



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN APARTARRAYO EN BOND
GRAPH
T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTA:

SALVADOR HERNÁNDEZ GARCÍA

ASESOR:

DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE DEL 2013

Agradecimientos

Agradezco a la vida por haberme permitido darles la satisfacción a mis padres de verme terminar la Licenciatura.

A Lucia Talavera Díaz por haberme apoyado en los tiempos más difíciles que se me presentaron en la facultad y haberme dado dos hijas maravillosas.

Mi más sincero agradecimiento a toda mi familia por todas las muestras de apoyo económico y moral que me brindaron durante mi estancia en la facultad.

Agradezco a todos los profesores que invirtieron su tiempo en mi formación académica.

Le agradezco a Martin García Calderón por todo el apoyo que me brindo y sobre todo por la amistad y la confianza que deposito en mi persona.

Mi sincero agradecimiento a mi asesor el Dr. Gilberto Gonzáles Avalos por todas sus asesorías y recomendaciones que me brindo para que este trabajo de investigación llegara a su fin satisfactoriamente mil gracias Doctor.

A la profesora Leticia García Pineda por todas sus recomendaciones de redacción que me brindo durante el seminario de tesis.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Alejandra García Chimal y Salvador Hernández Vega, gracias padres, por inculcarme que la perseverancia es una virtud que todas las personas poseen pero que pocas llevan a la práctica, por todo el tiempo que invirtieron en mi persona y que se tradujo en enseñanzas para enfrentar los retos que el futuro nos depara.

A las fuentes de inspiración que la vida me brindó Dulce Alejandra y Kenia.

Resumen.

En el presente trabajo se va desarrollar el modelado y simulación de un apartarrayo, utilizando una herramienta llamada Bond Graph.

Se les llama apartarrayos porque son los encargados de absorber las sobretensiones causadas por descargas atmosféricas, por maniobras de mantenimiento, accidentes de aves entre fases u otras.

Para el inicio de este análisis es necesario determinar las causas o factores que llevaron a la utilización de estos elementos, dentro de las que trataremos son sobretensión por descargas atmosféricas, sobretensión por maniobras de mantenimiento entre otras.

Descargas atmosféricas este fenómeno natural, se presenta con mayor frecuencia en líneas de transmisión, subtransmisión y subestaciones a la intemperie, dividido a que cada 6 meses la temporada de lluvias se hace presente, teniendo como consecuencia un índice muy elevado de descargas atmosféricas y una alta incidencia en las redes eléctricas.

Estos fenómenos destruyen equipos muy costosos y en muchas ocasiones provocaron accidentes mortales, lo cual ha llevado a la utilización de dispositivos de protección.

Dentro del modelado pretendemos dar a conocer el funcionamiento apropiado de un apartarrayo, así como los elementos a los que protege, haciendo énfasis en la importancia que tiene dentro de la infraestructura de Comisión Federal de Electricidad, describiendo las partes elementales y funcionamiento de las mismas.

Las simulaciones se presentan desde un enfoque de análisis de circuitos eléctricos, con la finalidad de determinar la mayoría de características benéficas y en base a ellas, dictaminar si el modelo presentado es factible de investigaciones futuras y en base a ella realizar prototipos que puedan comprobar la eficiencia del modelo en estudio y hacer más eficiente la protección de los sistemas eléctricos por medio de apartarrayos.

ABSTRAC.

In this paper we will develop modeling and simulation of in arrester, using a tool called Bond Graph.

They are called arresters that are responsible for absorbing surges caused by lightning, for maintenance maneuvers, crashes or other birds between phases.

For the beginning of this analysis is necessary to determine the causes or factors that led to the use of these elements, among which are try lightning overvoltage, overvoltage maintenance maneuvers among others.

Lightning this natural phenomenon occurs more frequently in transmission lines, substations and subtransmission outdoors , divided every 6 months to the rainy season is present , having resulted in a very high rate of lightning and high impact on electricity networks.

These phenomena destroy expensive equipment and often caused fatal accidents, which has led to the use of protective devices.

Within the modeling intend to publicize the proper functioning of a arrester as well as elements that protects , emphasizing the importance of infrastructure within the Federal Electricity Commission , describing the basic parts and operation thereof .

Simulations are presented from the perspective of electrical circuit analysis, in order to determine the most beneficial features and based on them, decide whether the model presented is feasible for future research and prototyping based on it they can check the efficiency of the model under study and streamline the protection of electrical systems through arrester.

Contenido

Pág.

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen.....	iv
Abstrac.....	v
Contenido.....	vi
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas.....	x
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	xi

Capítulo 1

Introducción.....	1
1.1 Protección de sistemas eléctricos ante sobretensiones.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Metodología de la investigación.....	3
1.5 Organización de la tesis.....	4

Capítulo 2

Antecedentes de apartarrayos y el modelado en Bond Graph.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.1.1 Antecedentes de apartarrayos.....	5
2.1.2 Tipos de descargas.....	6
2.1.3 Características de la descarga atmosférica.....	7
2.1.4 Corriente de las descargas.....	7
2.1.5 Mecanismos de protección.....	8
2.1.6 Desarrollo y modernización de los Apartarrayos.....	13
2.1.6.1 Los primeros Apartarrayos (Descargadores).....	14
2.1.6.2 Evolución de los apartarrayos.....	15
2.1.7 Definición y características de Apartarrayos.....	18

2.1.8 Principio de funcionamiento de un apartarrayo.....	22
2.1.9 Clasificación de los apartarrayos según su nivel de protección.....	23
2.2 Modelado en Bond Graph.....	24
2.2.1 Introducción.....	24
2.2.2 Antecedentes de Bond Graph.....	24
2.2.3 Descripción de los componentes de Bond Graph.....	25
2.2.4 Causalidad.....	31
2.2.5 Causalidad integral y derivativa.....	33
2.2.6 Bond activo.....	34
2.2.7 Obtención de las ecuaciones diferenciales.....	35
2.2.8 Procedimiento para el modelado de sistemas.....	35
2.2.9 Estructuras de unión en sistemas multipuerto.....	38
2.2.9.1 Vectores Clave (Vectores significativos).....	38
2.2.9.2 Relaciones de campo y Ecuación de estado.....	39
Capítulo 3	
Modelado de un Apartarrayo en un enfoque de Bond Graph.....	42
3.1 Introducción.....	42
3.2 Modelo No-lineal de un apartarrayo.....	43
3.3 Modelo lineal de un apartarrayo.....	47
3.4 Estado del apartarrayo en el sistema eléctrico.....	48
3.5 Modelado de un apartarrayo en Bond Graph.....	50
Capítulo 4	
Simulación de circuitos protegidos con apartarrayo en 20-SIM.....	60
4.1 Introducción.....	60
4.2 Circuito básico.....	61
4.2.1 Simulación del circuito básico.....	62
4.3 Caso de estudio de un circuito protegido con un apartarrayo.....	64
4.3.1 Simulación del circuito protegido por apartarrayo.....	66
4.4 Caso de estudio múltiple.....	69
4.4.1 Simulación del circuito múltiple (Voltaje).....	70

4.4.2 Simulación del circuito múltiple (Corriente).....	72
---	----

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones.....	76
--	-----------

5.1 Conclusiones.....	76
-----------------------	----

5.2 Recomendaciones.....	77
--------------------------	----

Bibliografía.....	78
--------------------------	-----------

Índice de Figuras

Figura 2.1 Descarga atmosférica (Relámpago).....	6
Figura 2.2 Descarga que incide en la red eléctrica.....	9
Figura 2.3 Explosor de puntas (Gap).....	14
Figura 2.4 Explosor con resistencia en serie.....	15
Figura 2.5 Apartarrayos de carburo de silicio.....	18
Figura 2.6 Apartarrayos autovalvular.....	21
Figura 2.7 Apartarrayos de óxido de zinc.....	22
Figura 2.8 Bond.....	25
Figura 2.9 Bond con sus variables de potencia.....	25
Figura 2.10 Tetraedro de estado.....	28
Figura 2.11 Puertos Activos a) Fuente de esfuerzo b) Fuente de flujo.....	28
Figura 2.12 Bond Graph de un Transformador (a) y de un Girador (b).....	29
Figura 2.13 Unión-0.....	30
Figura 2.14 Unión-1.....	31
Figura 2.15 Causalidad para un bond.....	32
Figura 2.16 Union-0 con Causalidad.....	33
Figura 2.17 Elemento-C a) Causalidad derivativa b) Causalidad integral.....	34
Figura 2.18 Bond activo.....	34
Figura 2.19 Simplificación de Bonds.....	36
Figura 2.20 Ejemplo de un circuito eléctrico.....	36
Figura 2.21 Procedimiento para obtener el Bond Graph de un circuito eléctrico.....	37
Figura 2.22 Bond Graph del ejemplo de un circuito eléctrico.....	37
Figura 2.23 Diagrama de bloques de la estructura de unión de un Bond Graph.....	38
Figura 3.1 Apartarrayo y su circuito equivalente (modelo real).....	44
Figura 3.2 Sección No-lineal de un apartarrayo.....	45
Figura 3.3 Modelo lineal del apartarrayo.....	48
Figura 3.4 Apartarrayo Conectado al sistema eléctrico.....	50
Figura 3.5 Circuito equivalente de la figura 3.4.....	51
Figura 3.6 Circuito equivalente (Línea-Apartarrayo-Carga).....	51

