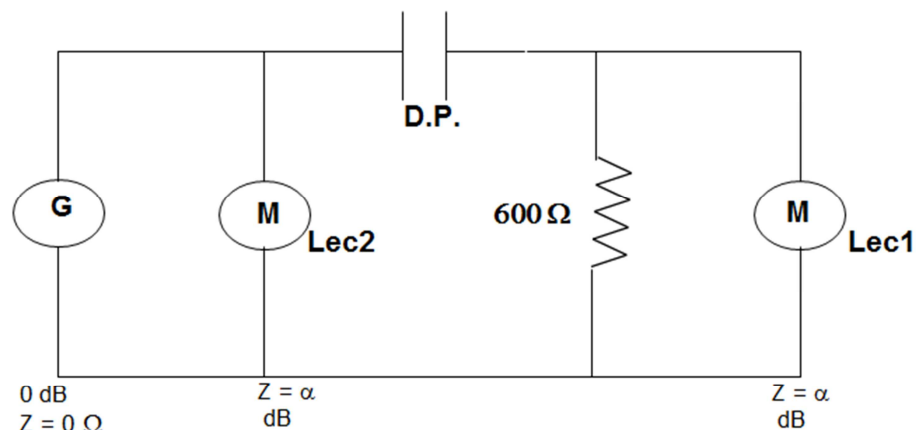
Es la bobina que va conectada del terminal de lado de baja tensión del capacitor a tierra y sirve para drenar la corriente de 60 Hz que pasa por el divisor capacitivo y a la vez le da referencia de tierra.

c) La cuchilla de tierra:

Está prevista en el divisor y sirve para proteger de la alta tensión a la persona que va a dar mantenimiento al aterrizar prácticamente la terminal de uso para OPLAT.

Desde el punto de vista de comunicaciones las especificaciones se reducen a la capacidad del divisor, que depende de la frecuencia de operación del enlace OPLAT que se va a poner en servicio [21].

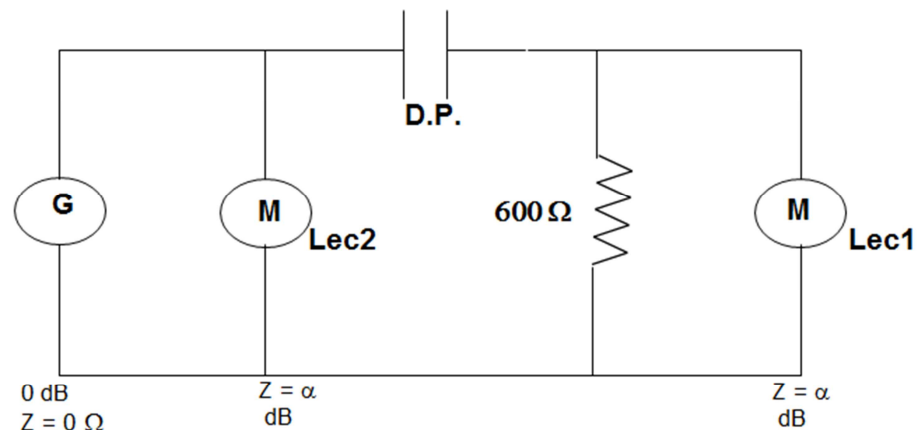
Como se puede apreciar en las figuras 4.14 y 4.15 se especifican los diagramas utilizados para llevar a cabo las pruebas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial, se observa la lectura del medidor 2 a la salida del generador para obtener un margen de error con el generador que se inserta en la tabla de respuesta en frecuencia.



RESPUESTA EN FRECUENCIA DISPOSITIVO DE POTENCIAL

LUGAR:	S.E CZM	MARCA:	ABB
LINEA:	A3U40	SERIE:	1HSE8708702
COLATERAL:	S.E TCL	VALOR:	4400 pF
FASE:	B	FECHA:	03-jul-13
REALIZO:	COMUNICACIONES	RESIST. MEDIDOR:	600 Ω

Fig. 4.14 Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial Fase "B".



RESPUESTA EN FRECUENCIA DISPOSITIVO DE POTENCIAL

LUGAR:	S.E CZM	MARCA:	ABB
LINEA:	A3U40	SERIE:	1HSE8708703
COLATERAL:	S.E TCL	VALOR:	4400 pF
FASE:	C	FECHA:	03-jul-13
REALIZO:	COMUNICACIONES	RESIST. MEDIDOR:	600 Ω

Fig. 4.15 Diagrama para pruebas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial Fase "C".

En las Figuras 4.16 y 4.17 se muestran las gráficas de Impedancia, donde se puede observar que al incrementar la frecuencia en intervalos de 10 KHz, el nivel de la Impedancia disminuye el comportamiento inverso en la Trampa de Onda, esto es debido a la respuesta en frecuencia esperada por la Reactancia Capacitiva.

Cálculo de la Reactancia Capacitiva (X_C) en un Dispositivo de Potencial de la ecuación (4.8).

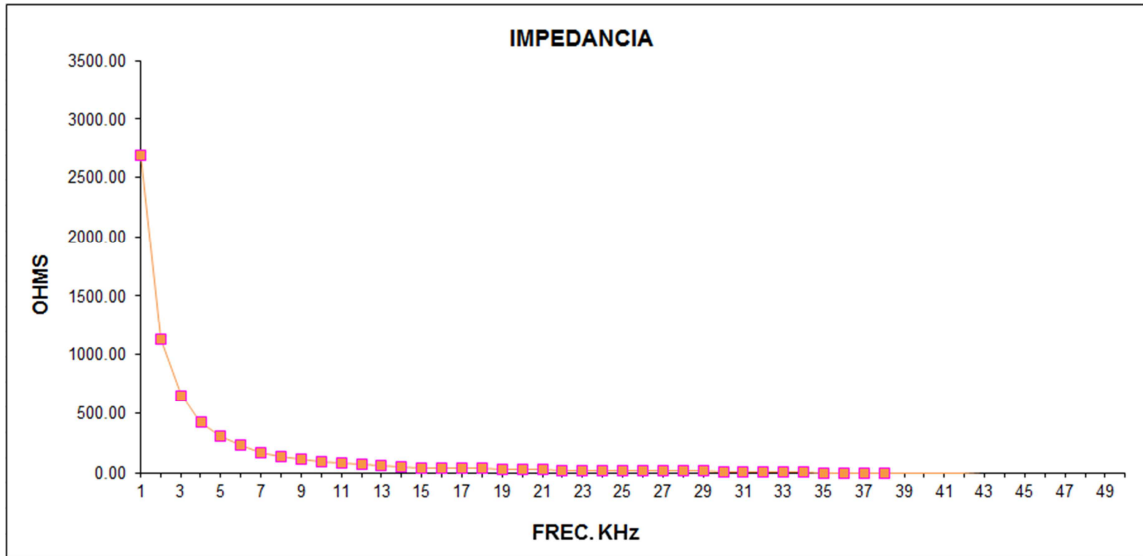


Fig. 4.16 Gráficas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial fase "B".

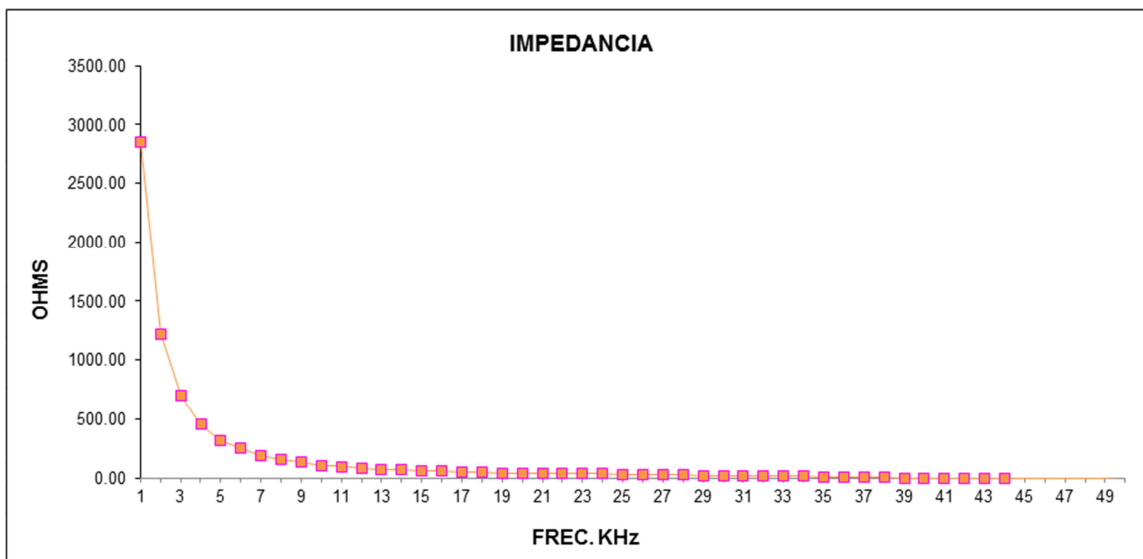


Fig. 4.17 Gráficas de respuesta en frecuencia del Dispositivo de Potencial fase "C".
(Anexo "D").

4.2.3 Cable de Radio Frecuencia

CABLE DE RADIO FRECUENCIA

Tipos de cable de RF:

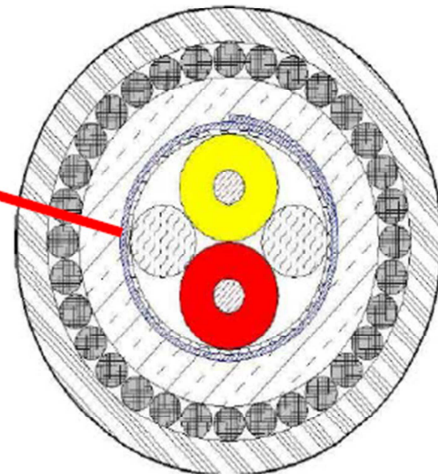
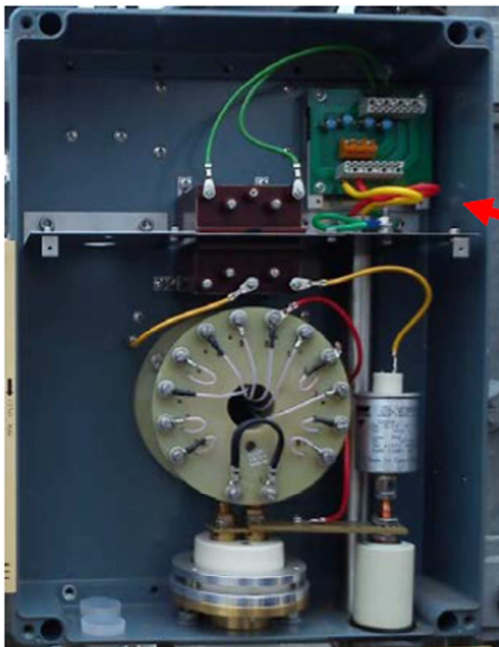
- a) Simétrico 150 Ω .
- b) Coaxial 75 Ω .

Las características eléctricas que describen el comportamiento de una señal eléctrica en un cable conductor son: Impedancia y Capacitancia.

La impedancia es la suma de las contribuciones resistivas de cada una de las tres características: inductiva, capacitiva y resistiva del cable, que se oponen al paso de las señales analógicas. La impedancia se expresa en Ohm.

La capacitancia es la capacidad medida por una longitud del cable. Normalmente se expresan en pF/m.

En las Figuras 4.18 y 4.19 se muestran la correcta conexión del cable de R.F. al filtro de acoplamiento así como la construcción interna del cable y sus características eléctricas del mismo.



Principle drawing
A-02YS(L)2YBY 1x2x1,4 (R1,4 vzk)

Fig. 4.18 Conexión del cable de Alta Frecuencia dentro de una unidad AKE 100.

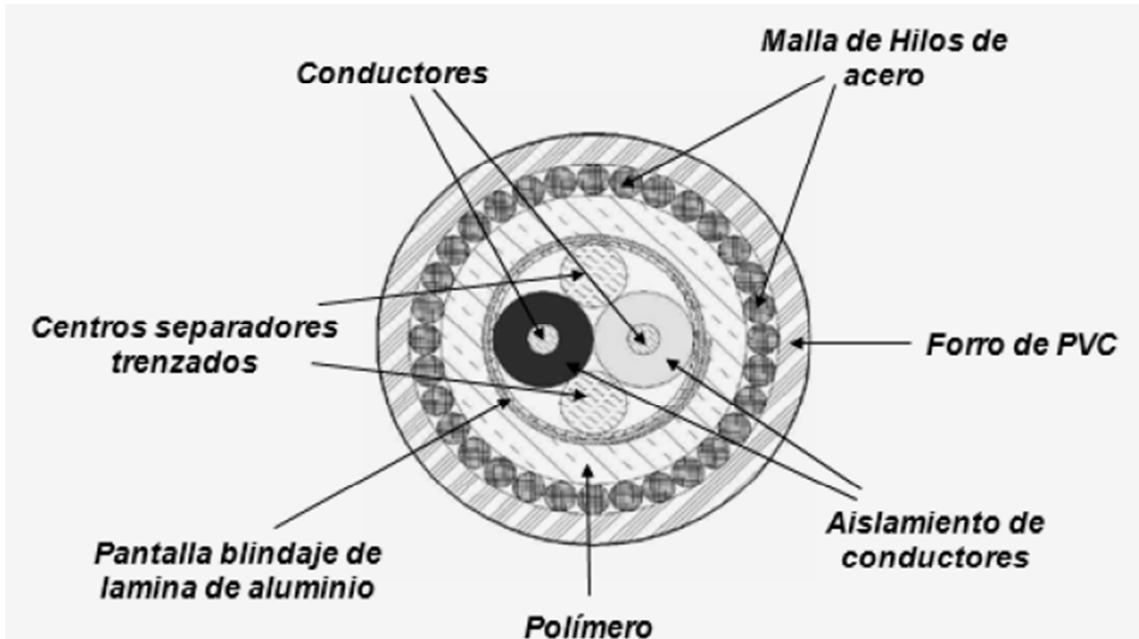


Fig. 4.19 Características eléctricas del cable de RF de 150 Ω .

[21].

4.2.4 Filtro de acoplamiento

UNIDAD DE ACOPLAMIENTO

La Unidad de acoplamiento es un dispositivo constituido por un conjunto de elementos pasivos, que en conjunto con los DPC (Dispositivo de Potencial Capacitivo) y TPC (Transformadores de Potencial Capacitivo) forman un filtro sintonizado pasa alto y que dependiendo del valor del capacitor de acoplamiento tiene una frecuencia de corte y permite la máxima transmisión de energía útil de la señal de R.F.

Adicionalmente cuenta con los dispositivos para protección de sus elementos internos evitando la mayoría de las descargas y sobre tensiones hacia el equipo de comunicaciones.

Este dispositivo de acoplamiento va situado entre el condensador de acoplamiento y el cable de RF que une al terminal de radio OPLAT. Dicho dispositivo, asociado con el condensador de acoplamiento nos asegura:

1) Una transmisión eficaz de señales portadoras entre el circuito de conexión, o cable de R.F. y la línea de energía.



2) La seguridad del personal y la protección de las partes de baja tensión de la instalación contra los efectos de la tensión a la frecuencia de red y las sobretensiones provocadas por cualquier tipo de disturbio.

Estos dispositivos deben ofrecer un funcionamiento seguro ante la exposición al agua, aire, sol, hielo, nieve, etc.

PARAMETROS PRINCIPALES:

Atenuación: $< 0.8 \text{ dB}$ (0.09 Np)

Descargador Primario: $= 2 \text{ Kv}$

Bobina de Derivación: $< 1 \Omega$

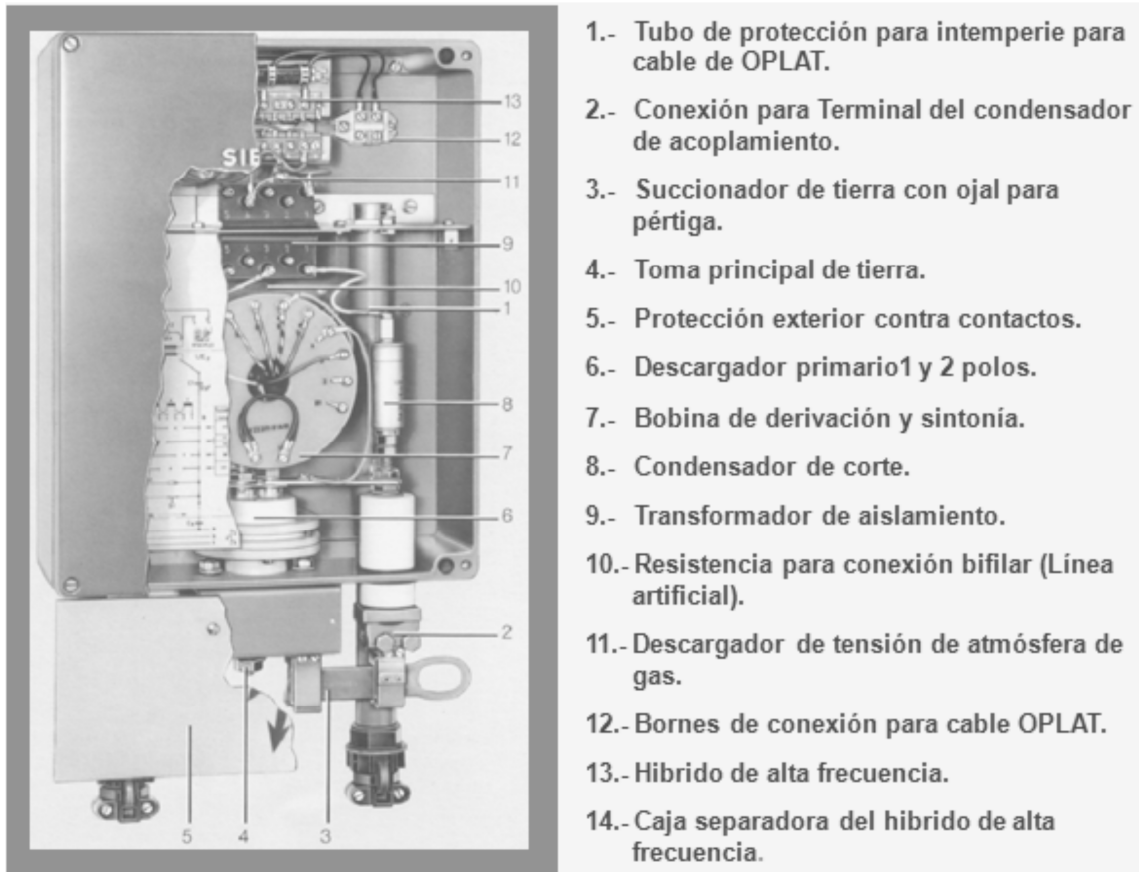
Descargador de Sobretensión $= 350 \text{ V}$

Transformador de Aislamiento o acoplamiento $= 75 \text{ ó } 150 \Omega$

[21].

La Fig. 4.20 muestra la descripción detallada de los elementos que conforman el filtro de acoplamiento.

ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO DE ACOPLAMIENTO.



- 1.- Tubo de protección para intemperie para cable de OPLAT.
- 2.- Conexión para Terminal del condensador de acoplamiento.
- 3.- Succionador de tierra con ojal para pértiga.
- 4.- Toma principal de tierra.
- 5.- Protección exterior contra contactos.
- 6.- Descargador primario 1 y 2 polos.
- 7.- Bobina de derivación y sintonía.
- 8.- Condensador de corte.
- 9.- Transformador de aislamiento.
- 10.- Resistencia para conexión bifilar (Línea artificial).
- 11.- Descargador de tensión de atmósfera de gas.
- 12.- Bornes de conexión para cable OPLAT.
- 13.- Hibrido de alta frecuencia.
- 14.- Caja separadora del hibrido de alta frecuencia.

Fig. 4.20 Elementos de la unidad de acoplamiento

En la Fig. 4.21 se presentan los tipos de enlaces que se utilizan para comunicar los equipos OPLAT.

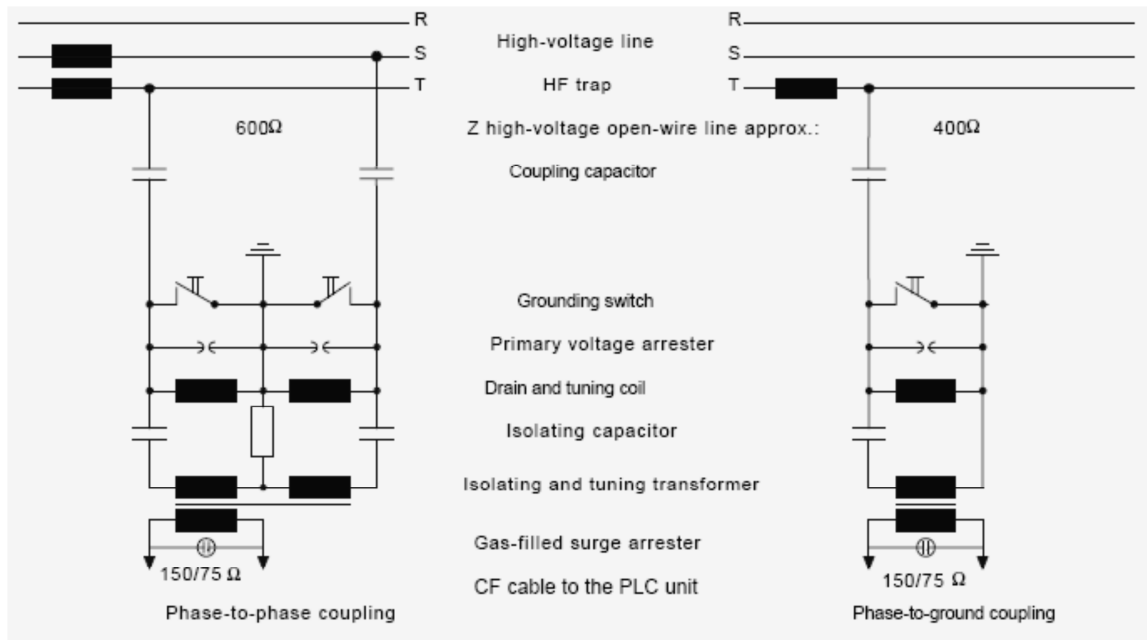


Fig. 4.21 Acoplamiento entre fases y fase a tierra de la L.T.

Diseño mecánico del AKE 100

- a) **Unidad de Sintonía:** Destinada a compensar la componente reactiva de la impedancia de los condensadores de acoplamiento de forma que se favorezca la transmisión eficaz de las señales a las frecuencias portadoras.
- b) **Transformador de Acoplamiento:** Es el elemento que permite la adaptación de impedancias entre la línea de energía y el cable de R.F. así como proporciona el aislamiento galvánico entre los bornes primarios y secundarios del dispositivo de acoplamiento. Algunas veces, el primario de este transformador sirve para drenar a tierra la corriente a la frecuencia de la red, funcionando como bobina de drenaje.

Es el elemento más importante de la unidad de acoplamiento. Presenta un **aislamiento confiable de 10 KV entre el lado de alta tensión y el de los equipos OPLAT del filtro de acoplamiento** y origina la adaptación deseada de la impedancia entre la línea de alta tensión y el cable de R.F. Admisible a la frecuencia de la red del transformador de aislamiento.

- c) **Bobina de Drenado:** Es el elemento que efectúa la conducción a tierra de la corriente a la frecuencia de la red, derivada por los condensadores de acoplamiento.
- d) **Descargador Primario:** Efectúa la limitación de las sobretensiones transitorias que provienen de la línea de energía y que se presentan en los bornes del dispositivo de acoplamiento. Algunas veces se colocan descargadores de gas en el secundario del transformador de acoplamiento para disminuir las sobretensiones hacia el equipo.
- f) **Cuchilla de Tierra:** Es el elemento que asegura la puesta a tierra directa y eficaz de los bornes primarios del dispositivo de acoplamiento para efectos de mantenimiento y pruebas [21].

Para las definiciones de características de impedancia nominal lado equipo y lado línea, ancho de banda de operación, potencia nominal de cresta, atenuación de desadaptación y compuesta, se pueden ver las recomendaciones del CCITT (Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico), referente a estos dispositivos.

Tipos de Acoplamiento.

En las figuras 4.22 y 4.23 se muestra el diagrama del filtro de acoplamiento de fase a tierra y su conexión en el A3.

Acoplamiento fase a tierra.

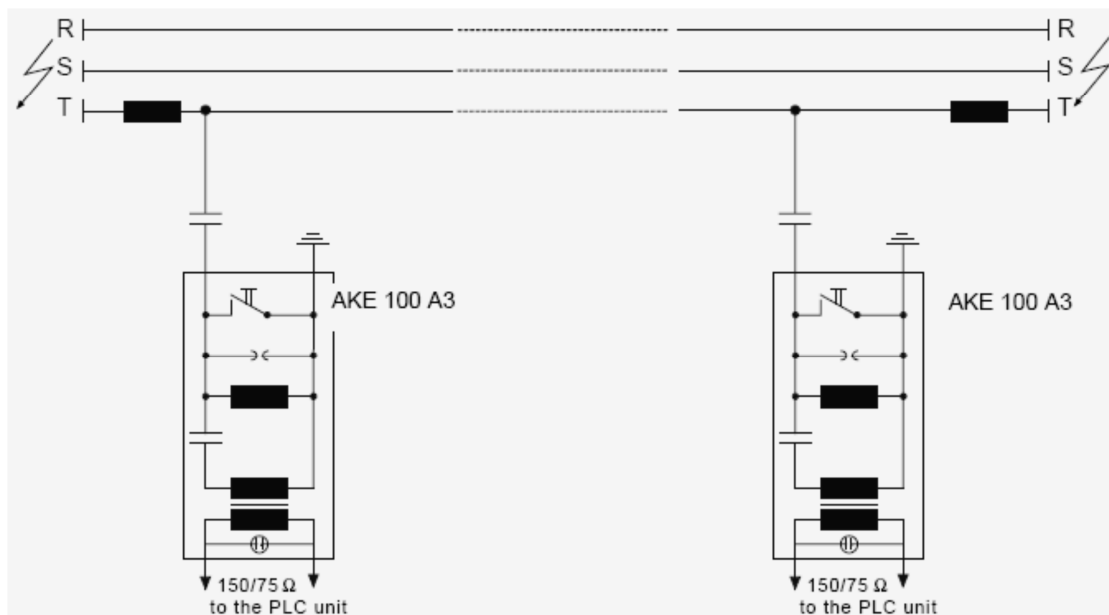


Fig. 4.22 Diagrama de acoplamiento de fase a tierra de la L.T.

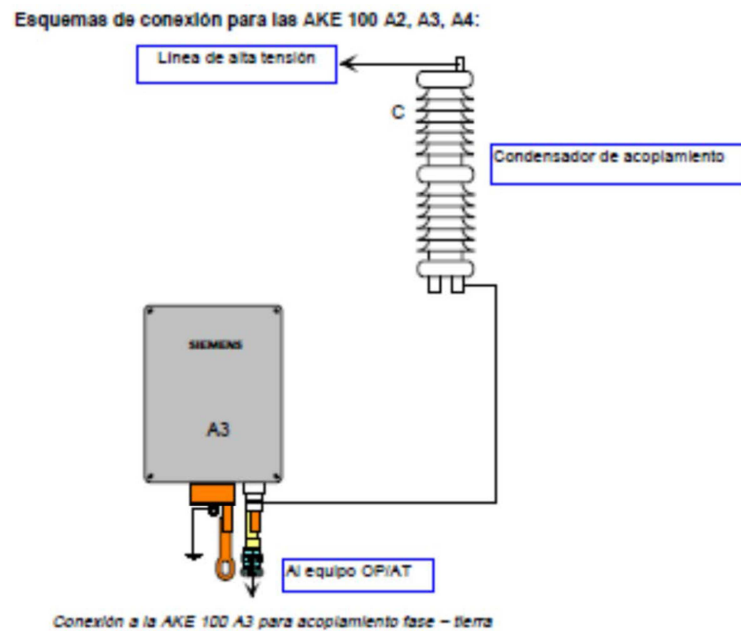


Fig. 4.23 Conexión del AKE 100 A3 para acoplamiento fase-tierra.

En las figuras 4.24 y 4.25 se muestra el diagrama del filtro de acoplamiento entre fases y su conexión en el A2, A3 o A4.

Acoplamiento fase a fase.

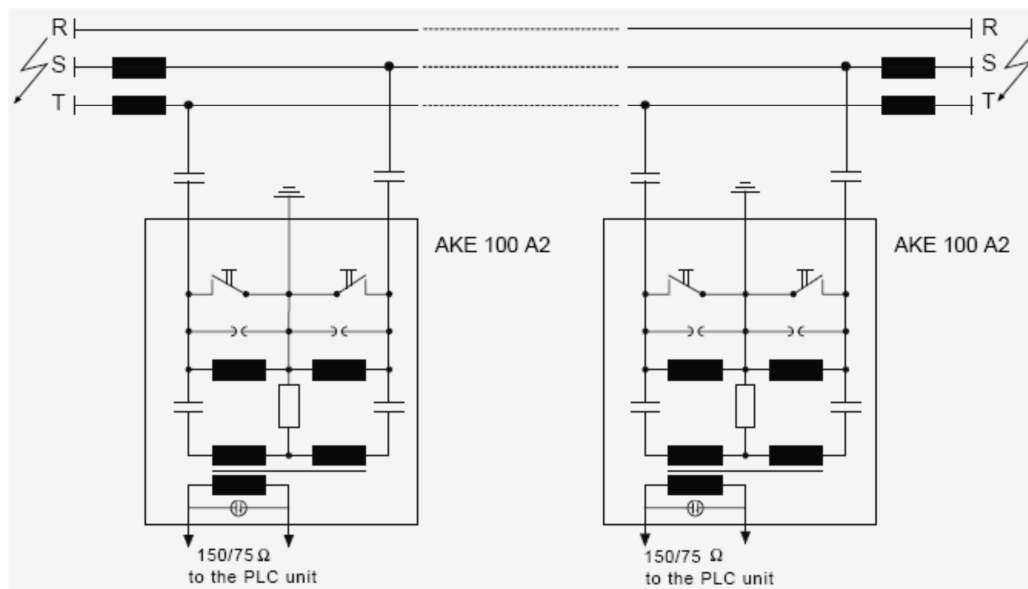


Fig. 4.24 Diagrama de acoplamiento entre fases de la L.T.

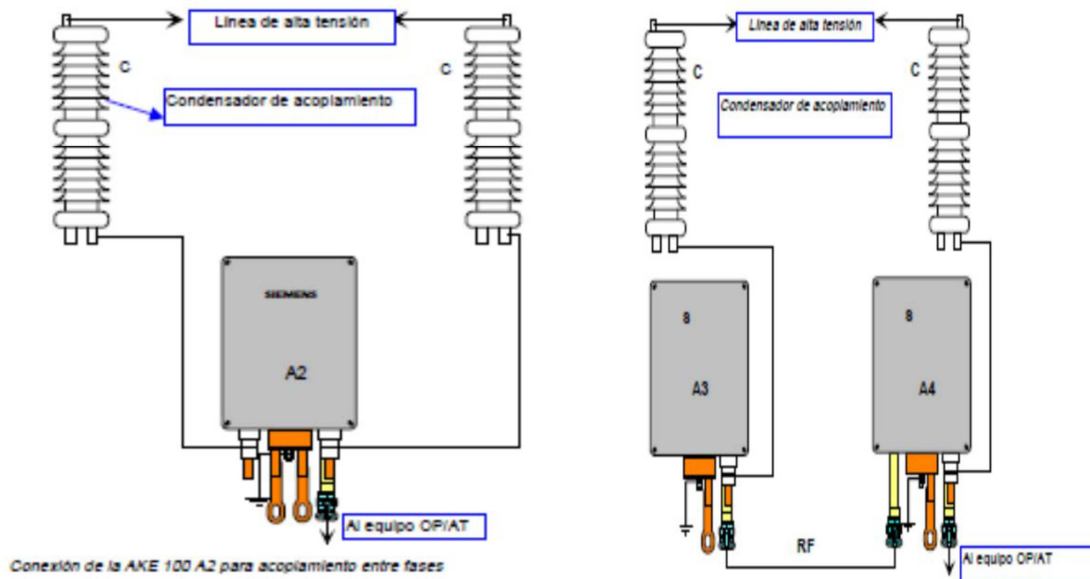


Fig. 4.25 Conexión del AKE 100 A2 o A3 a A4 para acoplamiento fase a fase.

En las figuras 4.26 y 4.27 se muestran los diagramas del filtro de acoplamiento entre fases y su conexión en el A3 mediante un filtro Híbrido A1.

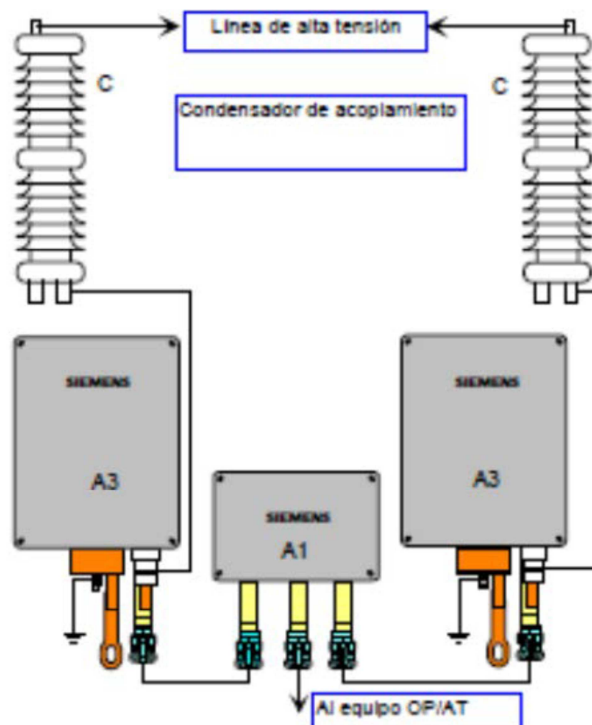


Fig. 4.26 Conexión del AKE 100 A3 para acoplamiento fase a fase.

**ACOPLAMIENTO INTERSISTEMAS:
Acoplamiento Inter-sistemas**

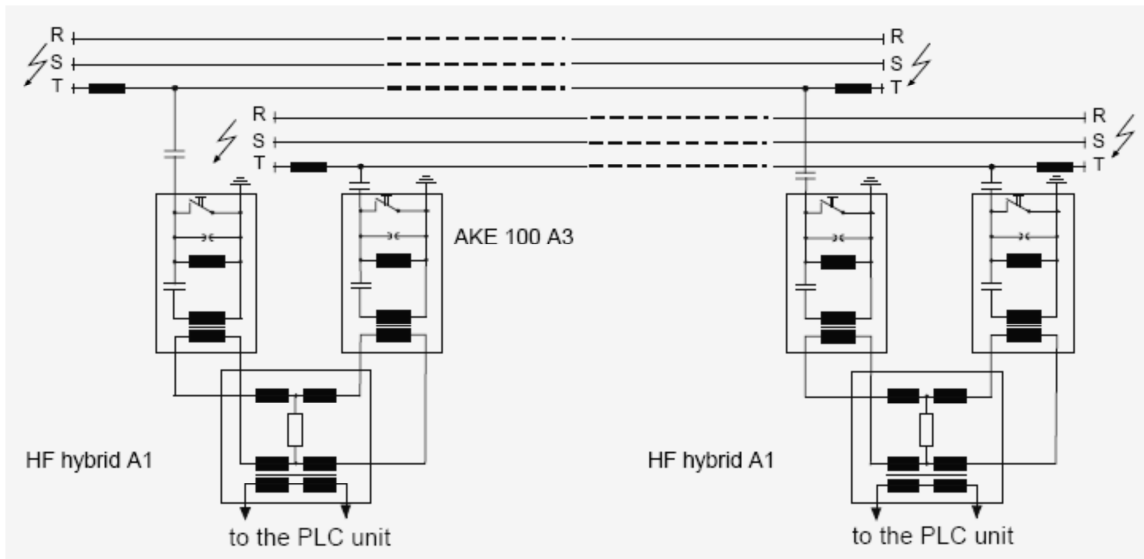


Fig. 4.27 Acoplamiento Inter-sistemas.

Comparativos de las variables costo, atenuación y seguridad para los tres tipos de acoplamientos [21].

La tabla 1.3 muestra las ventajas y desventajas propias de cada acoplamiento para ser consideradas en un enlace Oplat.

Tipo de acoplamiento	costo	Atenuación	Seguridad de la transmisión
1.-Fase a Tierra	mínimo	Mayor que 2	No garantizado si un conductor de acople se daña
2.-Fase a Fase	Doble inversión	Menor que 1	Garantizado si un conductor de acople se daña
3.-Intersistemas	Doble inversión	Menor que 1	También garantizado en caso de corto circuito y puesta a tierra de un sistema en la línea.

Tabla 1.3 Comparación de los tipos de acoplamientos.



4.3 PROGRAMA DE SIMULACIÓN ATP/Draw

Las simulaciones del presente trabajo se realizarán en el programa para transitorios electromagnéticos ATP/Draw, es un programa para computador digital usado para transitorios en sistemas de potencia.

Para la simulación del sistema de potencia el programa posee varios modelos para una representación adecuada de los diferentes elementos que lo componen. Los modelos disponibles se pueden clasificar en:

- Modelos constituidos por elementos concentrados RLC. Estos modelos pueden ser simples ramas RLC serie, circuitos PI polifásicos que pueden representar líneas de transmisión o transformadores.
- Modelo de onda viajera para representar adecuadamente una Línea o un cable.
- Impedancias de tipo no lineal: resistencias no lineales, inductancias no lineales, resistencias variables con el tiempo.
- Interruptores ideales controlados por tiempo. Interruptores controlados por voltaje para simulación de "gaps" flameos en aisladores. Diodos y tiristores. Interruptores de acción estadística.
- Fuentes de voltaje y corriente ideales de tipo escalón, sinusoidal, rampa, exponencial y definidas punto a punto.
- Modelo completo para la máquina síncrona.
- Modelo universal de máquina eléctrica que permite representar doce tipos de máquinas diferentes.

El área de trabajo del ATP/Draw se muestra en la Fig. 4.28, en ella se forma el circuito a estudiar. Las Figuras 4.29 y 4.30 muestran el menú de ajustes de datos de simulación.

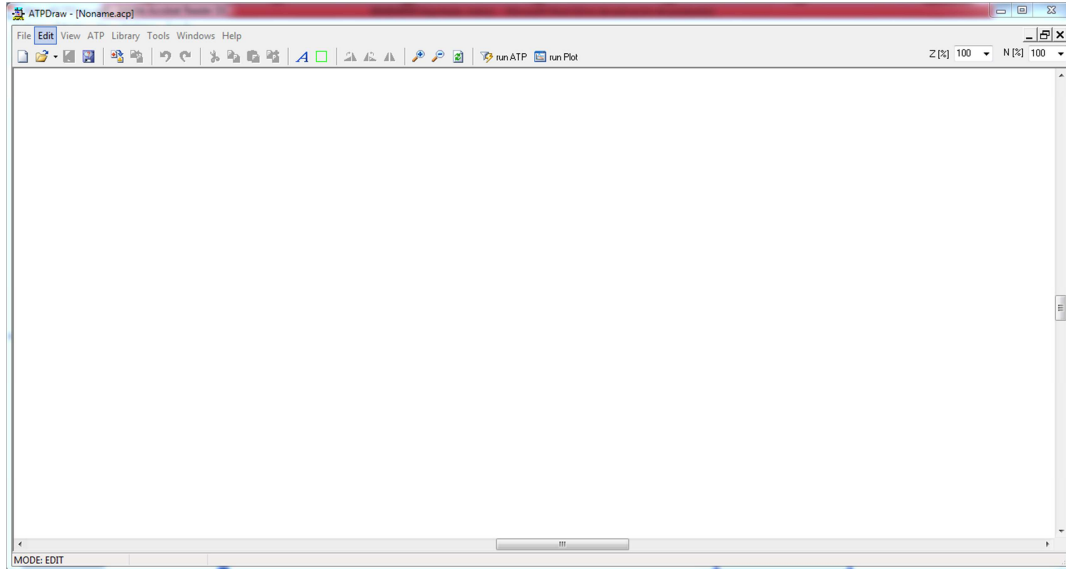


Fig. 4.28 Interfaz gráfica del programa de simulación ATP.