Figura 3.7 Pasos 1-4 para la obtención del Bond Graph.....	52
Figura 3.8 Equivalente en Bond Graph del circuito (Línea-Apartarrayo-Carga).....	53
Figura 3.9 Bond Graph obtenido con su respectiva causalidad.....	53
Figura 4.1 Circuito básico.....	61
Figura 4.2 Bond Graph (Circuito Básico).....	62
Figura 4.3 Simulación (Estado estable).....	63
Figura 4.4 Simulación (Bajo falla).....	64
Figura 4.5 Circuito protegido con apartarrayo.....	65
Figura 4.6 Bond Graph (Circuito protegido por Apartarrayo).....	65
Figura 4.7 Simulación en estado estable (Circuito protegido por Apartarrayo).....	67
Figura 4.8 Simulación bajo falla (Circuito protegido por Apartarrayo).....	68
Figura 4.9 Circuito (Caso de estudio múltiple).....	69
Figura 4.10 Bond Graph Caso de estudio múltiple (voltaje).....	70
Figura 4.11 Simulación del circuito caso de estudio múltiple en estado estable (volteje).	71
Figura 4.12 Simulación del circuito caso de estudio múltiple bajo falla (voltaje).....	72
Figura 4.13 Bond Graph caso de estudio múltiple (Corriente).....	73
Figura 4.14 Simulación del circuito caso de estudio múltiple en estado estable (corriente).....	74
Figura 4.15 Simulación del circuito caso de estudio múltiple bajo falla (corriente).....	75

Lista de tablas

Tabla 2.1 Variables Generalizadas de varios sistemas físicos.....	26
Tabla 2.2 Elementos Pasivos (R, C, I).....	27
Tabla 2.3 Consideraciones causales para elementos básicos.....	32

Lista de Símbolos y Abreviaturas

R	resistencia
V	voltaje
I	corriente
K	kilo
M	mega
G	giga
<i>p</i>	<i>pico</i>
<i>n</i>	<i>nano</i>
μ	<i>Micro</i>
<i>m</i>	<i>mili</i>
m	metros
W	watts
Hz	Hertz
W-h	watt hora
<i>t</i>	tiempo
d/dt	derivada con respecto del tiempo
Ω	Ohms
P	potencia
A	amperes
H	henrios
f	faradios
L	inductancia
C	Capacitancia
Cd	corriente directa
Ca	corriente alterna
BG	Bond Graph
CFE	Comisión Federal de Electricidad

Capítulo 1

Introducción

1.1 Protección a sistemas eléctricos ante sobretensiones

La energía eléctrica es primordial para el desarrollo económico de cualquier país (ciudad), dicha energía debe de subministrarse de forma adecuada y oportuna en los puntos de consumo, para eso es necesario un sistema eléctrico adecuado que permita realizar esta función satisfactoriamente.

La red de distribución de Energía Eléctrica o Sistema de Distribución de Energía Eléctrica es la parte del sistema de suministro eléctrico cuya función es el abasto de energía desde la planta generadora, red distribución hasta los usuarios finales (medidor del cliente).

Sobretensión se define como cualquier valor de tensión entre un conductor de fase y tierra o entre conductores de fase que tiene un valor pico que exceda el valor nominal de operación del equipo o sistema eléctrico. Dentro de las cuales tenemos la sobretensión de origen atmosférico que tiene su origen en una descarga atmosférica directa o indirectamente sobre la red eléctrica. Sobretensiones por maniobra, están caracterizadas por la operación de un equipo de maniobra como resultado de una falla o de otra causa en un determinado punto del sistema, involucrando las tres fases o una fase y tierra. Sobretensiones temporales, una sobretensión temporal está caracterizada por una onda de tensión elevada y de naturaleza oscilatoria y largo tiempo de duración, ocurre en un punto definido del sistema, involucrando las fases o una fase y tierra.

Los sistemas de energía eléctrica están sujetos a sobrevoltajes internos y externos que pueden dar lugar a altos voltajes temporales. Los sobrevoltajes temporales ocurren en los sistemas de energía por una variedad de razones tales como fallas, operación de interruptores y descargas atmosféricas (rayos). Sin comparación, los sobrevoltajes más severos son los que resultan de las descargas atmosféricas que inciden en el sistema de

energía. Es posible que los sobrevoltajes puedan ser muy altos y den lugar a fallas del aislamiento del aparato de energía con resultados destructivos.

Las líneas de transmisión y redes aéreas de distribución rurales y urbanas, constituyen la parte de los sistemas eléctricos que es muy vulnerable a las descargas atmosféricas, que en ciertas condiciones pueden provocar sobretensiones elevadas en el sistema (denominadas sobretensiones de origen externo) llegando a producir la quema del equipo, tanto de la compañía suministradora como de los usuarios.

Para proteger a los sistemas eléctricos de las ondas de sobretensión origen (atmosférico, por maniobra, etc.), se deben instalar equipos apropiados que reduzcan el nivel de sobretensión a valores que sean compatibles con la soportabilidad de estos sistemas. A estos equipos protectores contra sobretensiones se les conoce como *apartarrayos*, éstos se usan para proteger los distintos equipos de una red eléctrica, subestación eléctrica y en ocasiones a un sólo transformador, como es el caso de las subestaciones tipo poste.

La instalación de los apartarrayos obedece a la necesidad que presentan los equipos o parte del sistema eléctrico de protección contra sobretensiones, con el propósito de mejorar el comportamiento de las líneas de transmisión aéreas y reducir los daños originados por los rayos (descargas atmosféricas).

1.2 Objetivo

La presente investigación tiene como finalidad el modelado y simulación de un Apartarrayos en Bond Graph (BG) ante la presencia de una falla, desde el punto de vista de circuitos eléctricos, lo que permitirá analizar y visualizar los esfuerzos mecánicos y eléctricos a los que se ven sometidos los elementos internos de un apartarrayos cuando se presenta alguna falla en el sistema. Todo esto sin dejar de lado las características de operación, principio de funcionamiento, características de protección, etc. Además, tratando de que éste escrito sea una referencia y punto de partida para futuras investigaciones.

1.3 Justificación

En tiempos donde la calidad de la energía eléctrica es un requisito para realizar procesos industriales complejos, es de vital importancia incursionar en nuevas alternativas de análisis de circuitos eléctricos como lo es Bond Graph, herramienta que proporciona métodos para el modelado y alternativas para la simulación. Asimismo, resaltar que esta herramienta es una alternativa viable y confiable para su implementación en las diferentes ramas y disciplinas en estudio y/o investigación.

Debido que los apartarrayos son los dispositivos más utilizados para combatir las sobretensiones en los sistemas eléctricos (Instalación eléctrica), quedando de manifiesto su importancia dentro del esquema eléctrico; es de suma importancia seguir analizando las características de operación de éste dispositivo, asimismo, buscando las fuentes que influyen en el funcionamiento erróneo del mismo, con la finalidad de corregir y mejorar la calidad en su funcionamiento, lo que repercutirá directamente en la correcta distribución de la energía eléctrica.

1.4 Metodología de la investigación

Dado el caso que este es un tema poco investigado y existe poca información se revisarán textos que traten temas sobre descargas atmosféricas, sobretensiones, protecciones etc. echando mano de artículos técnicos referentes a apartarrayos, además de apoyarnos de especificaciones técnicas para su instalación en la red eléctrica.

Trataremos en primera instancia las descargas atmosféricas y los mecanismos utilizados para su protección posteriormente incursionaremos en los apartarrayos, dando a conocer sus antecedentes, dejando fundamentado los alcances y aplicaciones de Bond Graph. Para de ahí desprender el modelado del apartarrayo que es punto central de esta tesis, además de realizar pruebas de simulación para diferentes circuitos eléctricos protegidos por apartarrayo, llevando acabo comparaciones para visualizar si los resultados coinciden con la operación real de estos dispositivos de protección.