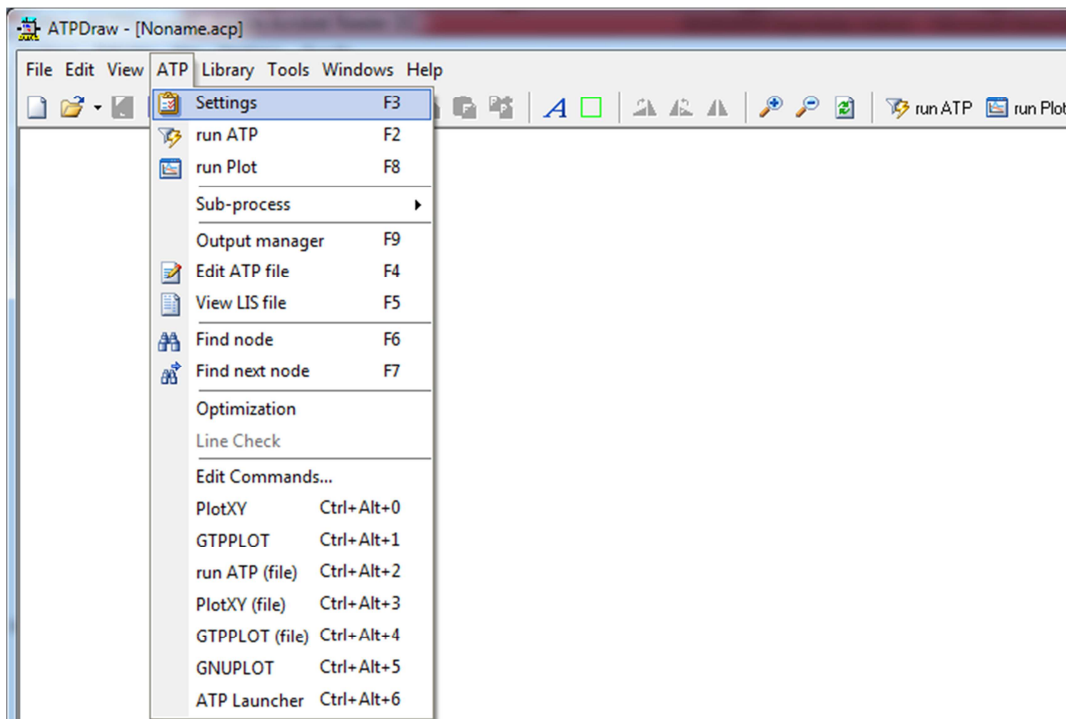


Fig. 4.29 Ajustes generales de simulación del programa ATP.

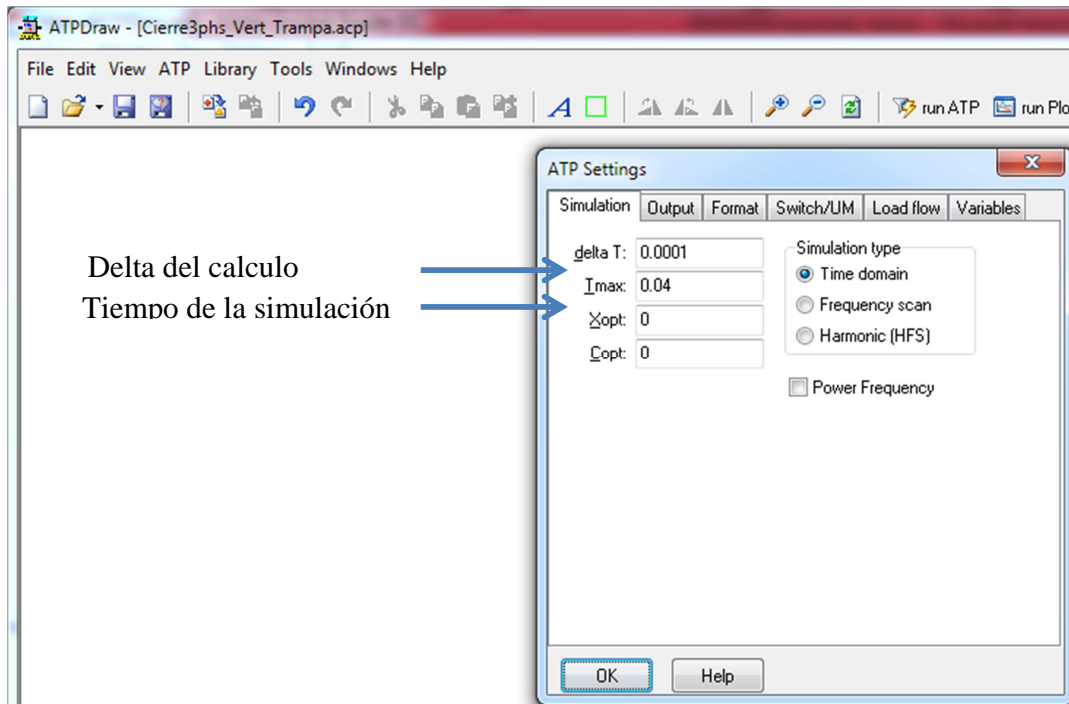


Fig. 4.30 Parámetros de simulación en ATP.

Para insertar un elemento del circuito a simular, se ejecuta sobre el espacio de trabajo la operación correspondiente, por consiguiente se muestra el menú de componentes: (*Component selection menu*), para ejemplificar de forma correcta se procede a insertar una fuente AC tipo 14 por lo cual se dirige a: *Sources>AC tipe 14*

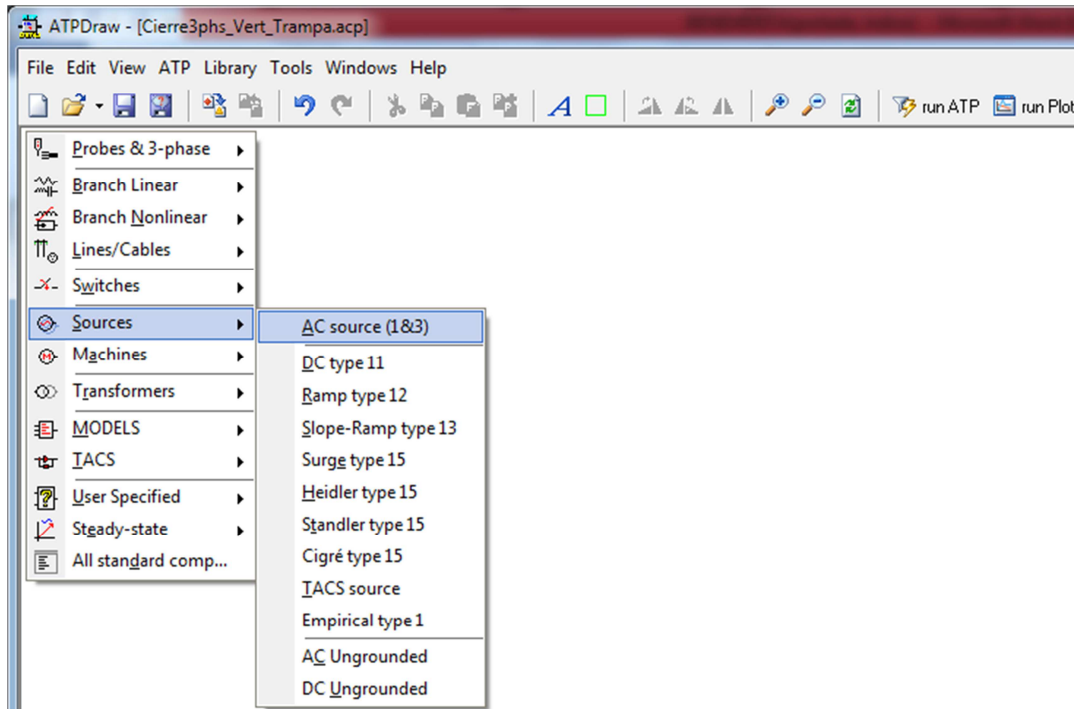


Fig. 4.31 Integración de fuentes para la simulación del circuito.

Los datos de la fuente se muestran en la Fig. 4.32, colocando el nivel de voltaje del sistema y la frecuencia como datos de entrada principales.

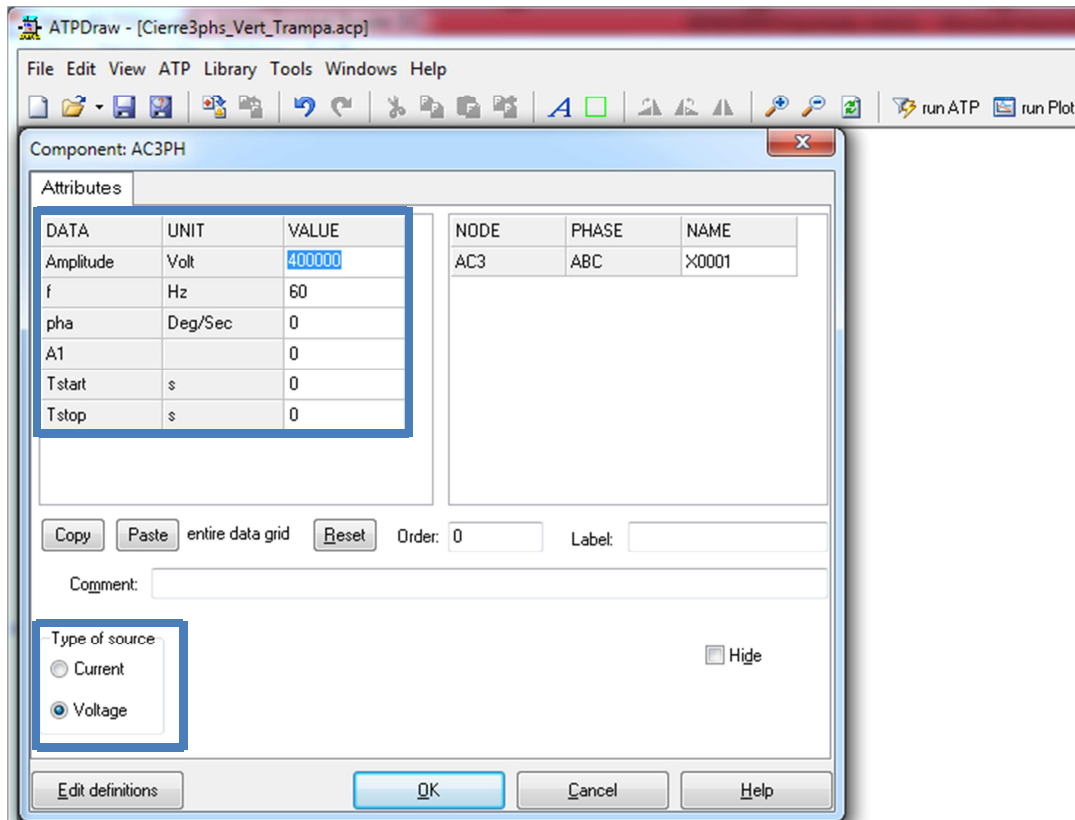


Fig. 4.32 Parámetros para la fuente de voltaje CA tipo 14.

Los parámetros para la fuente tipo 14 son:

- *Amp*: Ingresa el valor pico en [Ampers] o [Volts] depende del tipo de fuente.
- *f*: Frecuencia en [Hertz].
- *pha*: Fase de la fuente en grados o segundos depende del valor “A1”.
- *A1*: Si el valor es cero, la fase se proporciona en grados, si el valor es mayor que cero la fase se proporciona en segundos.
- *Tsta*: Tiempo de encendido de la fuente [segundos].
- *Tsto*: Tiempo de apagado de la fuente [segundos].
- *Type of source*: Se elige si la fuente es de Tensión o Corriente.

En el menú: *Branch Linear*, como se muestra en las figuras 4.33 y 4.34 se encuentran los elementos lineales y no lineales, resistencias, bobinas y condensadores, etc.

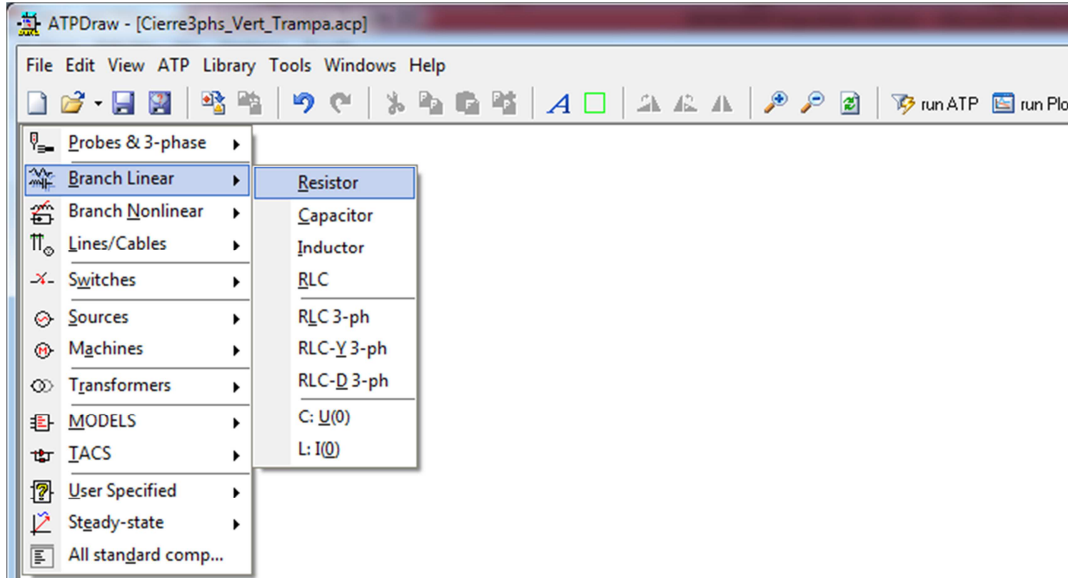


Fig. 4.33 Integración de parámetros eléctricos en ATP/Draw.

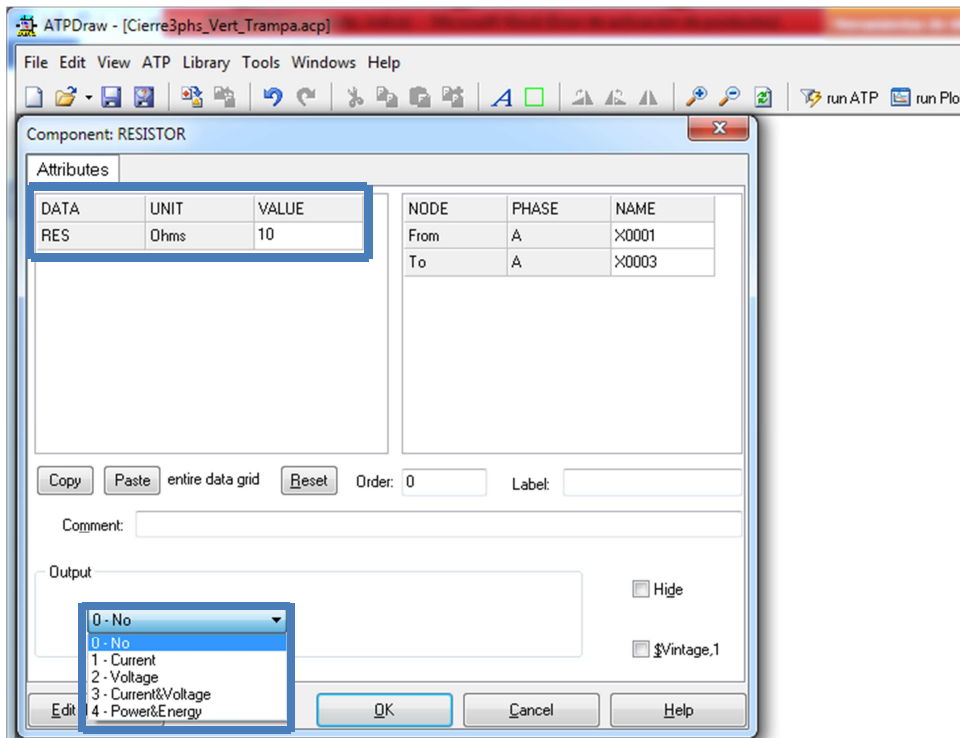


Fig. 4.34 Parámetros de ajuste de los elementos resistivos.

Los parámetros para el modelo J. Marti se enumeran a continuación y se muestran en la Fig. 4.35:

- *System type*: Se introduce la selección “overhead line” línea area.
- *#Ph*: El número de fases del sistema de potencia.
- *Skin effect*: Se selecciona el efecto Skin de la L.T.
- *Real Transf. Matrix*: Se selecciona la Matriz Real de Transformación.
- *Units: Unidades Metricas*.
- *Model*: Se selecciona modelo J. Marti.
- *Rho*: Es la resistividad de la tierra de la L.T. en [ohms*m].
- *Freq. Init.:* Frecuencia inicial del sistema en [Hz].
- *Length*: Distancia de la L.T. a simular en [Km].
- *Decades*: Frecuencia inicial y # de muestras por década.
- *Points/dec.:* # de muestras por década.
- *Freq. Matrix*: Frecuencia de cálculo para la Matriz en [Hz].
- *Freq. SS*: Frecuencia del Sistema de Potencia en [Hz].

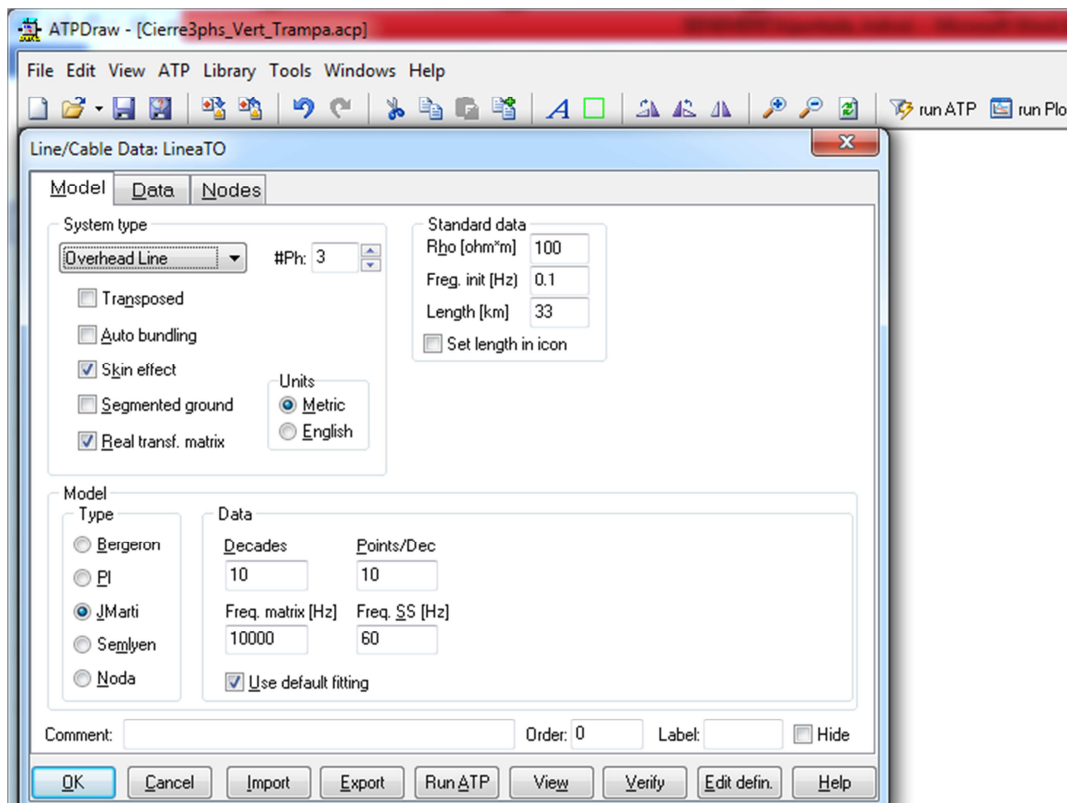


Fig. 4.35 Parámetros de ajuste del modelo J. Marti de la L.T.