1.5 Organización de la tesis

Un fenómeno que afecta la red eléctrica de México provocando grandes disturbios en el proceso de transporte de energía, son las sobretensiones eléctricas causadas por diferentes fenómenos naturales, razón por la que el estudio del funcionamiento del apartarrayo toma relevancia, dado que el apartarrayo es el elemento de protección más utilizado para combatir los disturbios provocados por sobretensiones.

Este trabajo de tesis está organizado en cinco capítulos estos se describen brevemente: El capítulo 1 inicia con una breve descripción de los efectos provocados por la presencia de sobretensiones en el sistema eléctrico, razones que consolidan el estudio del apartarrayo.

El capítulo 2 es dedicado a la descripción de los apartarrayos dando una amplia y clara explicación de la evolución que este elemento ha sufrido desde su presencia en la red eléctrica, además de describir el proceso de modelado en Bond Graph.

En el capítulo 3 se obtiene el modelo matemático siguiendo el procedimiento planteado por BG descrito ampliamente en el capítulo 2, para de aquí partir al capítulo 4 y en base al modelo obtenido en Bond Graph realizar la simulación de circuitos protegidos por apartarrayos.

Por ultimo en el capítulo 5 se agregan las conclusiones y comentarios finales de este trabajo, también una serie de recomendaciones que utilicen como líneas de investigación de futuros trabajos.

Capítulo 2

Antecedentes de apartarrayos y el modelado en Bond Graph

2.1 Introducción

Las descargas atmosféricas, mejor conocidas como rayos. Son un fenómeno natural que es observado y temido por el ser humano desde que éste tiene noción.

Por el ambiente en donde se generan y ocurren las descargas atmosféricas son propias de un fenómeno climatológico, es decir qué; se ven comúnmente en la temporada de lluvias (Verano-Otoño) para el centro y sur de México. En esta época del año pueden ocurrir con mayor probabilidad pero son muy variadas en cantidad e intensidad las descargas.

2.1.1 Antecedentes de apartarrayos

Hacia la mitad del siglo XVIII Benjamín Franklin demostró por primera vez la naturaleza eléctrica del rayo. Elevando una cometa en medio de una tormenta eléctrica y conduciendo una descarga hasta un condensador (botella de Leyden), demostró que había almacenado algo que presentaba el mismo comportamiento que las cargas eléctricas (que se generaban en esa época por fricción). Más tarde, el mismo B. Franklin inventaría el pararrayos, para defender las edificaciones y personas de los efectos del rayo.

En términos generales podemos afirmar que el rayo es un fenómeno frecuente e inevitable como el viento, la lluvia o cualquier otro fenómeno natural.

Una descarga atmosférica consiste en una descarga eléctrica, en forma de rayo luminoso, desde una nube cargada eléctricamente hacia la tierra o entre nubes, es el rompimiento del aislamiento (aire) entre dos superficies cargadas eléctricamente con polaridades opuestas. Este proceso es terminado por una descarga que lleva corrientes de entre 5 y 100 KA, llegándose a producir descargas hasta de 200 KA, la descarga toma una

fuerte intensidad luminosa (Relámpago) y posteriormente un trueno que, es la señal acústica generada por un canal de aire caliente que se expande rápidamente tal proceso dura un tiempo muy breve, la figura 2.1 ilustra el fenómeno descrito.



Figura 2.1 Descarga atmosférica (Relámpago).

El nivel isocerámico, número de días del año en los que se escuchan truenos, es actualmente el índice utilizado como indicativo de la cantidad de actividad eléctrica atmosférica de una región. Es vital conocer la incidencia de descargas atmosféricas para proyectar posibles redes eléctricas.

2.1.2 Tipos de descargas

Una descarga eléctrica en el aire de la atmósfera puede ocurrir dentro de una misma nube, o de una nube a otra, en este caso la identificamos como intra nube. Si la descarga tiene lugar entre la nube y el suelo toma el nombre de “rayo”. Existe la posibilidad que la descarga ocurra en un sentido o en el otro y que la carga migrante pueda ser positiva o negativa. Sin embargo, por opinión concordante de distintos autores, entre las descargas nube a suelo, hay prevalencia de las que transportan carga negativa. Se considera que sólo 10 % de los rayos son del tipo positivo es decir transportan carga eléctrica positiva. A los fines de lograr protección contra los efectos destructivos o dañinos para redes eléctricas,

conviene orientar el estudio en los efectos que producen en redes eléctricas, subestaciones y los diferentes elementos que las componen.

2.1.3 Características de la descarga atmosférica

Considerando la nube cargada negativamente con respecto al suelo, una vez alcanzados los valores suficientemente altos de la intensidad de campo eléctrico en V/m, dentro de la nube de tormenta se inicia una descarga predecesora (leader), poco luminosa, con débil corriente eléctrica, que progresa a saltos de algunas decenas de metros, siguiendo caminos erráticos pero con avance neto hacia el suelo.

El camino de ionización que se inicia, lleva un primer flujo de carga hacia capas más bajas. Este primer flujo es llamado el líder. El líder desciende unos 50 a 100 metros en un microsegundo, detiene su marcha unos 50 microsegundos mientras se acumula la carga transferida desde la nube y se forma un nuevo camino ionizado que va a crear un nuevo avance del líder. Estos avances y reposos de este primer flujo de carga, hacen que se le conozca como el líder escalonado. Este sigue avanzando hasta llegar cerca de los objetos y estructuras más altos, los cuales empiezan a emitir chispas que van al encuentro del líder.

Al cerrarse eléctricamente el camino a tierra, la carga se desplaza a una velocidad vertiginosa, produciéndose la descarga de retorno de gran luminosidad, etapa del rayo considerada como la más energética de todas.

El campo eléctrico a nivel del suelo aumenta, siendo más intenso (hasta 500 kV/m) en las partes sobresalientes de la superficie, edificio en altura, árbol, antena, etc., por el “efecto de punta”.

2.1.4 Corriente de las descargas

Dentro del estudio que se ha suscitado en torno a las descargas se han generado mediciones estadísticas resulta que en general las características generales de las ondas de corriente medidas, se encuentran dentro de los siguientes valores:

- a) Duración del frente de 0.5 a 20 microsegundos (μs).
- b) Duración al semivalor de la cola 15 a 90 microsegundos (μs).
- c) La medición de la corriente de descarga puede ser expresada matemáticamente como:

$$i = i_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (2.1)$$

Dónde:

i_0 = Valor cresta de la corriente de rayo.

t = Instante de tiempo considerado desde el origen.

a y b = constantes cuyo valor es del orden de los siguientes valores.

$$a = 4 * 10^4$$

$$b = 4 * 10^6$$

2.1.5 Mecanismos de protección

El conocimiento de las características principales de la descarga atmosférica es de fundamental importancia para el establecimiento de medios o mecanismos eficaces de protección, aunque es evidente la enorme dificultad que representa la determinación experimental de las mediciones para determinar las características de la descarga ya que este es un fenómeno causal difícilmente reproducible y que tiene cantidades (variables) que no pueden ser fácilmente valorados (medidas). El único elemento común en todas las descargas atmosféricas es su polaridad (corriente del rayo) que es unidireccional y no oscilatoria.

En la práctica es común proteger las líneas de transmisión en áreas en donde la red se considera vulnerable, tal protección puede extenderse a lo largo de la línea de transmisión o pueden ser sólo algunos kilómetros adyacentes a una subestación, etc.

A) Hilos de guarda

La protección considera uno o más conductores a tierra que están conectadas de torre a torre por encima de los conductores de fase a lo largo del estrecho de vía. Estos conductores están unidos en las torres a un potencial de tierra bajo condiciones normales. La intención de estos conductores es que intercepten las posibles sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas.

El principal interés de la ubicación de los conductores a tierra (hilos de guarda), con respecto a los conductores de fase, es que ellos sean más atractivos al rayo que los conductores de fase.

Los hilos de guarda se colocan por encima de los conductores de fase y están unidos a tierra en los apoyos de la línea. De esta manera se reduce el riesgo de caída directa de una descarga atmosférica sobre los conductores. Si el rayo cae sobre un apoyo, la corriente circula por la estructura metálica de apoyo y a través de su toma de tierra da lugar a la aparición de una magnitud de tensión entre la estructura y los conductores de fase. La tensión originada depende de la intensidad de la descarga y de la impedancia que presenta el conjunto (apoyo, hilos de guarda, toma de tierra).

Si la descarga cae sobre el hilo de guarda, se originan dos ondas de la misma intensidad y magnitudes correspondientes al rayo, que se dirigirán en sentidos opuestos hacia los apoyos por los cuales se descargan en la figura 2.2 se observa que una descarga atmosférica incide en una estructura.