Disposición geométrica, los datos de los conductores se enuncian a continuación y se muestran en la Fig. 4.36:

- *Ph. no.:* Número de fases del sistema.
- *Rin:* Radio interior del conductor en [cm].
- *Rout:* Radio externo del conductor en [cm].
- *Resis:* Impedancia de la L.T. en [ohm/Km].
- *Horiz:* Disposición horizontal de los conductores en [m].
- *Vtower:* Disposición vertical de la torre en [m].
- *Vmid:* Altura vertical media de la torre en [m]. “consideración de la catenaria”

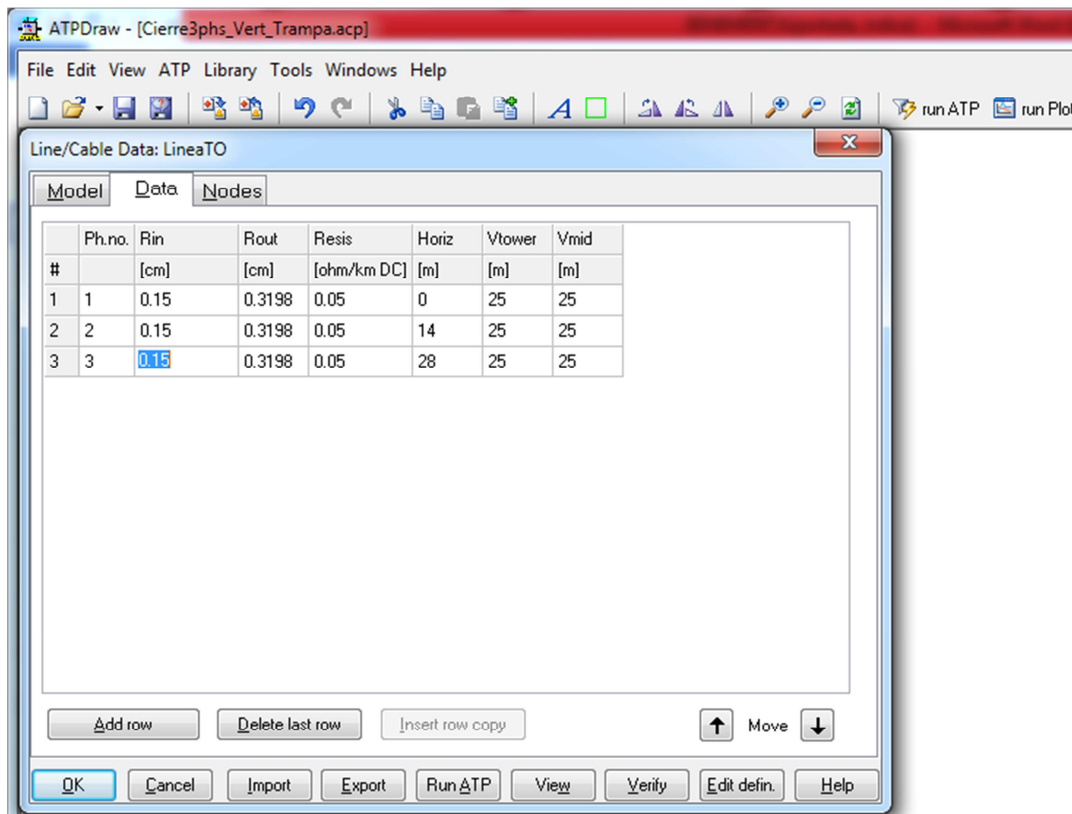


Fig. 4.36 Disposición geométrica y datos de los conductores para simulación del modelo J. Marti de la L.T.



Terminado el circuito, se genera el archivo necesario para correr la simulación, esto se realiza desde el menú *ATP>run ATP* como se muestra en la Fig. 4.37.

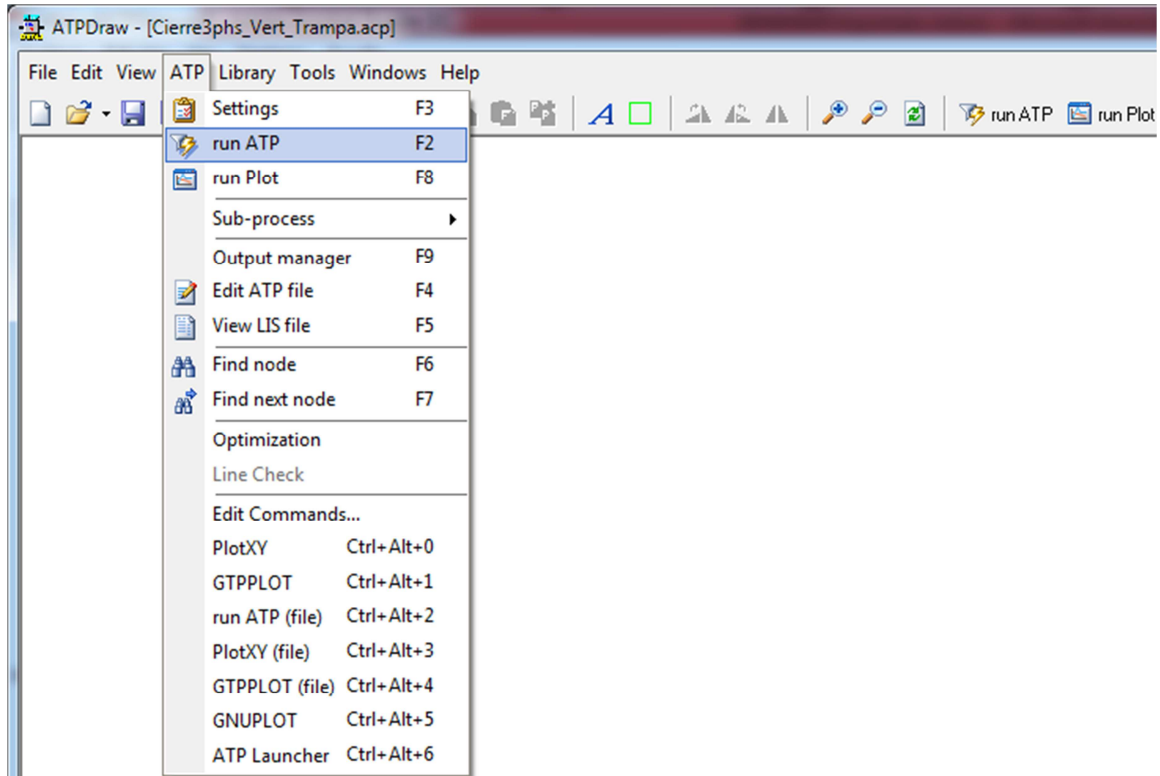


Fig. 4.37 Procedimiento para iniciar la simulación en ATP.



Después de realizar el proceso anterior muestra una consola que indica el avance de la simulación como lo muestra la Fig. 4.38.

```

ATPDraw - [Cierre3phs_Vert_Trampa.acp]
File Edit View ATP Library Tools Windows Help
CAPROGRA~1\ATP\tools\runATP.exe
39980 .03998 372428.167 -325653.62 -46346.249
39982 .039982 372607.139 -325745.83 -46410.577
39984 .039984 372781.746 -325834.23 -46474.582
39986 .039986 372951.633 -325918.95 -46537.825
39988 .039988 373116.439 -326000.09 -46599.85
39990 .03999 373275.802 -326077.8 -46660.194
39992 .039992 373429.361 -326152.21 -46718.386
39994 .039994 373576.754 -326223.46 -46773.949
39996 .039996 373717.626 -326291.69 -46826.406
39998 .039998 373851.627 -326357.07 -46875.282
% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
40000 .04 373978.415 -326419.75 -46920.105

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same
as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : 535507.221 796200.529 485243.344
Times of maxima : .005233 .116E-3 .010003
Variable minima : -471236.21 -511186.05 -556696.25
Times of minima : .013926 .008068 .002095

Blank card terminating all plot cards. !BLANK PLOT
Actual List Sizes for the preceding solution follow. 01-Feb-17 15:24:28
Size 1-10: 19 22 19 3 111 0 19 339 0 0
Size 11-20: 0 3 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 953
Size 21-30: 9 45 28 0 -9999 9 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.016 0.000 0.016 -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.000 0.000 0.000
Seconds for overlays 12-15 : 0.000 0.000 0.000
Seconds for time-step loop : 0.889 0.000 0.889
Seconds after DELTAI-loop : 0.000 0.000 0.000

Totals : 0.905 0.000 0.905

ATP Finished at 15:24:28 on Wednesday, 01 February 2017
Total Execution Time was 0.90 cpu seconds

Hit any key to close this window.
    
```

Fig. 4.38 Avance de la simulación en ATP.

Para ver los resultados del análisis en el dominio del tiempo, se selecciona en el menú *ATP>Plot XY* mostrado en la Fig. 4.39.

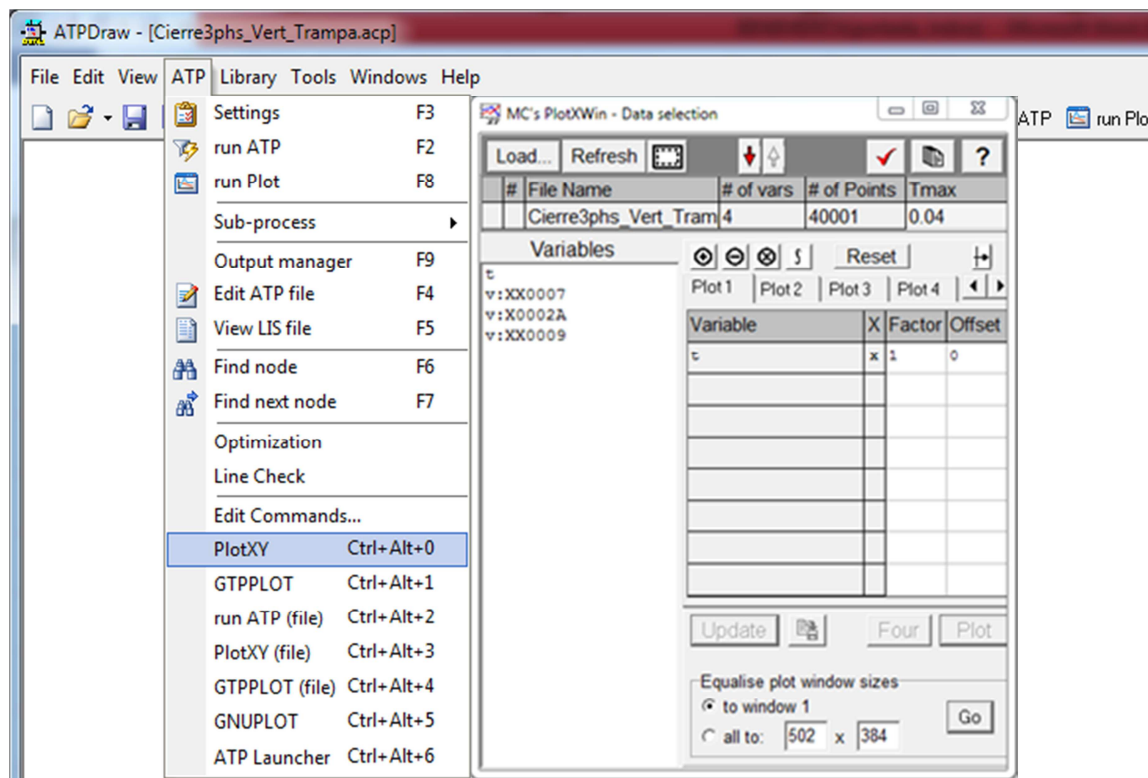


Fig. 4.39 Selección para graficar resultados en ATP.



4.4 Cálculo de la impedancia del sistema

Una vez que se tienen los elementos necesarios para realizar la simulación se procede a realizar los cálculos para obtener la impedancia del sistema mediante la potencia compleja obtenida en demanda mínima y máxima del sistema. De las Figuras (4.41), (4.42) se obtiene los valores de P y Q necesarios para los cálculos de la impedancia en demanda mínima y máxima, respectivamente.

Tenemos que:

$$P = \frac{V^2}{Z} \quad (4.9)$$

Despejando Z se tiene:

$$Z = \frac{V^2 \angle 0^\circ}{P + jQ} \quad (4.10)$$

Sustituyendo valores

$$Z = \frac{(400 \text{ KV} \angle 0^\circ)^2}{464.9 \text{ MW} - j 104 \text{ MW}} \quad (4.11)$$

$$Z = \frac{(400 \text{ KV} \angle 0^\circ)^2}{476.4 \angle -12.6 \text{ MW}} \quad (4.12)$$

$$Z = \frac{(1.6 \times 10^{11} \angle 0^\circ)^2}{476.4 \angle -12.6 \text{ MW}} \quad (4.13)$$

En demanda mínima

$$Z = 335.85 \angle 12.6^\circ \Omega \quad (4.14)$$

$$Z = 327 + j 73 \Omega \quad (4.15)$$

Sustituyendo valores

$$Z = \frac{(400 \text{ KV} \angle 0^\circ)^2}{496 \text{ MW} - j 113 \text{ MW}} \quad (4.16)$$

$$Z = \frac{(400 \text{ KV} \angle 0^\circ)^2}{508.7 \angle -12.8 \text{ MW}} \quad (4.17)$$

$$Z = \frac{(1.6 \times 10^{11} \angle 0^\circ)^2}{508.7 \angle -12.8 \text{ MW}} \quad (4.18)$$

En demanda máxima

$$Z = 314.5 \angle 12.8^\circ \quad (4.19)$$

$$Z = 306.6 + j 69.67 \Omega \quad (4.20)$$

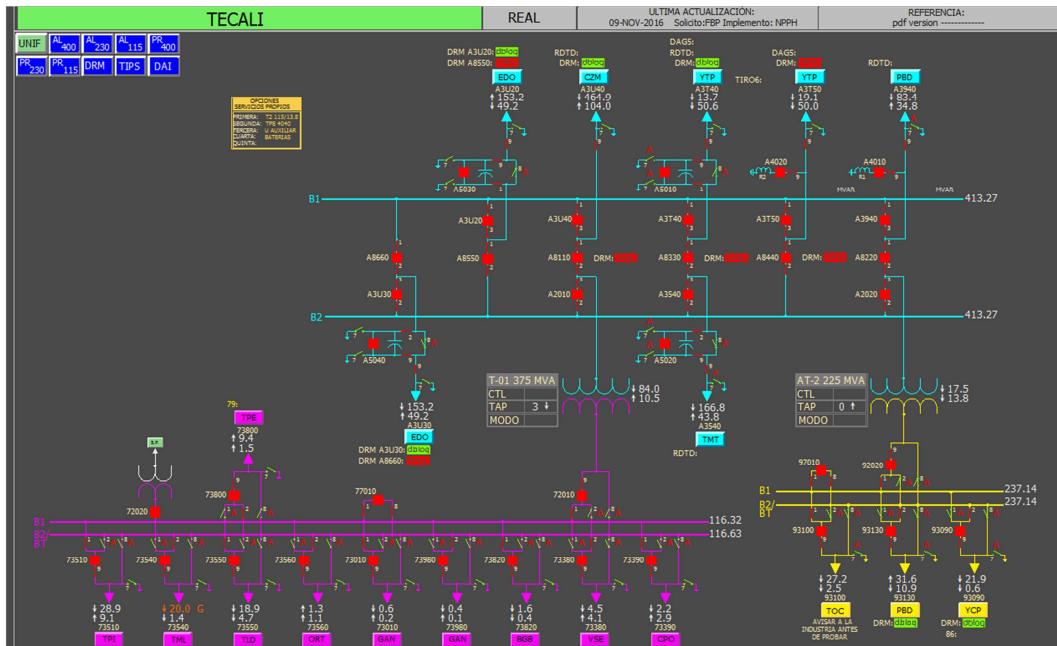


Fig. 4.42 Flujo de potencia L.T. TCL -A3U40- CZM del día 25 de Enero de 2017 a las 16:00 horas en demanda mínima.

En las figuras 4.43 y 4.44 se muestra el diagrama unifilar de la SE. CZM (Cruz-Azul Maniobras) con el flujo de potencia en demanda mínima y máxima.

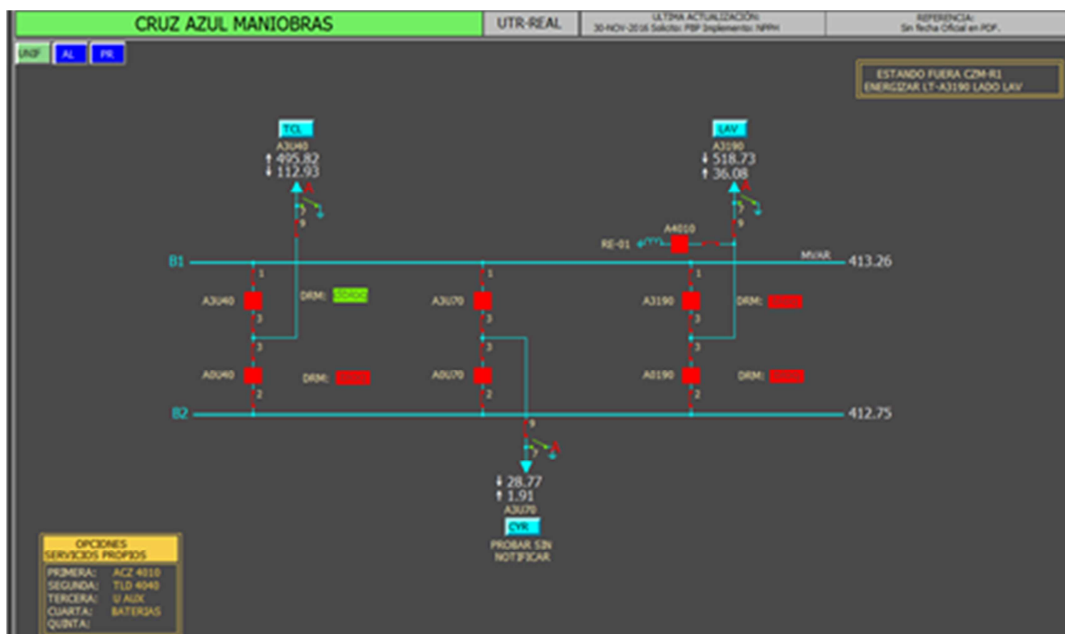


Fig. 4.43 Flujo de potencia L.T. CZM -A3U40- TCL del día 25 de Enero de 2017 a las 18:00 horas en demanda máxima.

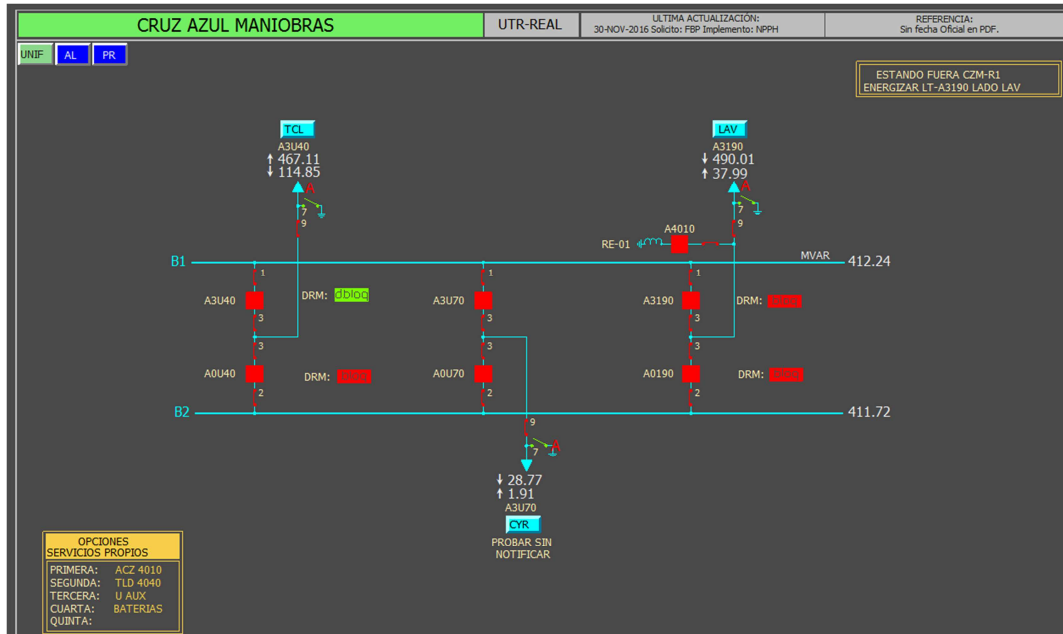


Fig. 4.44 Flujo de potencia L.T. C.ZM -A3U40- TCL del día 25 de Enero de 2017 a las 16:00 horas en demanda mínima.

Los principales enlaces del sistema eléctrico nacional y la ubicación e interacción de la línea TCL-A3U40-CZM con respecto al resto del sistema, se muestra en la Fig. 4.45

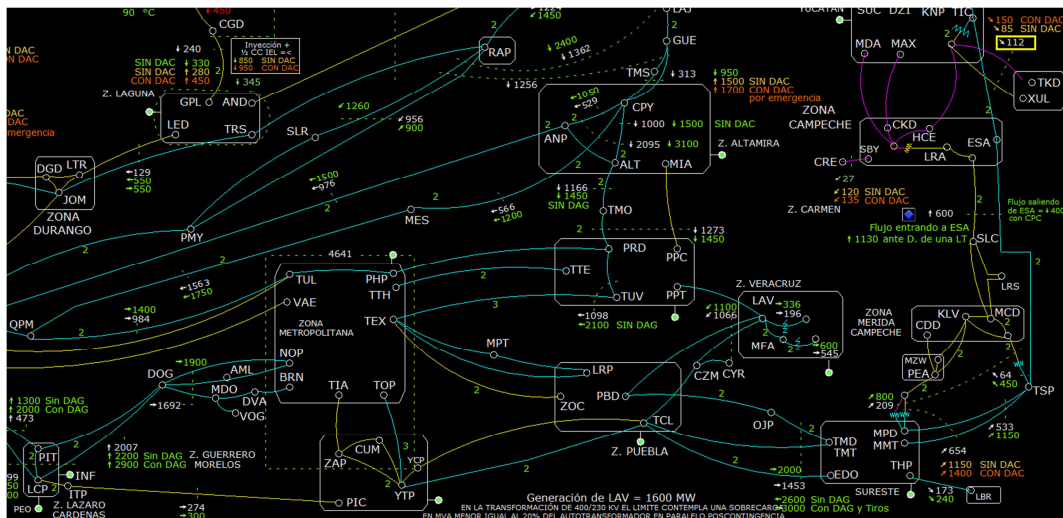


Fig. 4.45 Diagrama unifilar SEP con generación en LAV de 1600 MW cortesía de CENALTE.

El comportamiento de flujo de potencia de la línea en un intervalo de una semana, se muestra en la Fig. 4.46, donde también se puede apreciar el incremento y disminución de la demanda de potencia.

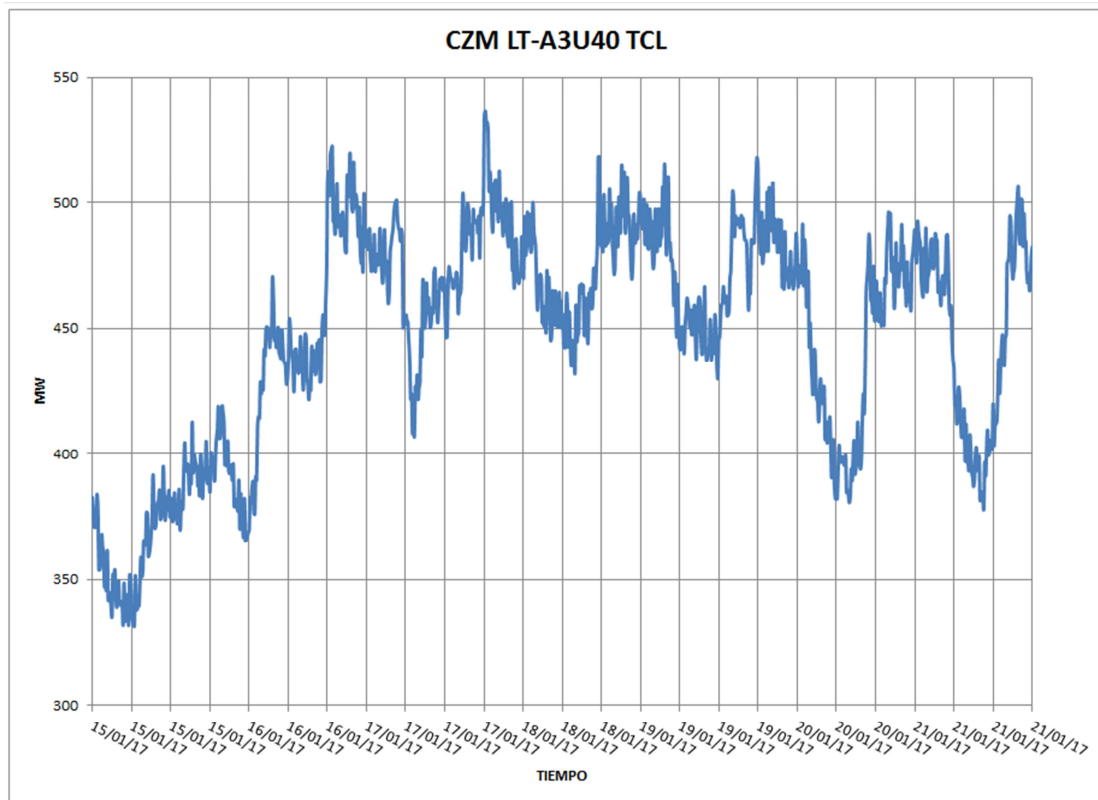


Fig. 4.46 Comportamiento del flujo de potencia durante la semana del 15 al 21 de enero del 2017 L.T. TCL-A3U40-CZM.

4.5 SIMULACIONES EN ATP/Draw

Los datos de entrada y su disposición geométrica para la simulación de la línea TCL-A3U40-CZM se muestran en las figuras 4.47 y 4.48.

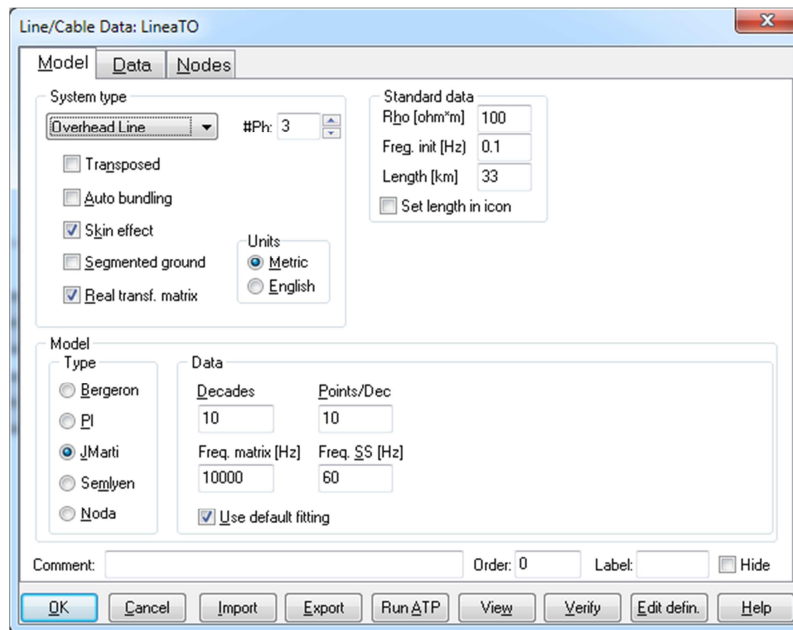


Fig. 4.47 Ingreso de los datos reales para realizar la simulación.

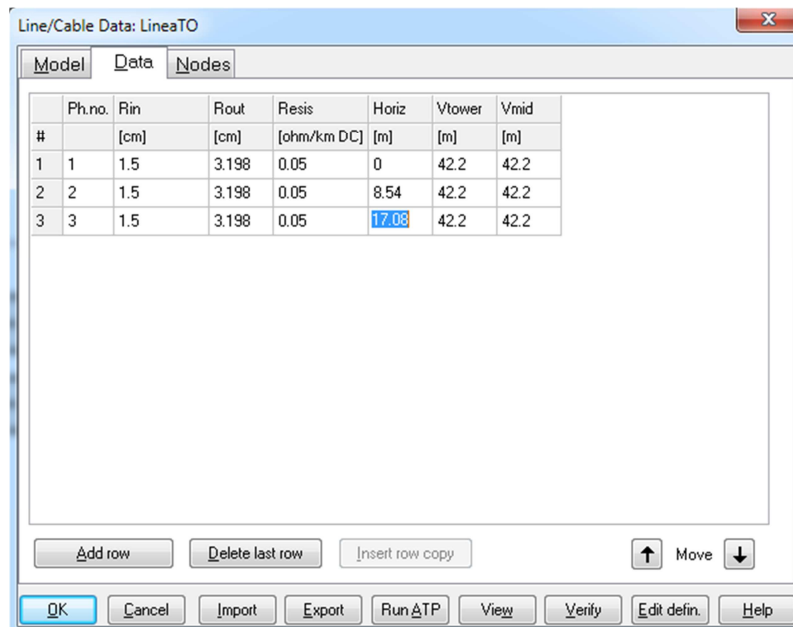


Fig. 4.48 Ingreso de los parámetros de la disposición geométrica.

El tipo de cable con el cual cuenta esta línea de transmisión es: cable tipo ACSR 2 conductores por fase 1113 MCM 33 km 83 estructuras.

Datos a considerar para realizar la simulación:

- La onda de sobretensión normalizada que simula la descarga atmosférica es 1.2/50 microsegundos.
- La onda de sobretensión cuyo frente convencional es superior a 30 microsegundos se clasifica como sobretensión de maniobra.

La corriente de descarga normal se define para una onda 8/20 microsegundos.

Las simulaciones se realizan con los parámetros en demanda máxima del SEP.

SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA

Como se puede apreciar en las figuras 4.49 y 4.50, se simula el circuito eléctrico mediante el cierre de un interruptor por maniobra para energizar la L.T. con una fuente cosenoidal, así como su gráfica de respuesta en el tiempo en la cual se puede observar que se energizan las fases con un retardo de tiempo.

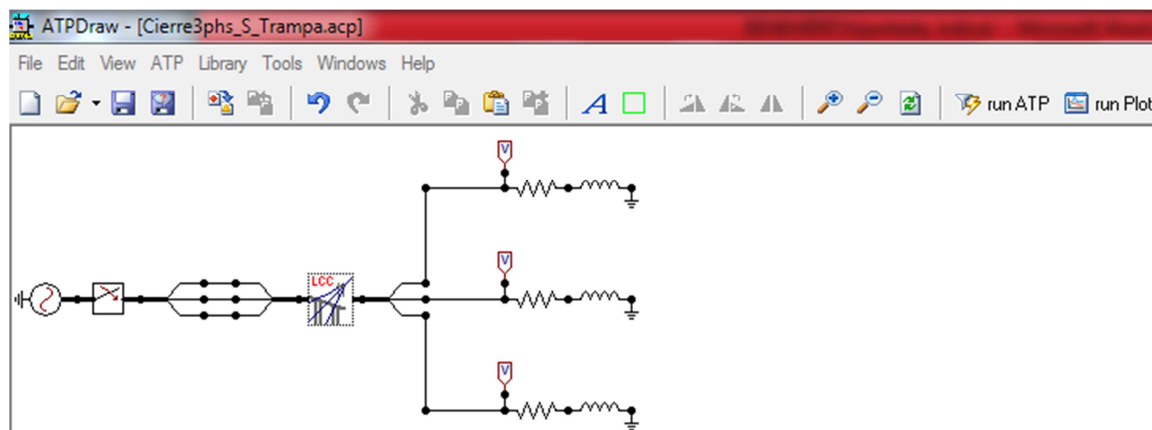


Fig. 4.49 Simulación del circuito sin trampas de onda.

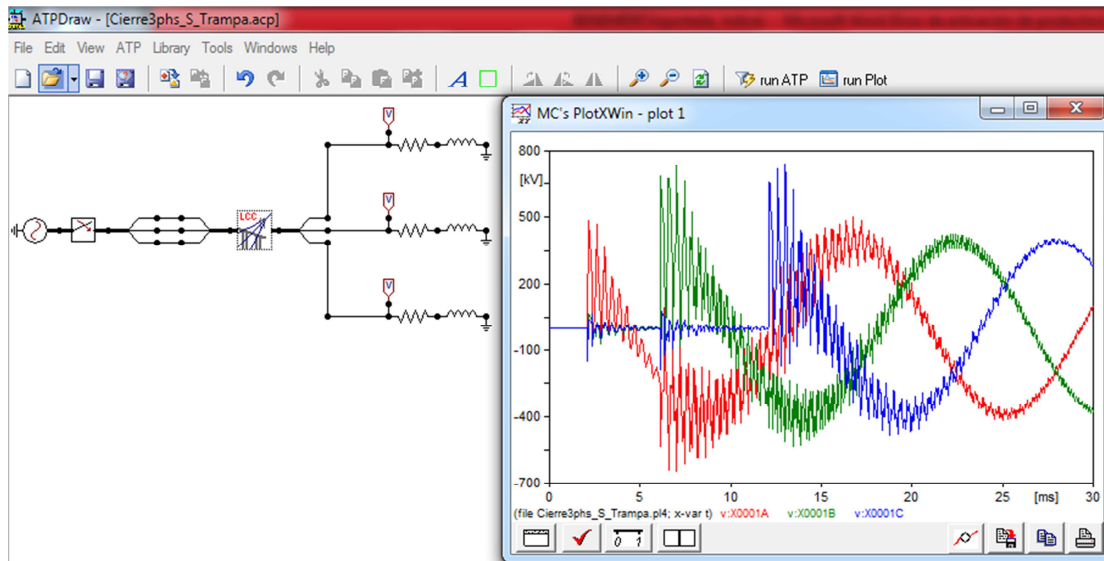


Fig. 4.50 Gráfica de la Simulación del circuito sin trampas de onda.

La gráfica de sobretensión en el instante de energizar la L.T. con un retardo aproximado de 6 ms en cada fase se muestra en la Fig. 4.51 donde también se puede apreciar claramente que alcanza un máximo de 700 KV en las fases B y C; y de igual forma se observa que cada vez que es energizada una fase, se inducen las sobretensiones a las demás fases.

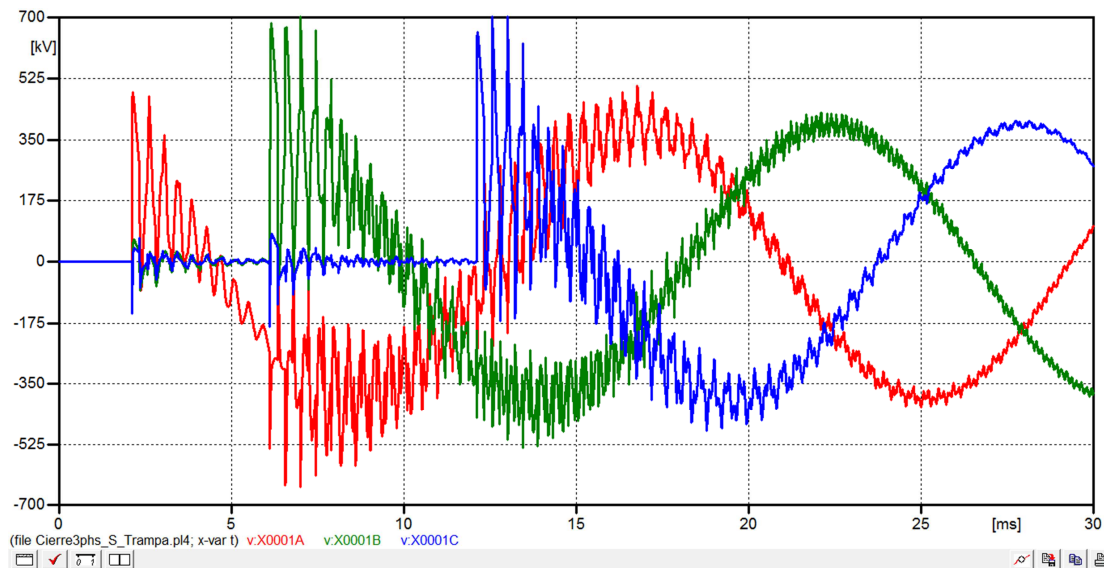


Fig. 4.51 Gráfica de simulación de sobretensiones por maniobra de la energización de un interruptor.

Del mismo modo se simula el circuito eléctrico utilizado con la particularidad que se insertan trampas de onda en ambos extremos en las fases B y C de la L.T. esto se aprecia en las Figuras 4.52 y 4.53.

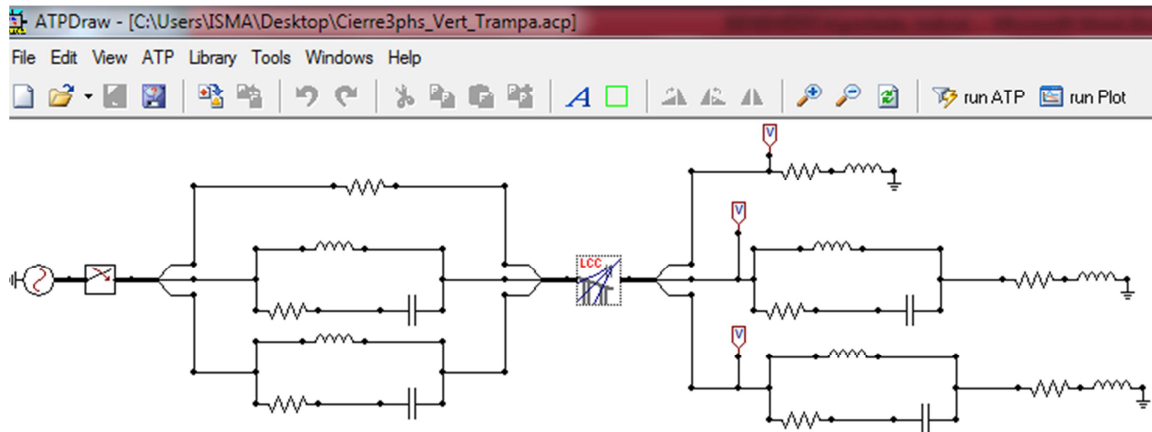


Fig. 4.52 Simulación del circuito con trampas de onda.

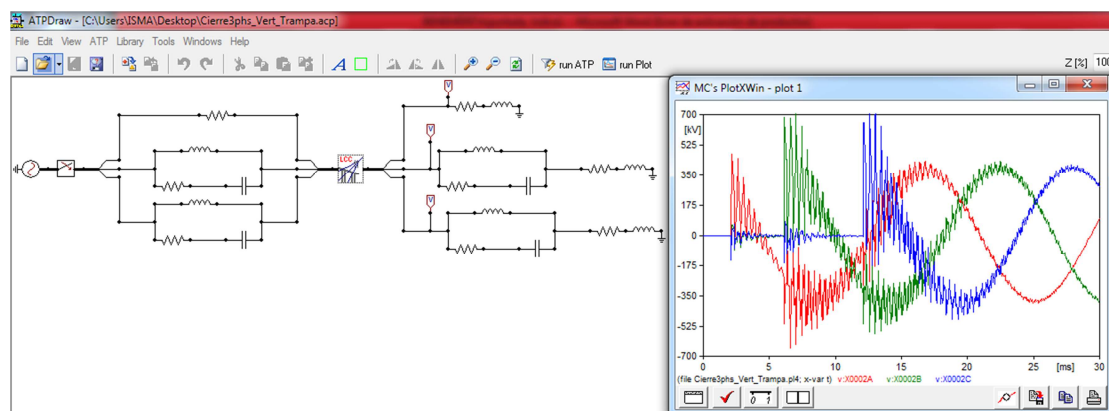


Fig. 4.53 Gráfica de la Simulación del circuito con trampas de onda.

La gráfica de sobretensión que alcanza un máximo de 700 KV en las fases B y C; se muestra en la Fig. 4.54 y de igual forma se observa que cada vez que es energizada una fase se inducen las fases a causa de la sobretensión.