Figura 2.2 Descarga que incide en la red eléctrica.

➤ **Posición de los hilos de guarda**

Para eliminar totalmente la influencia del campo electrostático atmosférico sobre los conductores habría que conducir alrededor de ellos una jaula de Faraday, lo que es económica y técnicamente imposible. Sin embargo, la experiencia confirma que uno o dos cables colocados sobre los conductores de fase y paralelos a estos garantizan una discreta protección contra descargas directas sobre los conductores de fase. Tales cables de protección denominados hilos de tierra (hilos de guarda) se colocan en el extremo más alto de los soportes (Torres) y se conectan mediante la misma estructura de soporte a tierra. Generalmente se utilizan como hilos de guarda cables de acero con secciones de 25 hasta 50 mm².

La probabilidad de incidencias de rayos directos en los conductores disminuye en líneas protegidas con dos hilos de guarda hasta un valor casi despreciable. La eficacia de la protección con hilos de guarda depende de la posición de los hilos respecto a los conductores.

B) Jaula de Faraday

El sistema consiste en la recepción del rayo a través de un conjunto de puntas captadoras unidas entre sí por cable conductor, formando una malla, y derivarla a tierra mediante una red de conductores.

C) Punta Franklin

Su misión es provocar la excitación atmosférica por encima de cualquier otro punto de la estructura a proteger, para aumentar la probabilidad que la descarga incida en su zona de influencia, y derivar a tierra la corriente del rayo.

D) Cuernos de arqueo (Gaps)

Tienen como propósito principal arquear cuando existe una sobretensión de una magnitud y enviarla a tierra, para esto es necesario ajustar la separación entre los gaps de los cuernos de

arqueo de boquillas de transformadores, cuchillas, etc. a la separación necesaria de acuerdo con el nivel de tensión para protección y considerar las condiciones atmosféricas que los afectan, su uso es limitado debido al tiempo de retardo que presenta al accionar.

E) Pararrayos

El pararrayos es una varilla puntiaguda de metal buen conductor de electricidad, instalada en la parte más elevada de un edificio o cualquier estructura que lo requiera y unida por un grueso cable de cobre a una pancha del mismo metal introducido profundamente en la tierra. Los electrones (cargas eléctricas negativas) pueden trasladarse fácilmente por el apartarrayos, si la descarga se genera, recorrerá el camino más corto y fácil que es el que conduce al pararrayo, el rayo al tocar la punta metálica, se descarga a tierra sin causar daños en la estructuras protegidas.

➤ Partes de un Pararrayos

El pararrayos está conformado por una Barra cilíndrica con dimensiones de 3 a 5 metros de altura, una punta o puntas de hierro galvanizado o de cobre.

El conductor aéreo con el que es dotado: está formado de cable de cobre de más de 8 mm de diámetro o cable de hierro de superior a los 11 mm de diámetro, en algunas ocasiones se utilizan las mismas estructuras metálicas. La condición es que no dentro de su cuerpo no contengan materiales que puedan funcionar como aislante.

El conductor subterráneo: consiste en placas de cobre o de hierro galvanizado de un metro cuadrado de superficie por lo menos, hundidas en tierra húmeda y en lazar el conductor aéreo. Si el terreno es muy seco se recomendable realizar un tratamiento de tierra para que la resistencia ofrecida por esta se la requerida y pararrayos realice correctamente su función.

F) Apartarrayos

Es un dispositivo protector que limita las sobretensiones transitorias descargando o desviando la sobrecorriente así producida, y evitando que continúe el paso de la corriente eléctrica, capaz de repetir esta función.

El apartarrayos se conecta entre línea y tierra, consiste básicamente de elementos resistores en serie con gaps o explosores. Los elementos resistores ofrecen una resistencia no lineal, de manera tal que para voltajes a la frecuencia normal del sistema la resistencia es alta y para descargar corrientes la resistencia es baja. Los explosores o gaps son gaps en aire de longitud apropiada. Con voltajes de operación normales el apartarrayos no conduce.

Cuando una onda viajera se desplaza por la línea aérea, pasa por el apartarrayos y baja a tierra, ya que la resistencia que se presenta es baja y la onda se deriva a tierra, después de unos pocos microsegundos la onda desaparece y se restablece el voltaje normal a través del apartarrayos; la resistencia que presenta el apartarrayos a este voltaje es muy grande, por lo tanto, la corriente del arco se reduce y el voltaje a través del gap no es suficiente para mantener el arco, por lo que el flujo de la corriente a tierra se interrumpe y se restablecen las condiciones normales.

G) Protección por relevadores

Existen diferentes tipos de relevadores usados para la protección de sistemas eléctricos de potencia, sistemas eléctricos de distribución, subestaciones eléctricas, etc. Normalmente accionados por una señal eléctrica y eventualmente por otro tipo de elementos como son los relevadores accionados por temperatura o presión, particularmente para sistemas eléctricos de potencia se utilizan relevadores accionados eléctricamente.

La función de la protección por relevadores es originar el retiro rápido del servicio de cualquier elemento del sistema cuando este sufre un corto circuito o cuando empieza a funcionar en cualquier forma anormal que pueda originar daño o interfiera con el funcionamiento eficaz del sistema.

Protecciones de instantáneas son aquellas que actúan tan rápido como sea posible o sea que se accionan en el instante en que detectan una función anormal en el sistema.

Protecciones de tiempo de retardo son aquellas que de manera intencionada se programan para que respondan después de un tiempo de umbral, el cual les permite diferenciar entre transitorios y fallas francas en el sistema eléctrico.

H) Sistema de tierras

Un sistema de tierras efectivo, consiste en forma típica de varillas de tierra, cables desnudos interconectados formando una malla y las conexiones a la estructura y partes metálicas de la instalación o estructura.

Las funciones del sistema de tierras son: una protección propia para la operación apropiada del sistema y una protección propia para el personal, es decir, la conexión a tierra de los sistemas de potencia minimiza la posibilidad de accidentes con el personal y daño en el equipo (equipo de potencia y equipo de comunicaciones), y por otro lado, maximiza la confiabilidad del sistema eléctrico y de los equipos de comunicaciones. También, cuando se presentan condiciones anormales, tales como ondas de sobretensiones, descargas atmosféricas, o bien, fallas a tierra del sistema, el sistema de tierras proporciona un método seguro y efectivo para controlar y disipar las sobrecorrientes resultantes, mismas que se deben dispersar sin causar daño al personal y a los equipos.

2.1.6 Desarrollo y modernización de los Apartarrayos

Desde el inicio de la industria eléctrica la ingeniería inicio el análisis del comportamiento de fenómenos naturales y el efecto que ellos causaban a las líneas de transmisión, uno de estos fenómenos fue la descarga atmosférica.

Desde que se comenzó a transmitir la energía eléctrica en Corriente Alterna (AC), hace aproximadamente 1200 años, la protección del sistema eléctrico contra descargas

atmosféricas ha sido un trabajo laborioso, se han implementado muchos equipos de protección dentro de este grupo encontramos a los gaps y resistencias no lineales o en combinación, ahora conocidos como Apartarrays o descargadores.

Por pocos años se usaron los gaps, saltando de estos a la combinación de ambos; los gaps combinados con resistencias no lineales fueron usados durante los siguientes 70 años y las resistencias no lineales sin gaps se ha utilizado los últimos 18 años.

2.1.6.1 Los primeros Apartarrays (Descargadores)

Los primeros apartarrays que utilizaron como protección del sistema eléctrico fueron simples separaciones de aire (gaps o explosores) entre la línea y la tierra del cual se observan algunas ventajas:

1. La tensión depende en alto grado de la polaridad.
2. Retraso de funcionamiento, dado por el tiempo de formación de la magnitud de la sobretensión.
3. El arco no se extingue por sí mismo, debido al alto grado capacitivo que presenta el dispositivo.

Muchos de los descargadores fabricados hace 50 años o más aún están en servicio, la figura 2.3 muestra el diagrama esquemático de este elemento.

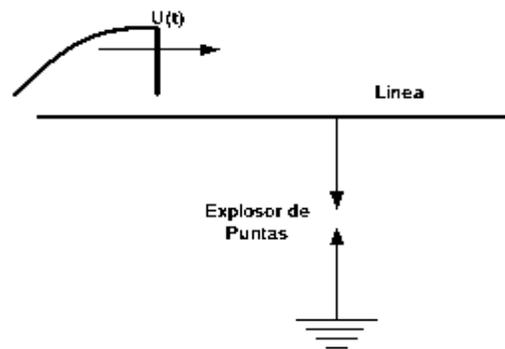


Figura 2.3 Explosor de puntas (Gap).