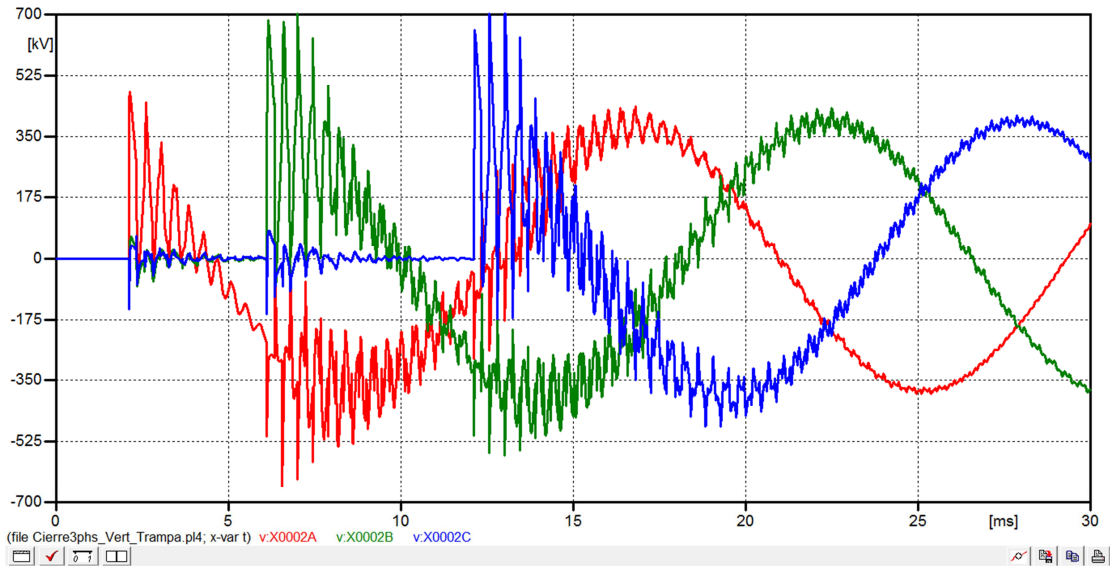


Fig. 4.54 Gráfica de la simulación de sobretensiones por maniobra en la energización de un interruptor.

Como se puede observar en las Figuras 4.55 y 4.56, del mismo modo se simula el circuito eléctrico utilizado, con la particularidad que para este caso además de las trampas de onda también se insertan los dispositivos de potencial en ambos extremos de la L.T., esto debido a que los equipos de comunicación se adaptan en el D.P. mediante un transformador de acoplamiento que presenta un aislamiento confiable de 10 KV entre el lado de alta tensión y el de los equipos OPLAT, así mismo se origina la adaptación deseada de la impedancia entre la línea de alta tensión y el cable de RF. Así mismo la reducción de las sobretensiones transitorias que influyen en el correcto funcionamiento de un enlace OPLAT.

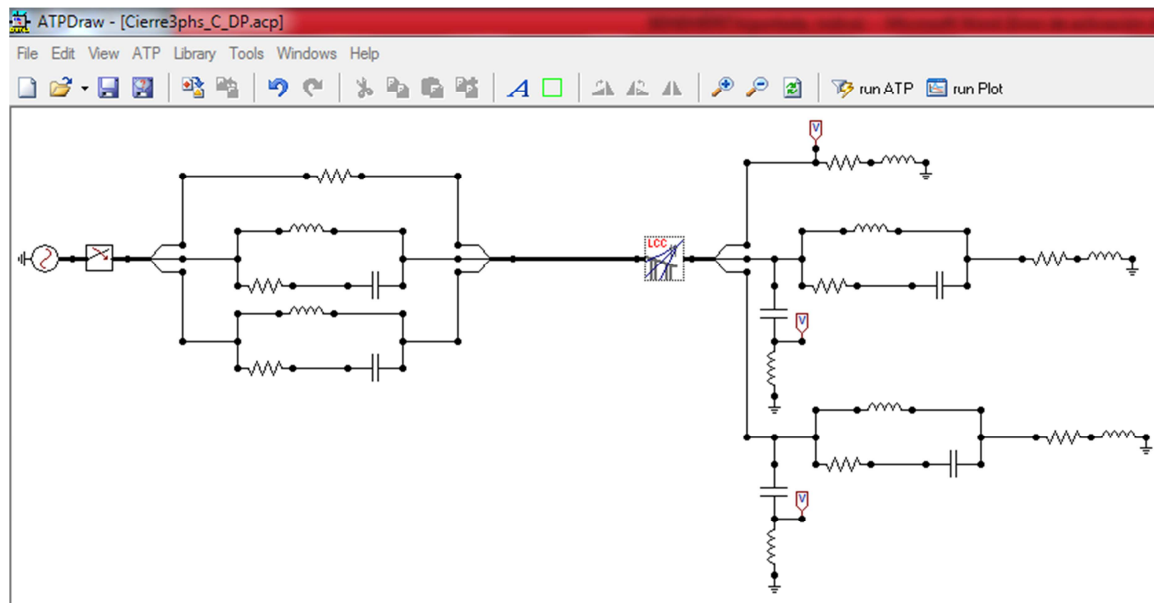


Fig. 4.55 Simulación del circuito con trampas de onda y dispositivo de potencial.

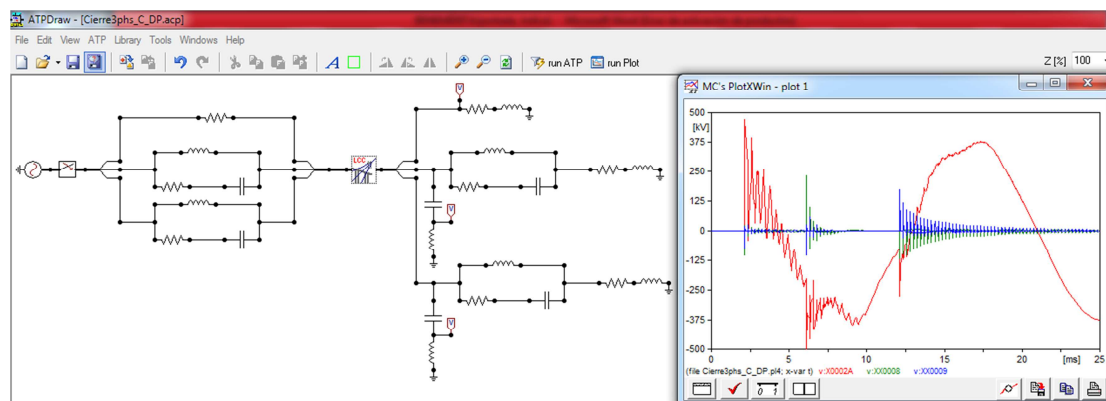


Fig. 4.56 Gráfica de la Simulación del circuito con trampas de onda.

La gráfica de la Fig. 4.57 muestra la sobretensión que alcanza un máximo de 200 KV en las fases B y C; esto impacta directamente en el enlace OPLAT debido a que se exceden los límites de sobretensión del filtro de acoplamiento de 10 KV y de igual forma se observa cuando se energiza inicialmente la fase A y se induce aproximadamente el 50% de la tensión en las fases B Y C.

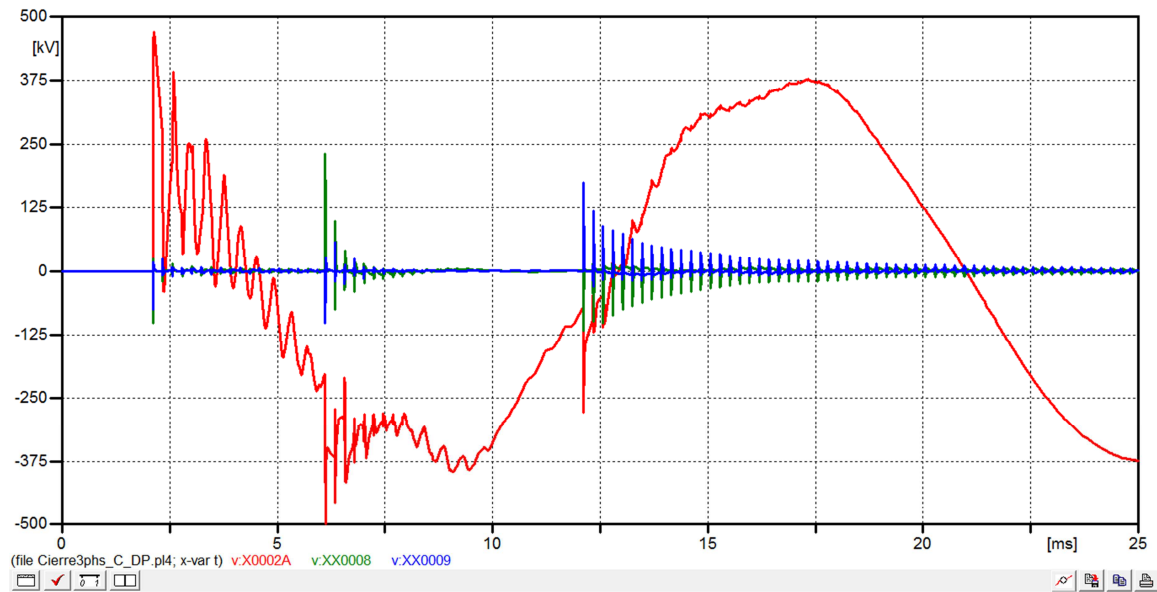


Fig. 4.57 Gráfica de sobretensiones de la simulación por maniobra en la energización de un interruptor.

SOBRETENSIÓN POR DESCARGA ATMOSFÉRICA

La simulación del circuito eléctrico mediante una descarga atmosférica que incide en la fase C de la L.T. se muestra en las figuras 4.58 y 4.59. Nótese que incide al inicio de la línea para comprobar su propagación al final de la misma así como su gráfica de respuesta en el tiempo.

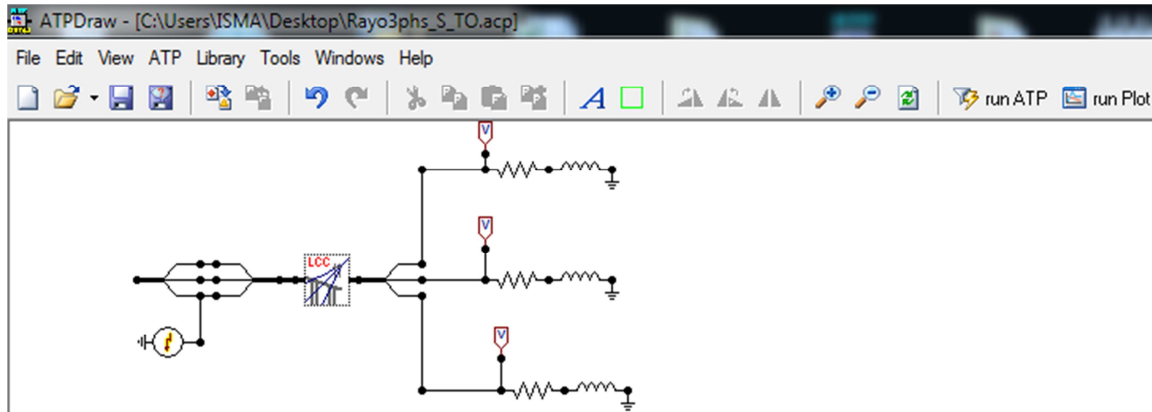


Fig. 4.58 Simulación del circuito sin trampas de onda.

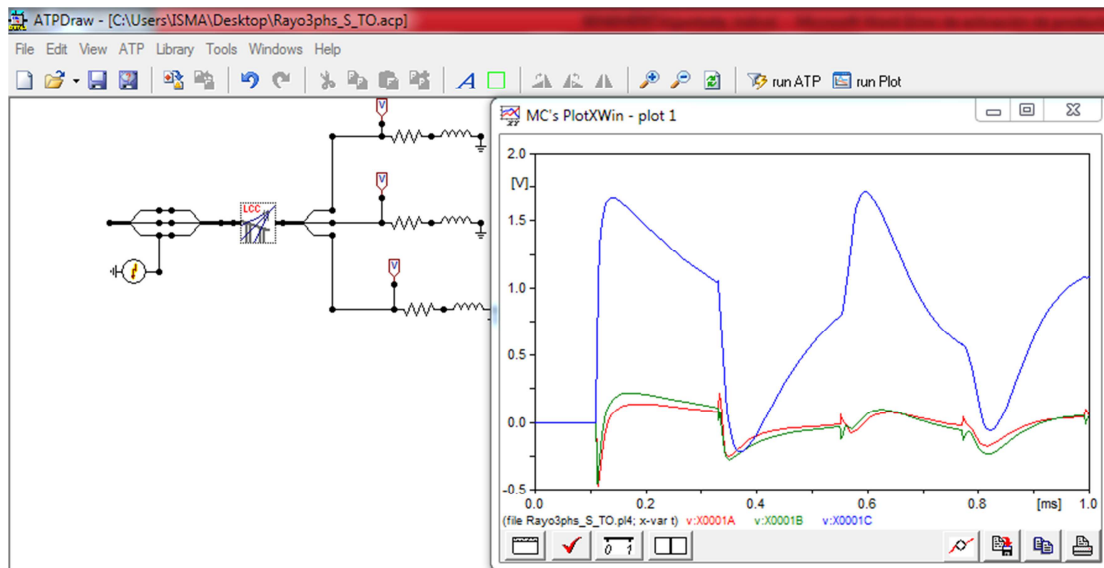


Fig. 4.59 Gráfica de la Simulación del circuito sin trampas de onda.

La gráfica de la Fig. 4.60 muestra la sobretensión que alcanza a inducir el 50% de la tensión en las fases B y C.

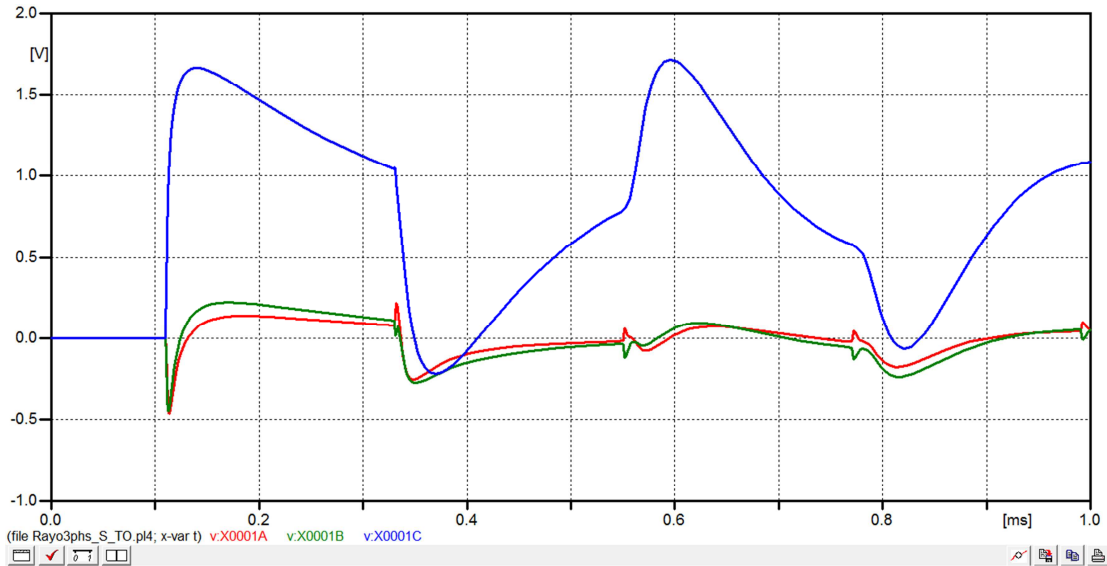


Fig. 4.60 Gráfica de la simulación de sobretensiones por descarga atmosférica.

Como se puede apreciar en las Figuras 4.61 y 4.62, se simula el circuito eléctrico mediante una descarga atmosférica la cual incide en la fase C de la L.T. y se insertan trampas de onda en ambos extremos en las fases B y C de la L.T.; así como su gráfica de respuesta en el tiempo.

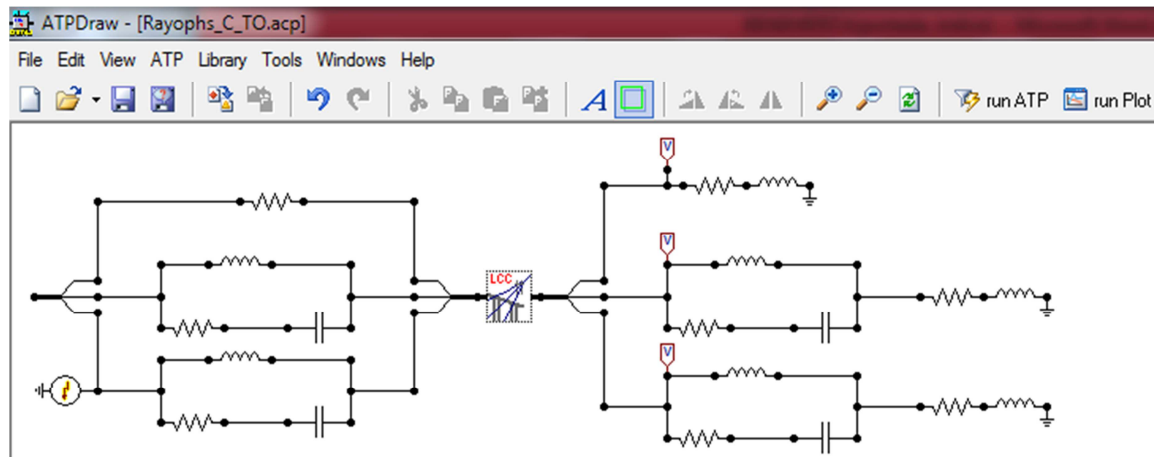


Fig. 4.61 Simulación del circuito con trampas de onda.

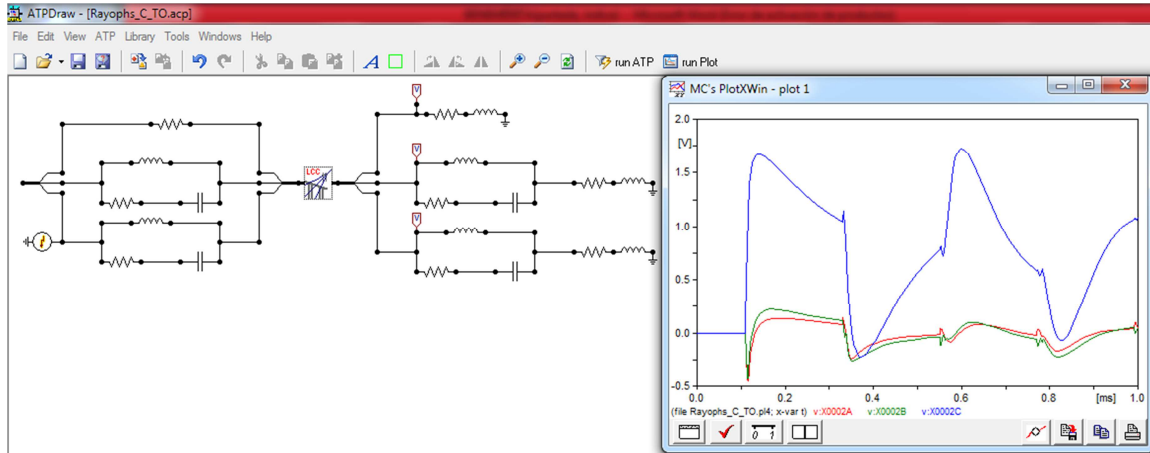


Fig. 4.62 Gráfica de la Simulación del circuito con trampas de onda.

La gráfica de sobretensión que alcanza a inducir el 50% de la tensión en las fases B y C, se muestra en la Fig. 4.63

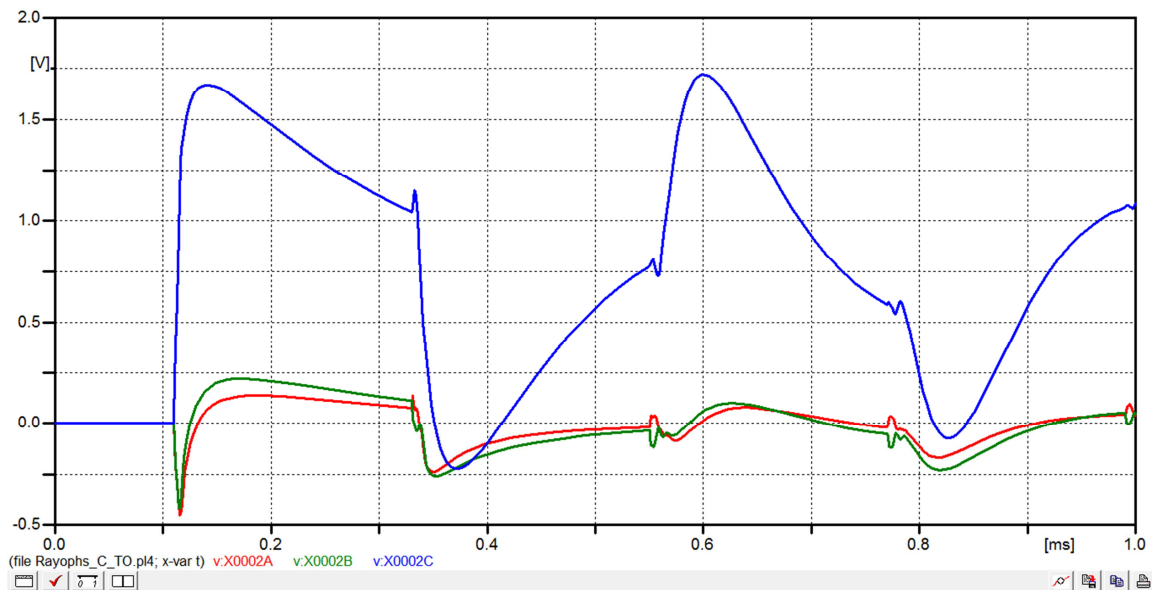


Fig. 4.63 Gráfica de la simulación de sobretensiones por descarga atmosférica.