2.1.6.2 Evolución de los apartarrays

Estos elementos implementados para la protección de redes eléctricas evolucionaron rápidamente debido a su eficacia y constante demanda generada por una alta incidencia de descargas atmosféricas sobre las líneas áreas

a) Explosor de puntas (Gaps) (1892-1908)

Las protecciones implementadas durante este periodo inicial fueron simples separaciones entre la línea y la tierra, los gaps se diseñaron para conducir a bajos voltajes permitiendo suministrar una excelente protección contra una sobretensión por descarga atmosférica prácticamente sin voltaje residual. Sin embargo, los simples espacios de aire no eran capaces de aterrizar la corriente proveniente del sistema sin que se tuviera una resistencia conectada en serie para limitar su magnitud y mejorar el sistema de descarga, la figura 2.4 ilustra el progreso realizado.

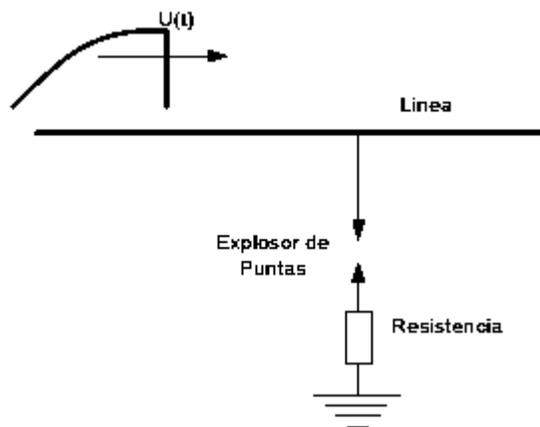


Figura 2.4 Explosor con resistencia en serie.

Una resistencia lineal permite la limitación de corriente requerida produciendo voltajes residuales, aún a moderadas corrientes de descarga, mayores que el voltaje soportado por los sistemas considerablemente aislados; por lo tanto los espacios de aire no son dispositivos que sirvan para los requisitos de un circuito de interrupción para descargar la corriente del sistema.

Una de las mejoras hechas durante este período de tiempo fue el desarrollo de múltiples gaps. No obstante, el grado de protección a descargas era limitado por disparos erráticos causados por presión y humedad del aire y por la erosión de los electrodos que resulta de las grandes corrientes descargadas.

b) Resistencias no lineales basadas en huecos y capas reformadas (1908-1930)

El primer apartarrayo que empleo un elemento valvular no lineal fue un descargador de celda de aluminio el cual se introdujo al mercado en 1908. El apartarrayo se compone de un gap esférico en serie con un tanque que contiene celdas de aluminio. Las celdas, cada una con un voltaje nominal de 300 volts, eran conos invertidos separados cerca de 0.7 centímetros. Un electrolito se vertía en los conos llenándolos parcialmente, un grupo de conos en posición invertida se colocaban en un grupo de aceite.

La capa formada podría ser perforada por una descarga atmosférica pero esta se restauraría rápidamente después de la descarga. La limitación de la corriente fue buena, pero el voltaje residual fue alto y en algunas veces erráticas. Además, los apartarrayos eran físicamente grandes y requerían de que se les diera mantenimiento constantemente, incluyendo la necesidad de cerrar la serie de gaps por un instante una vez al día. La justificación del cierre, era la capa de los recipientes; se disolvía gradualmente cuando no fluía corriente y el accionarlo momentáneamente hacia fluir corriente y reformaba la capa.

c) Descargadores con capa de óxido (1920-1930)

Estos descargadores se produjeron para aplicaciones en transmisión aproximadamente desde 1920 hasta 1930, y una versión modificada para aplicaciones en distribución se produjo aproximadamente en 1955. Estos descargadores consistían en gaps en serie con un número de celdas que contenían peróxido de plomo.

d) Resistencias de carburo de silicio con gaps no activos (1930-1954)

Estos eran bloques valvulares no lineales construidos de carburo de silicio y una alta temperatura asociada, se introdujeron al sistema en 1930. Los bloques valvulares de esta condición se usaron en apartarrayos de tipo estación durante 50 años; el voltaje de estos bloques fue aproximadamente de $V=ki^\alpha$, con alfa en un rango de 3 a 6 dependiendo del grado de silicio. Otro de los cambios fue mejorar la capacidad de descarga del material debido a que los niveles de protección en ondas de impulso por maniobra eran muy grandes en muchos casos de operación, además las líneas eran relativamente cortas y en pocas excepciones operaban a voltajes inferiores a los 230 kv. Los apartarrayos de carburo de silicio mejoraron considerablemente respecto a los primeros apartarrayos. El voltaje residual se redujo cerca de un 40% respecto a los descargadores de capa de óxido. Además el tamaño se redujo en un 30% y su volumen en un 80%.

e) Apartarrayos convencionales o de carburo de silicio

Estos apartarrayos llamados también tipo válvula. Consisten en uno o varios descargadores (gaps), conectados en serie con una o más resistencias no lineales. Sus elementos internos están protegidos del medio ambiente por una capsula de porcelana la cual se llena de nitrógeno seco con sellos elásticos en los extremos. Están dotados de una membrana que libera la presión del interior y una boquilla para dirigir los gases para los casos en que se producen explosiones cuando el descargador no es capaz de extinguir el arco eléctrico.

Las resistencias no lineales están constituidas por pequeños cilindros, agrupados por bloques de material prensado de SIC. Los explosores tienen formas de discos y en algunos casos mediante ionización son pre activados para obtener precisión en la tensión de cebado (Voltaje entre terminales en el que se produce la descarga).

Estos explosores descargan cuando la sobretensión sobre pasa un cierto umbral determinado por la tensión de cebado, interrumpen la corriente residual que resulta de la tensión de la operación normal la cual es limitada por las resistencias no lineales, en la figura 2.5 se ilustran los elementos que constituyen un apartarrayo de carburo de silicio.



Figura 2.5 Apartarrayos de carburo de silicio.

2.1.7 Definición y características de Apartarrayos

Los Apartarrayos están destinados a proteger los aislamientos de las instalaciones eléctricas contra sobretensiones producidas por descargas atmosféricas y en algunos casos por maniobra de operación.

La función del Apartarrayo consiste en conducir las corrientes de rayo a tierra y después restablecer la rigidez dieléctrica para eliminar la corriente a tierra producida por la tensión de operación normal.

Los Apartarrayos más simples fueron los explosores entre el conductor de línea y tierra. Aunque en la actualidad no se recomiendan, su principio de funcionamiento sirve para esclarecer la función de los Apartarrayos de cualquier tipo.

Al llegar la onda de sobre tensiones por descarga atmosférica al explosor, rompe la rigidez dieléctrica de este y a través del arco eléctrico se conduce a tierra. A la corriente del rayo se suma la corriente de frecuencia industrial (60 HZ en México), que pasa al aparecer el arco y permanece la sobre tensión. Si el neutro está aterrizado se produce un corto circuito que elimina por la protección con relevadores y si es flotante se pueden tener sobretensiones con pequeñas corrientes a tierra.

De lo anterior quedan claras las funciones del Apartarrayos:

- Eliminar las sobretensiones conduciéndolas a tierra.
- Eliminar el arco eléctrico de falla a tierra posteriormente a la sobre tensión.

Los Apartarrayos que se usan actualmente son autovalvulares y los de óxido de zinc. Los últimos están desplazando a los primeros. Antes se usaron además de los explosores los Apartarrayos de expulsión, que extinguían el arco eléctrico generando gases para el barrido del mismo.

a) Apartarrayos autovalvulares

El principio de operación de los Apartarrayos autovalvulares se basa en propiedad que tienen algunos materiales de codificar su resistencia en función de la tensión que se les aplica. Entre mayor sea la tensión aplicada, menor será la resistencia de los Apartarrayos autovalvulares.

Los elementos básicos de los Apartarrayos autovalvulares, el Apartarrayo se conecta a la fase de la línea a través de un explosor, lo cual permite que los elementos del Apartarrayo no se encuentren sometidos todo el tiempo a la tensión de la línea, ni a las sobretensiones por maniobra, no peligrosas para la instalación eléctrica. De esta manera se prolonga la vida del Apartarrayo, al evitarle esfuerzos continuos.

Los entrehierros de extinción sirven para eliminar el arco y son varios porque dividiéndolo en pequeñas partes, se facilita su extinción, las resistencias en paralelo tienen por objeto igualar los potenciales entre los entrehierros de extinción, permitiendo en esta forma que todos operen casi en las mismas condiciones.