Como se puede apreciar en las figuras 4.64 y 4.65, se simula el circuito eléctrico mediante una descarga atmosférica la cual incide en la fase C, se insertan trampas de onda en ambos extremos en las fases B y C de la L.T además se insertan Dispositivos de potencial y se puede observar que aún cuando se reducen drásticamente las sobretensiones a través del D.P. se encuentran presentes en el enlace OPLAT aproximadamente el 50% de la tensión de la descarga, así como su gráfica de respuesta en el tiempo.

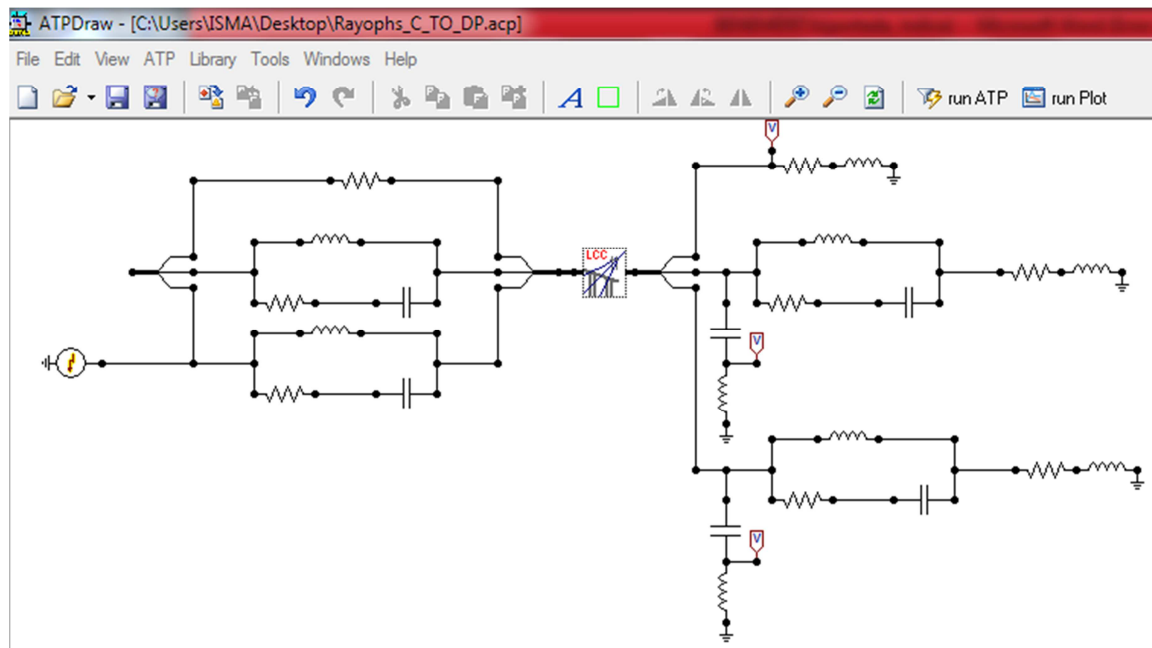


Fig. 4.64 Simulación del circuito con trampas de onda.

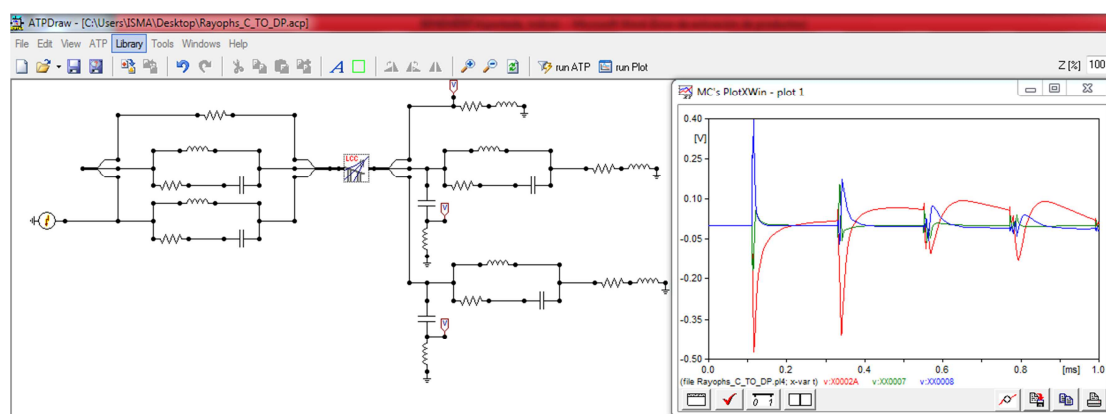


Fig. 4.65 Gráfica de sobretensión que alcanza a inducir el 50% de la tensión en las fases B y C.

La gráfica de sobretensión que alcanza a inducir el 50% de la tensión en las fases B y C, se muestra en la Fig. 4.66

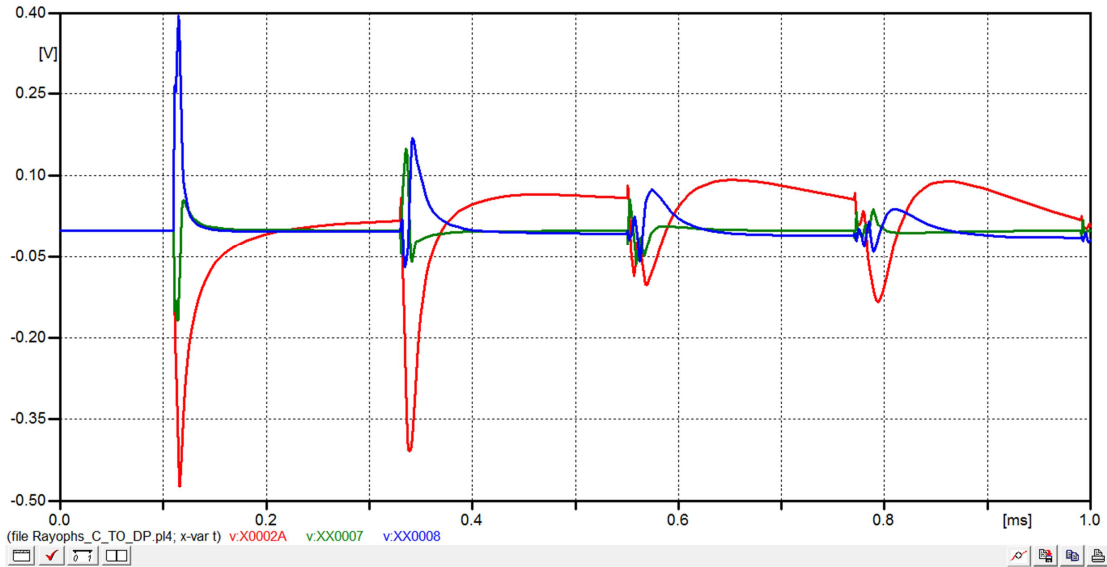


Fig. 4.66 Gráfica de la simulación de sobretensiones por descarga atmosférica.

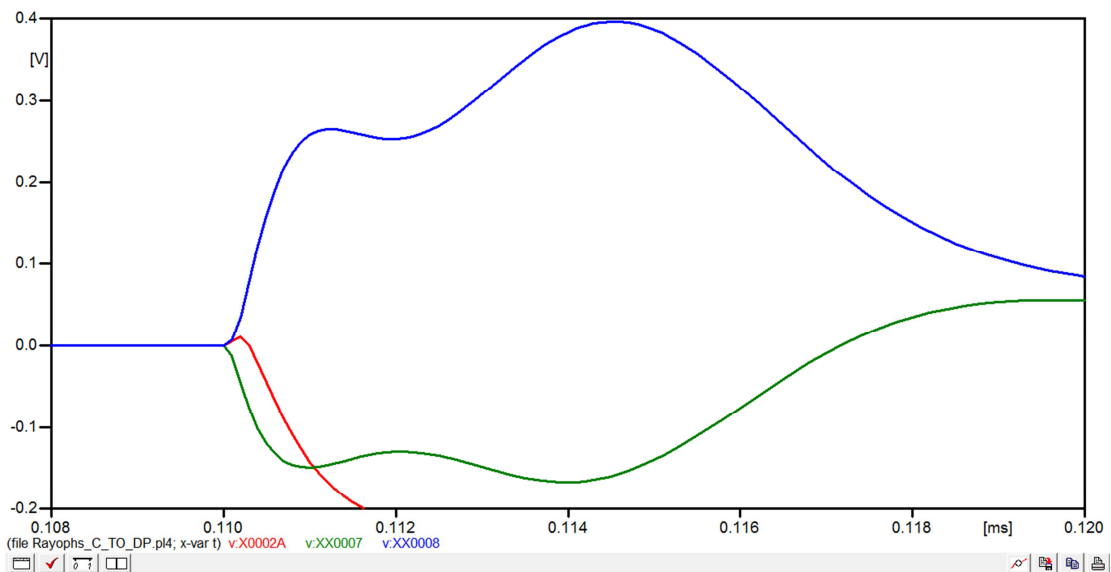


Fig. 4.67 Prolongación de tiempo de las sobretensiones por descarga atmosférica.



CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó el desarrollo para obtener el circuito eléctrico equivalente para el análisis de las sobretensiones transitorias en la L.T. TCL-A3U40-CZM, mediante los datos reales proporcionados del flujo de potencia P y Q del sistema en demanda mínima y máxima, se obtuvo la Impedancia de carga del sistema vista en ese instante de tiempo por el operador del SEP, utilizando el modelo de J. Marti para representar la línea de transmisión aérea, el modelo presenta en comparación con otros modelos aproximaciones cercanas a las esperadas debido a la integración de una red equivalente que presenta una respuesta en frecuencia igual a la impedancia característica de la línea para eliminar las reflexiones en los extremos. Los resultados obtenidos con el programa de simulación ATP/Draw muestran claramente la evidencia referente a las sobretensiones transitorias que afectan el desempeño del equipo OPLAT Power Link; así mismo se mostró que las sobretensiones por maniobra y descargas atmosféricas influyen drásticamente en las fases que integran un enlace OPLAT, aun cuando se acoplan trampas de onda y dispositivos de potencial en las fase involucradas para minimizar las pérdidas de las señales del equipo OPLAT, (ya sean sobretensiones por maniobra o por descarga atmosférica) se inducen hasta en un 50% de la tensión del SEP en el enlace OPLAT.

Como resultado del análisis se muestra que:

- Al evaluar el circuito equivalente con el programa de simulación ATP/Draw, se determina mediante los resultados y gráficas obtenidos que las sobretensiones se inducen en las fases involucradas en el enlace OPLAT de forma considerable.
- La inmunidad a la compatibilidad electromagnética del equipo Power Link que le permite funcionar de acuerdo al fin previsto es superada como lo indica el manual de operación en el apartado de datos técnicos por la norma IEC 61000-4-2 a la 6100-4-6 **anexo "E"** manifiesta que la corriente a los 30 ns es aproximadamente 0.5 veces la corriente pico, y la corriente a los 60 ns es aproximadamente 0.25 veces la corriente pico. Lo anterior tiene como fundamento la existencia de un factor 1:4 en las tensiones de descarga.
- En base al estudio realizado en esta tesis y como consecuencia de los datos obtenidos en la simulación se propone integrar una resistencia de pre inserción para reducir las sobretensiones transitorias, y de forma paralela se pretende registrar el proyecto dentro del Premio Nacional al Desarrollo Tecnológico y a la Innovación para los trabajadores de CFE.



Bibliografía

- [1] **L. A. Siegert**, Alta Tensión y Sistemas de Transmisión. Editorial Limusa, 1988.
- [2] **Project UHV**, Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982.
- [3] **www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/transmisionydistribution**.
- [4] **A. Recillas M. del Pilar**, Evaluación de Sobretensiones por Maniobra en la Restauración de Sistemas de Transmisión aplicando un Método en el Dominio de la Frecuencia, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, E.S.I.M.E., Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2006.
- [5] **T. Martínez Carlos**, Análisis de la Interferencia Electromagnética por Efecto Corona en Líneas de Transmisión de Alta Tensión en C.A., Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, E.S.I.M.E., Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2008.
- [6] **G. Aboytes Florencio**, Análisis de Sistemas de Potencia, Departamento de Investigación y Desarrollo, Centro Nacional de Control de Energía, Comisión Federal de Electricidad México 1990.
- [7] **H. HAYT, Jr WILLIAM; A. BUCK JOHN**, Teoría Electromagnética séptima edición, Purdue University, Georgia institute of technology. 2008.
- [8] **M. Candía Luis Ángel, B. Sánchez Erasmo**, Sistemas OPLAT ESB-500, Centro de Capacitación CELAYA, Agosto 1993.
- [9] **A. López Armando**, Simulación de Transitorios en Líneas de Transmisión Multiconductoras con parámetros dependientes de la frecuencia empleando el método de las características, Sección de Investigación y estudios avanzados, unidad Guadalajara, IPN, Agosto 2009.
- [10] **CONORCFE**, Norma de Referencia NRF-041-CFE-2013, Esquemas Normalizados de Protecciones para Líneas de Transmisión.
- [11] **IEC 60255-3-1989**, Electrical Relays – Part 3: single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time maintenance result, 2004.
- [12] **Ambrosio L. Armando**, Simulación de Transitorios en Líneas de Transmisión Multiconductoras con Parámetros Dependientes de la Frecuencia Empleando el Método de las Características.



- [13] **C.R. Fuerte Esquivel Y J.L. Guardado Zavala**, Introducción al análisis de transitorios electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia, 1994.
- [14] **LAPEM CFE**, Cable de Aluminio con cable concéntrico y núcleo de alambres de acero recubierto de aluminio soldado (ACSR/AS). Especificación CFE E0000-18.
- [15] **Cardona C. Leonardo**, Teoría Y Práctica con el ATP, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín Facultad de minas departamento de Electricidad y Electrónica 1995.
- [16] **www.wikipedia.org/wiki/Red_eléctrica**
- [17] **J. Grainger John, D. Stevenson Jr. William**, Análisis de Sistemas de potencia, 1996.
- [18] **J. Chapman Stephen**, Maquinas Eléctricas Quinta edición, 2012.
- [19] **Siemens**, Manual de Equipo Power link 50/100 versión 3.5 Smart Communication
- [20] **Siemens**, Manual de Equipo de Teleprotección SWT 3000 versión 3.5 Smart Communication
- [21] **LAPEM CFE**, Elementos de un sistema OPLAT “Trampas de Onda, Transformadores de Instrumentos, Filtros de Acoplamiento y Cable de Radio Frecuencia”.

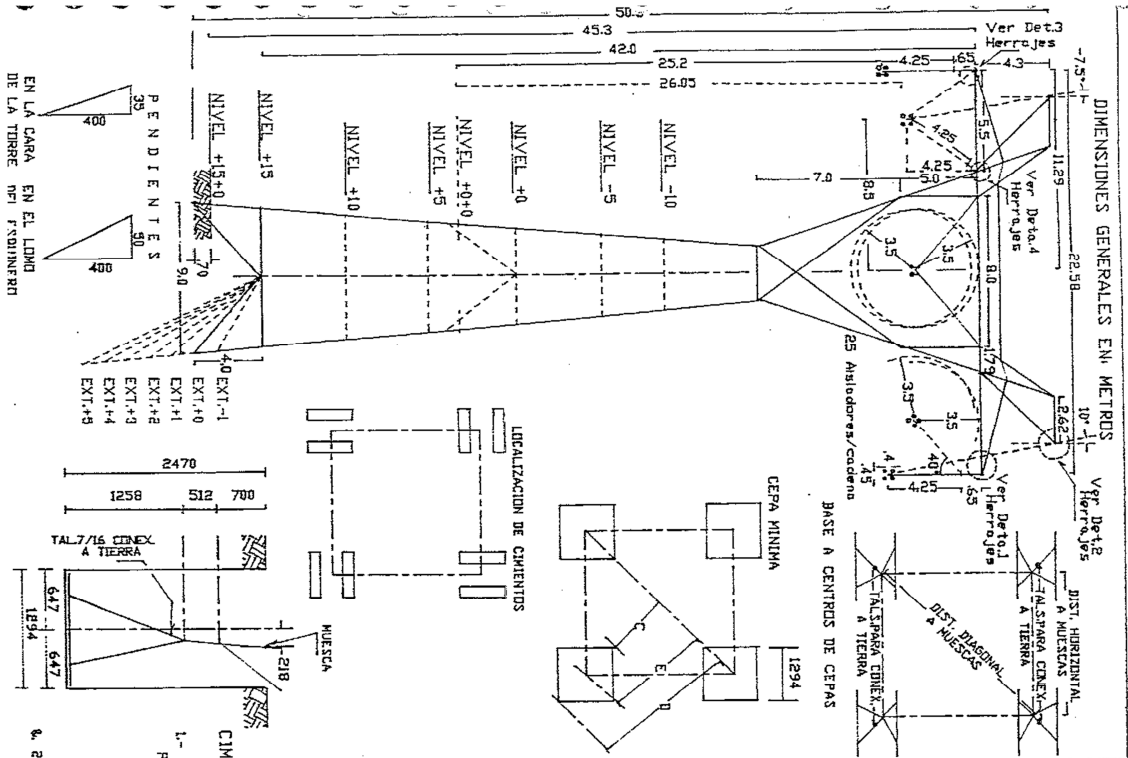


APENDICE

Factory Test PowerLink				Serial-No.: 0102					
Output from PowerSys for factory test			Input of hf and calculation during factory test						
amplifier		80 W	40 /80 W	Selections by factory / PowerConf					
impedance		75 Ohm	75 / 150 Ohm						
results of factory test									
	port	vf-input		hf-output		vf-output			
		vf-frequency	vf-level	hf-frequency	hf-level output	hf-level output	vf-frequency	vf-level	vf-level
					min.	measured		nom.	measured
								+/- 0,5	
Systempilot									
SysPii+				109510 Hz	17.2				
Service 1:									
F2 E&M	VFx-1/P2	800 Hz	-3.5 dB	108060 Hz	31.2		800 Hz	-1.5	
PILOT +				109510 Hz	17.2				
Service 2:									
F6 protect									
Guard:									
F1:				111495 Hz	31.2				
F2:				110580 Hz	31.2				
F3:				110355 Hz	31.2				
F4:				109690 Hz	31.2				
				109910 Hz	31.2				
Service 3:									

Service 4:									