La resistencia variable del Apartarrayo autovalvular está formada por discos a base de carburo de silicio embebidos en una masa aglutinante no conductora de cerámica o resina sintética. El diámetro de los discos de la resistencia no lineal depende del valor de la corriente que se pretende conducir a tierra y el número de ellos es proporcional a la tensión nominal.

Las resistencias de carburo de silicio están formadas por cristales conductores de carburo de silicio incrustados en material no conductor. A bajas tensiones. El flujo de electrones en los puntos de contacto de los cristales es despreciable, (resistencia muy grande), pero una vez que se pasa sobre la barrera de potencial, empieza a circular una corriente considerable, es decir, la resistencia óhmica se reduce bruscamente, la figura 2.6 se muestra un apartarrayos de tipo autovalvula.

El valor de la resistencia variable no depende de la dirección del flujo de la corriente, por lo cual el Apartarrayo manda a tierra las ondas de sobretensión de polaridad negativa o positiva sin ninguna dificultad. Como el Apartarrayos tiene comportamiento predominante resistivo, la corriente de fuga es resistiva, resultando por esto que la tensión y al corriente sean senoidales.

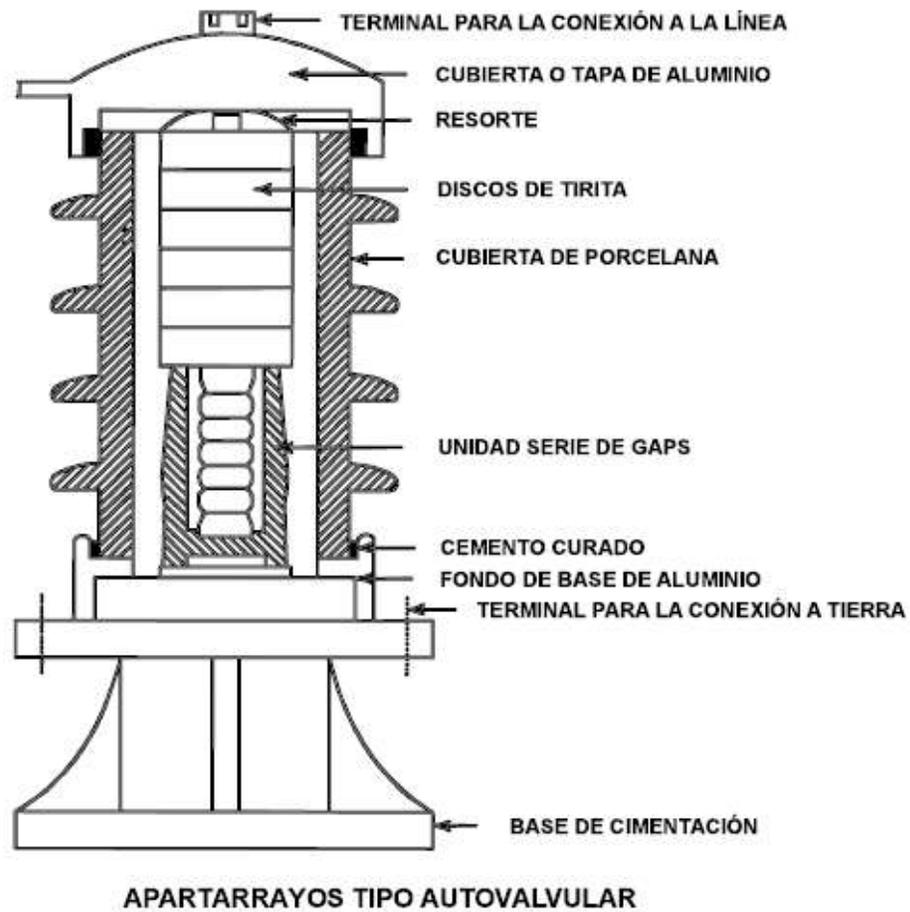


Figura 2.6 Apartarrayos autovalvular.

b) Apartarrayos de Óxido de Zinc

Los Apartarrayos de óxido de zinc tienen las características de estar conectados continuamente a la fase de línea, es decir a diferencia de los otros Apartarrayos, estos no se conectan a través de explosores, si no directamente. Esto lo permite el hecho de que el Apartarrayo tenga una mayor precisión, ya que puede con un 10 (%) por ciento por arriba de la tensión nominal. Por otra parte si el Apartarrayo está continuamente sometido a esfuerzos eléctricos, seguramente que tendrá que sufrir envejecimiento que actualmente aún

no ha sido debidamente estudiado, aunque se presume que su vida útil será de por lo menos de 50 años, en la figura 2.6 se observan las partes del apartarrayos de óxido de zinc.

Las capas de Intergranulares actúan como capacitores de cerámica. Por tener constantes dieléctricas en el rango de valores de 500 a 1000. El óxido de zinc puede tener aditivos como BiO, MnO, SbO y otros.

Para que los Apartarrayos de óxido de zinc funcionen adecuadamente es necesario seleccionar correctamente el punto de trabajo, de tal manera que la resistencia del Apartarrayo no permita prácticamente el paso de corriente de fuga a tierra.



Figura 2.7 Apartarrayos de óxido de zinc.

2.1.8 Principio de funcionamiento de un apartarrayo

Cuando aparece una tensión V en las terminales del descargador y es rebasada la tensión de reacción (tensión de cebado), se ceban los explosores permitiendo circular a través de las resistencias la llamada corriente de descarga, la corriente produce una caída de tensión llamada tensión residual. Cuando la descarga desaparece, la corriente a través de la

resistencia y el arco en los explosores corresponden a la tensión de operación normal. La corriente llamada residual es interrumpida en los explosores en donde por medio de un campo magnético que produce una bobina (bobina de soplado magnético) mueve el arco de corriente de sistema desde su punto de iniciación hasta el lugar más frío del gap en donde ocurre la extinción.

El explosor de un apartarrayo tiene una doble misión: debe cebarse en caso de aparición de una sobretensión y después debe suprimir la corriente de fuga a su paso por cero, después del amortiguamiento de la onda de sobretensión. En los apartarrayos más modernos esta misión está encomendada a dos explosores conectados en serie denominados respectivamente, explosor de cebado y explosor de extinción.

2.1.9 Clasificación de los apartarrayos según su nivel de protección

Los Apartarrayos se clasifican de acuerdo con su principal característica (voltaje) y campo de aplicación en tres grupos:

- Apartarrayos de tipo Distribución.
- Apartarrayos de tipo línea.
- Apartarrayos de tipo línea.

Los dispositivos de tipo distribución se encuentran en rangos voltajes de 1, 3, 6, 9, 12 y 18 KV. Son utilizados en la protección de transformadores de (distribución y medición), interruptores, reguladores de voltaje, bancos de capacitores, redes de distribución, etc. Estos apartarrayos son pequeños, por su poco peso son ideales para instalarse en postes, estructuras. Tienen buenas características de protección además de un bajo costo.

Los elementos de tipo línea, se encuentran en rangos de voltaje de 20, 25, 30, 37, 40, 50, 60 y 73 KV. Estos son usados normalmente para la protección de transformadores en subestaciones de media tensión.

Los dispositivos tipo estación son los que proporcionan las mejores características de protección con respecto a los anteriores. El rango de voltaje en el que se encuentran son 3, 6, 9, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 73, 109, 131, 145, 169, 195, y 242 KV. Por su extenso rango de voltaje son utilizados en la protección de un sin número de elementos tanto en media tensión como en alta.

2.2 Modelado en Bond Graph

2.2.1 Introducción

La mayoría de los sistemas ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, hidráulicos, económicos, biológicos, etc. Se caracterizan por generar ecuaciones no lineales, resultando muy difícil de entender el problema por estudiar, por esta razón se lleva a cabo aproximaciones lineales, que sean lo más parecidos a los modelos o situaciones físicas en estudio.

Los modelos pueden tomar un sin número de formas, esto depende del sistema que se trate y las situaciones a las que esté sometido. Los modelos son extraídos de un modelo real con la finalidad de resolver un problema en específico.

El modelado en Bond Graph representa un enfoque unificado para el modelado y manipulación de sistemas dinámicos de ingeniería que permita obtener sus ecuaciones de estado y permita la mayor cantidad de propiedades, dependencia lineal de sus elementos, basado en representación gráfica y la generalización de los conceptos de variable de flujo y esfuerzo.

2.2.2 Antecedentes de Bond Graph

La herramienta de Bond Graph definida por Paynter (1961), formalizada por Karnopp (1983), Rosenberg (1990) Thoma (1991) y Breedveld (1984), se encuentra entre el sistema físico y los modelos matemáticos asociados. Esta técnica no pretende ser universal; sin embargo, ha mostrada gran eficiencia en muchas aplicaciones entre ellas se localizan, el

diseño de sistemas, simulación y determinación de las leyes de control, siendo estas las razones las que la vuelven a estos métodos necesarios para la construcción de los modelos.

Un Bond Graph es una representación gráfica de un sistema dinámico donde una cantidad finita de componentes interactúan a través de puertos de energía. Estos componentes forman el sistema y describen como fluye la potencia a través del sistema.

En general Bond Graph permite construir modelos de sistemas eléctricos, magnéticos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos utilizando un conjunto de elementos ideales.

2.2.3 Descripción de los componentes de Bond Graph

El componente fundamental de un Bond Graph es el bond de energía utilizado para acoplar los puertos de energía de los elementos del sistema.

El Bond es representado por una semiflecha que indica la dirección en la que fluye la energía entre los puertos al cual está conectado, el Bond se muestra en la figura 2.8.

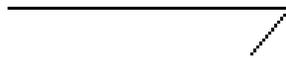


Figura 2.8 Bond.

Como existen interacciones de potencia cuando dos puertos son conectados, es importante clasificar la variedad de variables de potencia en un esquema universal y describir los tipos de multipuertos. Las variables de potencia son llamadas de esfuerzo $e(t)$ y flujo $f(t)$. Estas variables son de Bond generalizadas debido a que pueden ser utilizadas en todos los dominios de la energía. La figura 2.9 representa un Bond con sus variables de potencia asociadas a él.

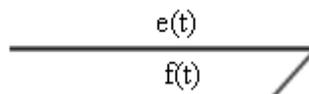


Figura 2.9 Bond con sus variables de potencia.

Algunos ejemplos que representan esta idea son voltaje y corriente para un sistema eléctrico, fuerza y velocidad para un sistema mecánico.

La relación de ambas variables está dada por:

$$P(t) = e(t) * f(t) \quad (2.2)$$

En sistemas que almacenan energía es necesario definir variable que representen el estado del sistema llamadas variables de energía denominadas momento $P(t)$ o esfuerzo acumulado $e_a(t)$ y desplazamiento $q(t)$ o flujo acumulado $f_a(t)$.

La tabla 2.1 muestra las variables generalizadas para varios sistemas físicos de los cuales destacamos, sistemas eléctricos, variables y ecuaciones que son utilizadas para el modelado mediante Bond Graph.

Tabla 2.1 Variables Generalizadas de varios sistemas físicos.

Variabes	General	Eléctrico	Mecánico Traslacional	Mecánico rotacional	Hidráulico
Esfuerzo	$e(t)$	$v(t)$ Voltaje	$F(t)$ Fuerza	$\tau(t)$ Par	$P_e(t)$ Presión
Flujo	$f(t)$	$i(t)$ Corriente	$V(t)$ Velocidad	$w(t)$ Velocidad angular	$Q(t)$ Caudal
Momento	$p(t) = \int e(t)dt$	$\lambda(t)$ Enlace de flujo	$P_R(t)$ Momento Rotacional	$H(t)$ Momento Angular	$P_p(t)$ Integral de presión
Desplazamiento	$q(t) = \int f(t)dt$	$q(t)$ Carga	$x(t)$ Distancia	$\theta(t)$ Angulo	$V(t)$ Volumen
Potencia	$P(t) = e(t)f(t)$	$v(t)i(t)$	$F(t)V(t)$	$\tau(t) w(t)$	$P_e(t) V(t)$
Energía	$E(p) = \int f(p)dp$ $E(q) = \int e(q)dq$	$\int i(\lambda)d\lambda$ $\int edq$	$\int q(P_R)dP_R$ $\int F(x)dx$	$\int w(H)dH$ $\int \tau(\theta)d\theta$	$\int Q(P_p)dP_p$ $\int P_p(V)dV$

a) Puertos -1 Pasivos

Son considerados elementos ideales a aquellos que presentan disipación de potencia y dos formas de almacenamiento de energía. Se denominan puertos pasivos a aquellos elementos que intercambian potencia en un punto o elemento sencillo pasivo.

Los elementos que muestran estas características son Resistencias (disipación de potencia), capacitores (almacenamiento de flujo), inductancias (almacenamiento de esfuerzo), los cuales se muestran en la tabla 2.2 para sistemas eléctricos, sistemas mecánicos y sistemas hidráulicos.

Tabla 2.2 Elementos Pasivos (R, C, I).

Elemento	Relación	Eléctrico	Mecánico	Hidráulico
Resistivo	Lineal	$v(t) = Ri(t)$	$F(t) = bV(t)$	$\Delta P_r(t) = RQ(t)$
	No lineal	$v = \varphi(i)$	$F = \varphi(V)$	$\Delta P = \varphi(Q)$
Capacitivo	Lineal	$v(t) = \frac{1}{C} \int idt$	$F(t) = k \int Vdt$	$P_r(t) = C \int \Delta Qdt$
	No lineal	$v = \varphi(q)$	$F(t) = \varphi(x)$	$P_r(t) = \varphi(V)$
Inductivo	Lineal	$i(t) = \frac{1}{L} \int vdt$	$V(t) = \frac{1}{M} \int Fdt$	$Q(t) = I \int \Delta P_r dt$
	No lineal	$i(t) = \varphi(\lambda)$	$V(t) = \varphi(P)$	$Q(t) = \varphi(P_p)$

La figura 2.10, muestra el llamado tetraedro de estado, en tal esquema se percibe como se relacionan las variables generalizadas por tres elementos pasivos Puertos-1.

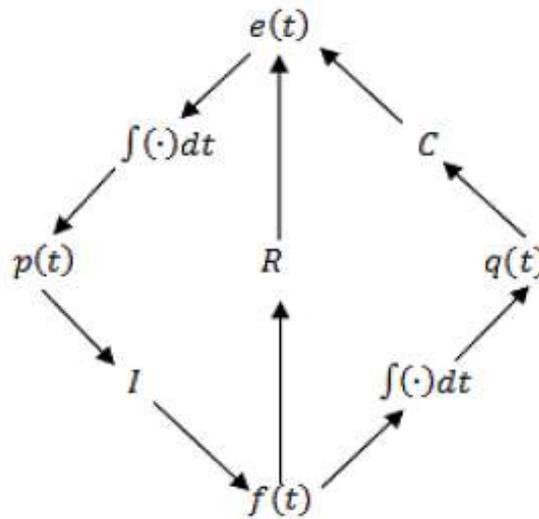


Figura 2.10 Tetraedro de estado.

b) Puertos-1 Activos o fuentes

En el sistema hay elementos que introducen energía señalados como fuentes, existen dos tipos de fuentes, de esfuerzo (voltaje, fuerza o presión) y de flujo (corriente, velocidad o caudal) indicadas como MS_e y MS_f respectivamente, la figura 2.11 ilustra estos elementos, los cuales se denominan puertos activos.

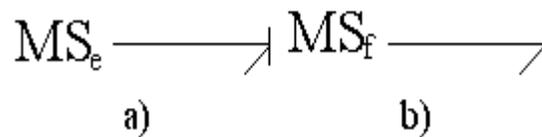


Figura 2.11 Puertos Activos a) Fuente de esfuerzo b) Fuente de flujo.

c) Elementos ideales de puertos-2

Existen dos elementos considerados por Bond Graph como ideales (puertos-2) llamados Transformador (TF) y Girador (GY), son sistemas lineales que cambian la relación entre

las variables de flujo y esfuerzo. Estos elementos están dotados con dos puertos y una relación línea entre flujos y esfuerzos.

Los Bonds que representan a un Transformador y a un Girador se presentan en la figura 2.12, donde n y r son los módulos del transformador y del girador respectivamente.

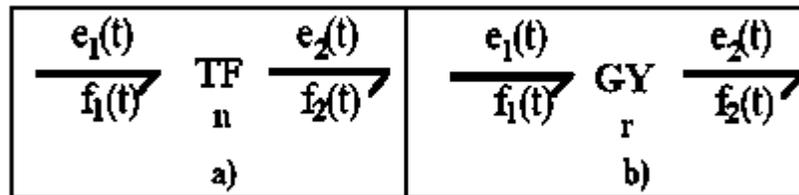


Figura 2.12 Bond Graph de un Transformador (a) y de un Girador (b).