ANEXO "B" HOJA DE ESPECIFICACIONES DE LAS TORRES TIPO: AM



TORRE AM	NIVEL	EXT.	DISTANCIAS (m), ENTRE		CEPAS		RESTO EN NEGRO (kg)	
			HORIZONTAL	DIAGONAL	E	D	CUERPO SUP. HASTA CERRAMIENTO	CUERPO SUP. CEMENTO Y CERR. EXT. (kg/cm)
-10	-1	4414	6842	3430	2515	4345	502	6317
-10	+0	4591	6492	3555	2540	4470	620	6446
-10	+1	4767	6742	3690	2665	4595	790	6638
-10	+2	4944	6992	3805	2690	4720	920	6768
-10	+3	5120	7241	3929	2714	4844	1179	6925
-10	+4	5297	7491	4039	2739	4969	1323	7092
-10	+5	5473	7740	4179	2764	5094	1502	7266
-5	-1	5279	7466	4042	2727	4957	524	6982
-5	+0	5455	7715	4166	2751	5081	653	7166
-5	+1	5632	7965	4291	2776	5206	837	7385
-5	+2	5808	8214	4416	2801	5331	975	7604
-5	+3	5984	8463	4540	2825	5455	1232	7823
-5	+4	6161	8713	4665	2850	5580	1472	8042
-5	+5	6337	8962	4790	2875	5705	1589	8261
+0	-1	6179	8739	4678	2763	5593	509	7985
+0	+0	6355	8987	4802	2887	5717	624	8100
+0	+1	6531	9236	4927	2912	5842	814	8319
+0	+2	6707	9485	5051	2936	5966	933	8538
+0	+3	6883	9734	5176	2961	6091	1167	8757
+0	+4	7059	9983	5300	2985	6215	1301	8976
+0	+5	7235	10232	5425	3010	6340	1535	9195
+5	-1	7045	9960	5289	2974	6204	565	8821
+5	+0	7221	10211	5414	2999	6329	685	8946
+5	+1	7396	10460	5539	3024	6454	905	9171
+5	+2	7572	10710	5664	3049	6579	1032	9396
+5	+3	7749	10959	5789	3074	6703	1264	9621
+5	+4	7925	11209	5913	3099	6828	1496	9846
+5	+5	8102	11458	6038	3123	6953	1728	10071
+10	-1	7944	11235	5926	3011	6841	606	9340
+10	+0	8120	11483	6050	3135	6965	717	9464
+10	+1	8297	11731	6176	3261	7091	950	9689
+10	+2	8473	11980	6300	3385	7215	1095	9914
+10	+3	8650	12233	6425	3510	7340	1273	10139
+10	+4	8826	12482	6550	3635	7465	1500	10364
+10	+5	9003	12732	6675	3760	7590	1813	10589
+15	-1	8808	12456	6537	3682	7452	701	10340
+15	+0	8984	12705	6661	3776	7576	809	10464
+15	+1	9161	12956	6787	3872	7702	1112	10588
+15	+2	9337	13205	6911	3966	7828	1285	10712
+15	+3	9514	13455	7036	4061	7951	1583	10836
+15	+4	9690	13704	7161	4156	8076	1674	10960
+15	+5	9867	13954	7286	4251	8201	2066	11084

CIMENTACION DE ACERO
 1.- VOLUMEN DE EXCAVACION 4.13m³
 PARA NIVELES DE -5 o +10

2.- 233kg PARA CEMENTO DE CONCRETO

C.F.E. TORRE TIPO: AM
 G.P.T. 400KV, 1 CIRCUITO
 SUBESTACION DE INGENIERIA BASICA
 FABRICANTE TOMEXSA
 SUSPENSION

Dibujó: M.J.G.-A. Caboñes
 Integro: Ing. K. J. Caboñes A.
 Revisó: Ing. R. Rodríguez Talas

ESC.: SIN
 FECHA: 1989
 Hoja 1 de 3

ANEXO “C”

CABLE DE ALUMINIO CON CABLEADO CONCÉNTRICO Y NÚCLEO DE ALAMBRES DE ACERO RECUBIERTO DE ALUMINIO SOLDADO (ACSR/AS)	ESPECIFICACIÓN CFE E0000-18
--	--------------------------------

3 de 77

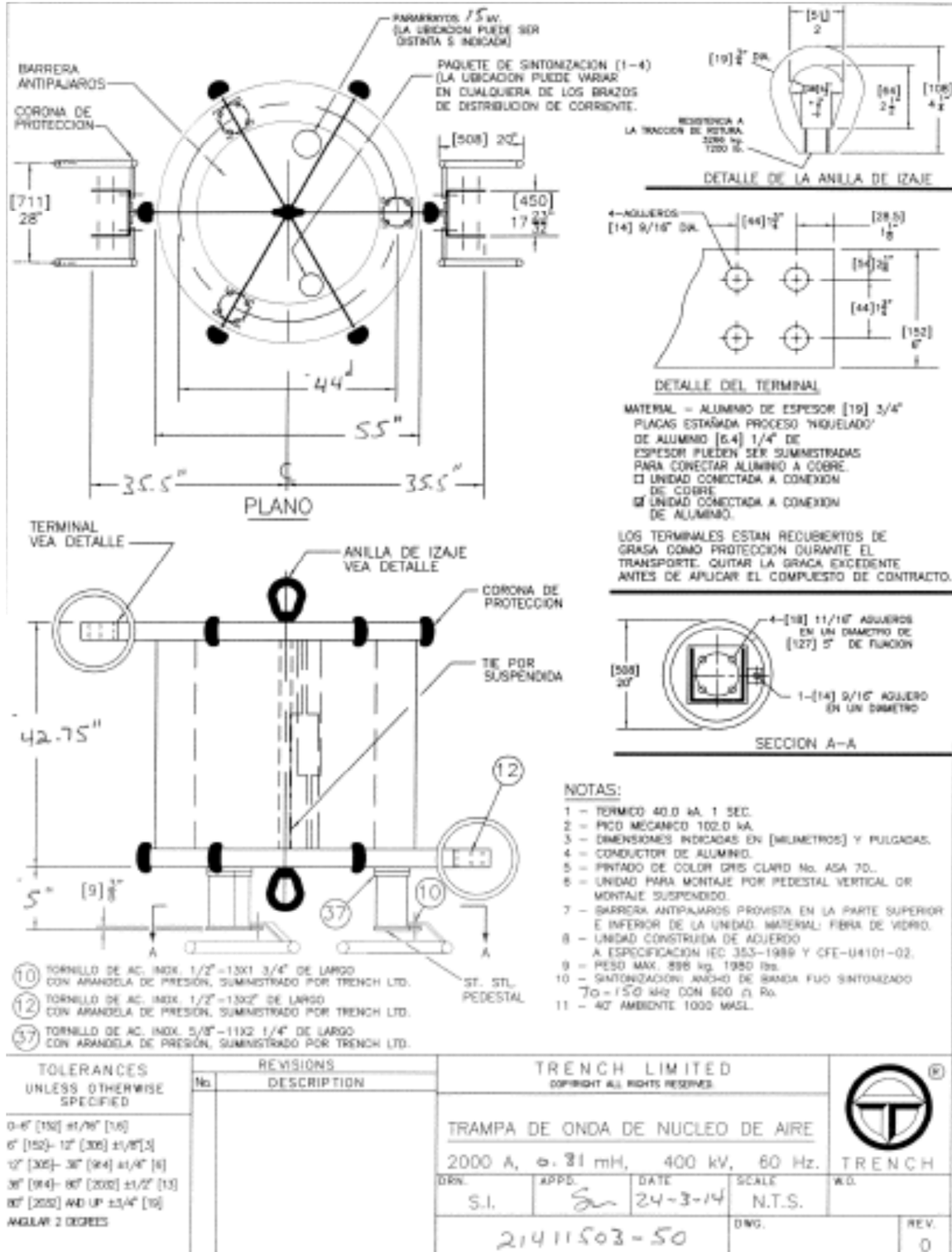
TABLA 1 - Características generales del cable ACSR/AS

Descripción corta	Designación	Área nominal de la sección transversal (mm ²)			Conductor de aluminio		Núcleo de acero			Diámetro exterior del cable (mm)	Masa (kg/km)			Carga mínima de ruptura (kN)	Resistencia eléctrica c.d. nominal a 20 °C al cable completo Ω/km
		Aluminio	Acero	Total	Número alambres	Diámetro de los alambres (mm)	Número alambres	Diámetro de los alambres (mm)	Diámetro núcleo de acero (mm)		Aluminio	Acero	Total		
ACSR/AS 1/0	RAVEN/AS	53.48	8.97	62.45	6	3.37	1	3.37	3.37	10.11	145	59	207	19	0.506
ACSR/AS 3/0	PIGEON/AS	85.01	14.15	99.16	6	4.25	1	4.25	4.25	12.75	230	93	330	28	0.318
ACSR/AS 266	PARTRIDGE/AS	135.2	22.0	157.2	26	2.57	7	2.00	6.00	16.31	366	145	520	48	0.203
ACSR/AS 336	LINNET/AS	170.5	27.7	198.2	26	2.89	7	2.25	6.74	18.29	461	183	657	60	0.160
ACSR/AS 477	HAWK/AS	241.7	39.3	281	26	3.44	7	2.67	8.02	21.77	654	258	929	84	0.113
ACSR/AS 795	DRAKE/AS	402.8	65.6	468.4	26	4.44	7	3.45	10.36	28.11	1 089	431	1 549	136	0.068
ACSR/AS 900	CANARY/AS	456	59.1	515.1	54	3.28	7	3.28	9.84	29.52	1 234	390	1 656	138	0.061
ACSR/AS 1113	BLUE JAY/AS	564	39	603	45	4.00	7	2.66	7.99	31.98	1 526	256	1 822	130	0.050


NOTA: Las tolerancias para alambres de aluminio están con base en las norma NMX-J-027-ANCE y para alambres de acero recubiertos de aluminio soldado la referencia [4] del capítulo 12 de esta especificación.



ANEXO "D" HOJA DE ESPECIFICACIONES DE LA TRAMPA DE ONDA





 Comisión Federal de Electricidad	<p style="text-align: center;">COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD SUBDIRECCIÓN DE TRANSMISIÓN Y TRANSFORMACIÓN ÁREA DE TRANSMISIÓN Y TRANSFORMACIÓN CENTRAL</p> <p style="text-align: center;">INSTRUCCIÓN DE TRABAJO PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE EQUIPO DE LÍNEA</p>	HOJA 1 DE 2 CLAVE: I-COM-12 REVISIÓN: 0 FECHA DE ELABORACIÓN: 28/11/2003
---	--	--

1. DATOS DEL EQUIPO.

CABLE DE R.F. TRAMPA DE ONDA
 DISPOSITIVO DE POTENCIAL UNIDAD DE ACOPLAMIENTO
 UBICACIÓN: SE. TCL LÍNEA: A3U40 COLATERAL: SE. CZM
 FASE: B MARCA: ABB No. SERIE: N/A
 DISTANCIA/ANCHO DE BANDA/VALOR: 332 - 542 (m/mH/pF/Hz)

2. DATOS DEL MANTENIMIENTO.

FECHA: 3-Jul-2013 REGISTRO: 20130617-0214 LICENCIA: 20130703-0514
 INICIO: 10:00 TÉRMINO: 16:00

3. SUPERVISIÓN DE ACTIVIDADES PREVIAS.

3.1.- TRAMITAR Y CONFIRMAR APOYO DE LOS DEPTOS. DE SUBESTACIONES, LÍNEAS Y PROTECCIONES.
 TRAMITAR Y CONFIRMAR EL REGISTRO DE LICENCIA.

REALIZADO NO REALIZADO

3.2.- BLOQUEO DE PROTECCIONES ASOCIADAS AL EQUIPO DE COMUNICACIÓN Y LECTURA DE NIVELES DEL EQUIPO OPLAT.

REALIZADO NO REALIZADO

3.3.- ATERRIZAJE DE CUCHILLAS DE LÍNEA Y EN FORMA FÍSICA A LA ENTRADA DE LA L.T., CONEXIÓN AL SISTEMA DE TIERRAS DEL EQUIPO DE LÍNEA ANTES DE QUE EL PERSONAL DESCONECTE LAS TERMINALES DE POTENCIA DEL EQUIPO Y DESCONEJÓN DE TERMINALES DE POTENCIA DEL EQUIPO DE LÍNEA PARA REALIZAR LAS PRUEBAS.

REALIZADO NO REALIZADO

4. VERIFICAR ESTADO ELÉCTRICO Y MECÁNICO DEL EQUIPO DE LÍNEA Y SUS INTERCONEXIONES.

CORRECTO INCORRECTO

5. ACTIVIDADES PRINCIPALES.


5.1.- EFECTUAR LIMPIEZA DEL EQUIPO.

REALIZADO NO REALIZADO

5.2.- REALIZAR LAS CONEXIONES Y MEDICIONES DEL EQUIPO DE LÍNEA A PROBAR DE ACUERDO A LAS NORMAS IEC CORRESPONDIENTES.

REALIZADO NO REALIZADO



 Comisión Federal de Electricidad	<p style="text-align: center;">COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD SUBDIRECCIÓN DE TRANSMISIÓN Y TRANSFORMACIÓN ÁREA DE TRANSMISIÓN Y TRANSFORMACIÓN CENTRAL</p> <p style="text-align: center;">INSTRUCCIÓN DE TRABAJO PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE EQUIPO DE LÍNEA</p>	HOJA 2 DE 2 CLAVE: I-COM-12 REVISIÓN: 0 FECHA DE ELABORACIÓN: 28/11/2003
---	--	--

6. ACTIVIDADES FINALES.

6.1.- RETIRAR EL ATERRIZAJE FÍSICO, NORMALIZAR LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN Y NORMALIZAR EQUIPOS DE COMUNICACIONES.

REALIZADO NO REALIZADO

6.3.- REALIZAR LAS GRAFICAS CORRESPONDIENTES A CADA PRUEBA Y ANEXAR AL REGISTRO.

REALIZADO NO REALIZADO

7. DESBLOQUEO DE TELEPROTECCIONES Y NORMALIZACIÓN DE EQUIPO.

NORMALIZADO SI NO

8. CUMPLE CON LOS PARAMETROS DE ACEPTACIÓN.

SI NO

9. CUMPLE CON LOS OBJETIVOS DE SEGURIDAD, HIGIENE EN EL TRABAJO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL.

SI NO

10. DEVOLUCIÓN DE LICENCIA O AUTORIZACIÓN.

REALIZADO NO REALIZADO

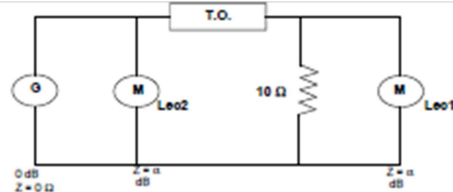
EJECUTO

REVISO

ING. ISMAEL BARRALES MÉNDEZ
NOMBRE Y FIRMA

ING. OMAR DÍAZ RODRÍUEZ
NOMBRE Y FIRMA

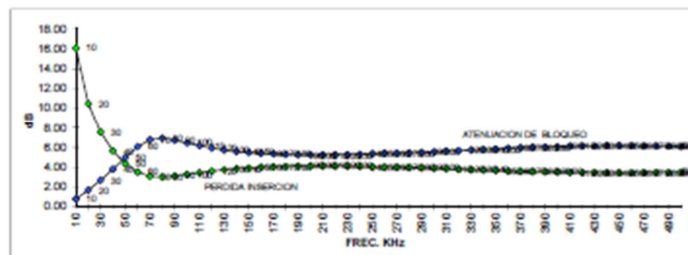
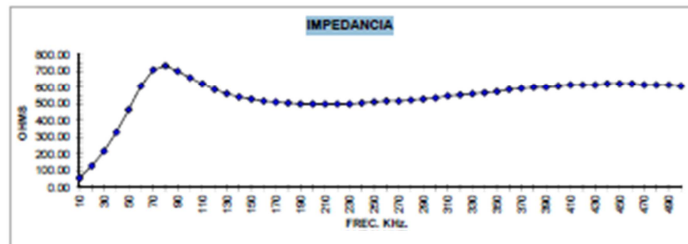
ING. MIGUEL MALDONADO ESQUIVEL
NOMBRE Y FIRMA



RESPUESTA EN FRECUENCIA DE TRAMPA DE ONDA

LUGAR: CZM MARCA: ABB VALOR: 2000w
 LINEA: A3U40 SERIE: Z. DE LINEA: 800 Ω
 COLATERAL: TCL ANCHO DE BANDA: 332 -542 IMP. S.E.: 800 Ω
 FASE: B FECHA: 03/07/2013 R. MEDIC.: 10 Ω

FREC. (KHz)	NIVEL MEDIDO		IMPEDANCIA EQUIPO (OHMS)	PERDIDA INSERCIÓN (dB)	ATENUACION BLOQUEO (dB)
	LEC. 1 (dB)	LEC. 2 (dB)			
10	-15.6	-0.2	66.07	16.26	0.76
20	-22.9	-0.1	126.54	13.49	1.69
30	-27.1	0.0	218.46	7.56	2.88
40	-30.6	0.0	328.54	5.63	3.80
50	-33.5	0.0	463.15	4.34	4.97
60	-35.9	-0.1	606.60	3.49	6.07
70	-37.2	-0.1	768.14	3.06	6.76
80	-37.5	-0.1	921.31	2.90	6.93
90	-37.1	-0.1	997.95	3.11	6.71
100	-36.6	-0.1	998.54	3.26	6.44
110	-36.1	-0.1	820.96	3.43	6.17
120	-35.6	-0.1	588.66	3.59	5.92
130	-35.2	-0.1	588.85	3.73	5.72
140	-34.9	-0.1	539.54	3.84	5.57
150	-34.7	-0.1	527.03	3.92	5.48
160	-34.5	-0.1	514.81	3.96	5.38
170	-34.4	-0.1	506.80	4.03	5.34
180	-34.3	-0.1	522.86	4.07	5.29
190	-34.2	-0.1	496.99	4.10	5.24
200	-34.2	-0.1	496.99	4.10	5.24
210	-34.2	-0.1	496.99	4.10	5.24
220	-34.2	-0.1	496.99	4.10	5.24
230	-34.2	-0.1	496.99	4.10	5.24
240	-34.3	-0.1	522.86	4.07	5.29
250	-34.4	-0.1	506.80	4.03	5.34
260	-34.5	-0.1	514.81	3.96	5.38
270	-34.5	-0.1	514.81	3.96	5.38
280	-34.6	-0.1	520.88	3.95	5.43
290	-34.7	-0.1	527.03	3.92	5.48
300	-34.8	-0.1	533.26	3.88	5.53
310	-35.0	-0.1	545.90	3.81	5.62
320	-35.1	-0.1	552.34	3.77	5.67
330	-35.2	-0.1	558.85	3.73	5.72
340	-35.3	-0.1	565.44	3.70	5.77
350	-35.4	-0.1	572.10	3.66	5.82
360	-35.5	0.0	588.66	3.59	5.92
370	-35.6	0.0	592.56	3.56	5.97
380	-35.7	0.0	599.54	3.53	6.02
390	-35.7	0.0	599.54	3.53	6.02
400	-35.8	0.0	606.60	3.49	6.07
410	-35.9	0.0	613.73	3.46	6.12
420	-35.9	0.0	613.73	3.46	6.12
430	-35.9	0.0	613.73	3.46	6.12
440	-36.0	0.0	620.96	3.43	6.17
450	-36.0	0.0	620.96	3.43	6.17
460	-36.0	0.0	620.96	3.43	6.17
470	-35.9	0.0	613.73	3.46	6.12
480	-35.8	0.1	613.73	3.46	6.12
490	-35.6	0.1	613.73	3.46	6.12
500	-35.7	0.1	606.60	3.49	6.07





ANEXO “E” DATOS TECNICOS POWER LINK

EMC Immunity

RF disturbance Immunity	IEC 61000-4-6 0.15 MHz to 80 MHz 10 Vrms IEC 61000-4-3, EN 61000-6-2 (Industrial area) 80 MHz to 1,000 MHz 10 V/m 1.4 GHz to 2.0 GHz 3 V/m 2.0 GHz to 2.7 GHz 1 V/m
Electrostatic discharge	IEC 61000-4-2 4 kV (direct/indirect contact discharge) 8 kV (direct air discharge)
Bursts Power supply HF input/output VF input/output	IEC 61000-4-4 2 kV 2 kV 1 kV
Surges	IEC 61000-4-5
Common mode (line-to-line)	2 kV
Differential mode (line-to-ground)	1 kV
Direct coupling into shields	1 kV

EMC Emission

RF disturbance Emission	IEC 61000-6-4 (Industrial area)
-------------------------	---------------------------------

El Alfabeto Griego:

Alfa	α	Nu	ν
Beta	β	Xi	ξ
Gamma	γ	Ómicron	\omicron
Delta	δ	Pi	π
Épsilon	ϵ	Ro	ρ
Zeta	ζ	Sigma	σ
Eta	η	Tau	τ
Teta	θ	Ypsilon	υ
Iota	ι	Fi	ϕ
Kappa	κ	Ji	χ
Lamda	λ	Psi	ψ
Mu	μ	Omega	ω