Las relaciones de las variables de Bond generalizadas para el transformador (TF), están dadas por:

$$e_1(t) = ne_2(t) \quad (2.3)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{n}f_2(t) \quad (2.4)$$

y para el Girador son:

$$e_1(t) = rf_2(t) \quad (2.5)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{r}e_2(t) \quad (2.6)$$

Estos elementos juegan un papel muy importante para el modelado de la conversión de potencia de un dominio físico a otro.

d) Los elementos de unión, Puertos-3

Los puertos-3 son llamados uniones, porque se utilizan para interconectar dos o más Bonds (puertos de energía) dentro del sistema. Representan las ideas fundamentales de la formalidad en cuanto a circuitos eléctricos se refiere, vienen a simbolizar las conexiones eléctricas serie y paralelo.

De esta familia de puertos hay solamente dos tipos de uniones, la unión 0 y la unión 1.

La unión-0 se considera unión de flujo o unión de esfuerzo común y representa la conexión en paralelo de los distintos elementos conectados a ella. En la figura 2.13 se observa esta unión.

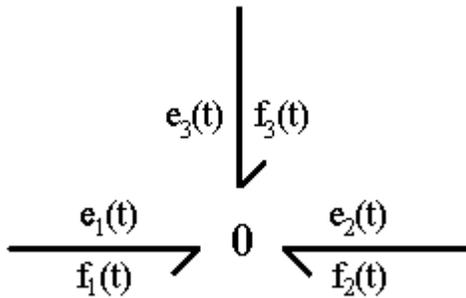


Figura 2.13 Unión-0.

Las relaciones de interconexión que describen una unión-0, están dadas por:

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.7)$$

$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0 \quad (2.8)$$

Estas ecuaciones vienen a confirmar que en una unión-0, los esfuerzos en cualquiera de los Bonds son siempre iguales y el resultado de la suma algebraica de los flujos es cero.

El otro elemento de puerto-3, es la unión de esfuerzo, (unión 1) o de flujo común, esta unión representa la conexión en serie, su representación se observa en la figura 2.14.

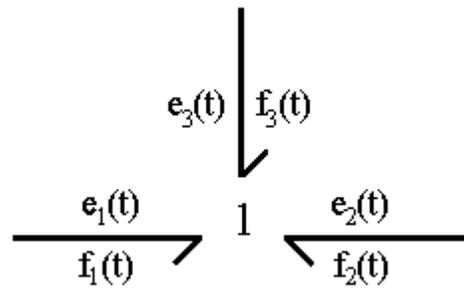


Figura 2.14 Unión-1.

Las relaciones que describe a esta interconexión están dadas por:

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad (2.9)$$

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \quad (2.10)$$

Las relaciones de la unión-1, ratifican que los flujos son iguales ya que lleguen o parten de la unión y la suma de los esfuerzos en los Bonds dará un resultado igual a cero.

Estos elementos de conexión de esfuerzo y flujo pueden extenderse a puertos de tres o más puertos.

2.2.4 Causalidad

La causalidad se utiliza para nombrar a la relación que existe entre una causa y su efecto, sostiene que todo efecto siempre tiene una causa. De aquí la importancia de precisar las relaciones de causa-efecto para esfuerzos y flujos, son presentadas como direcciones opuestas ($e(t)$, $f(t)$); Al bond se le agrega una marca llamada trazo causal que determina inmediatamente la causalidad de estos elementos, la figura 2.15 muestra algunos ejemplos que ilustran esta idea.



Figura 2.15 Causalidad para un bond.

El traza causal indica un sentido de entrada-salida para $e(t)$ y $f(t)$ en cada puerto de dos componentes juntos. El esfuerzo entra en un bond en el mismo sentido del trazo causal.

Los diferentes elementos deben cumplir con ciertas reglas las cuales se tienen que cumplir, la tabla 2.3 describe las reglas que se deben cumplir.

Tabla 2.3 Consideraciones causales para elementos básicos.

Causalidad Necesaria	MS_e	MS_f
Causalidad	 TF TF GY GY	 TF TFI GY GYI
Restrictiva	 0	 0
	 I	 I
Causalidad Integral	 I I	 C C
Causalidad Derivativa	 I I	 C C
Causalidad Arbitraria	 R R	 R R

Descripción de una unión-0 con trazo causal, se muestra en la figura 2.16, significa que $e_1(t)$, entra en la unión y $e_2(t)$ y $e_3(t)$ son salidas de la unión, efectos de $e_1(t)$, así $f_1(t)$ se encuentra en sentido opuesto y va afuera de la unión (es salida), y $f_2(t)$ y $f_3(t)$ son entradas a la unión.

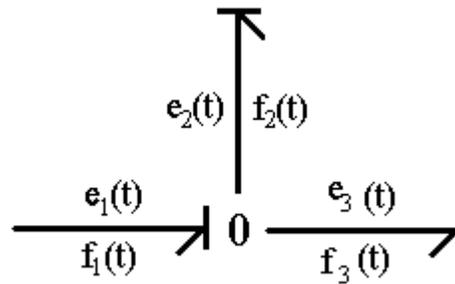


Figura 2.16 Union-0 con Causalidad.

Las siguientes ecuaciones representan la interconexión mostrada en la figura 2.16:

$$e_2(t) = e_1(t) \quad (2.11)$$

$$e_3(t) = e_1(t) \quad (2.12)$$

$$f_1(t) = f_2(t) + f_3(t) \quad (2.13)$$

2.2.5 Causalidad integral y derivativa

Ahora suponga al elemento-C. La relación constitutiva de $f(t)$ a $e(t)$ almacena flujo es decir, relaciona $e(t)$ a una variable de flujo acumulada $q(t) = \int f(t)dt$. Esto significa que, si $f(t)$ es la entrada a un elemento-C, es decir que se integra primero para encontrar $q(t)$ en consecuencia $e(t)$ es una salida relacionada a $q(t)$, esta causalidad en los elementos de almacenamiento se llama causalidad integral, debido a que la integral de entrada $f(t)$ se relaciona a la salida $e(t)$, esto es;

$$e(t) \triangleq \frac{1}{c} \int f(t) dt \quad (2.14)$$

Ahora cambiando la causalidad mostrada en la figura 2.17-a, se consigue la misma relación pero escrita con derivadas:

$$f(t) \triangleq c \frac{de(t)}{dt} \quad (2.15)$$

A esta causalidad se le llama causalidad derivativa de un elemento de almacenamiento y se muestra en la figura 2.17-b.

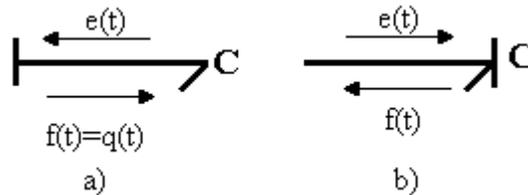


Figura 2.17 Elemento-C a) Causalidad derivativa b) Causalidad integral.

2.2.6 Bond activo

Normalmente un bond tiene dos señales, esfuerzo $e(t)$ y flujo $f(t)$. A diferencia el bond activo solo comunica una señal de las dos posibles en una sola dirección.

Un bond activo se representa por una flecha completa, como se muestra en la figura 2.18, indicando un flujo de señal cero.



Figura 2.18 Bond activo.

Un bond activo se utiliza como una señal en un diagrama de bloques, la cual conecta un bloque con otro sin consumir energía.

2.2.7 Obtención de las ecuaciones diferenciales

Asignación de causalidad en un multipuerto este procedimiento considera:

a) Observar cualquier MS_e o MS_f y designarle su causalidad requerida e inmediatamente aplicar las implicaciones causales, en base a las restricciones de 0, 1, Tf y Gy, expuestas anteriormente en la tabla 2.3.

b) Asignar causalidad integral a los elementos capacitivos (c) e inductivos (I) respetando las restricciones de la tabla 2.3.

c) Elegir un elemento resistivo (R) que no esté asignado y otorgarle una causalidad arbitraria, desarrollar las implicaciones tomando 0, 1, Tf y Gy adecuadamente de la tabla 2.3.

2.2.8 Procedimiento para el modelado de sistemas

Para la representación de un sistema físico en Bond Graph se sigue un procedimiento general para cualquier sistema que se esté modelando (eléctrico, mecánico e hidráulico), procedimiento que resulta directo y simple, la secuencia de paso se enumera a continuación.

1. Dibujar una unión-0 para cada punto donde las trayectorias paralelas coincidan.
2. Dibujar una unión-1 para cada elemento en una trayectoria serie y conectar el componente apropiado de Bond Graph por un Bond en esa unión. La dirección de la semiflecha en cada Bond indica la trayectoria asumida del flujo de potencia, es decir a partir de fuentes hacia elementos almacenadores y elementos disipadores.
3. Dibujar Bonds entre uniones adyacentes, nuevamente indicando la dirección de flujo de potencia.
4. Remover la unión-0 que representa el punto de referencia para un sistema eléctrico (nodo de tierra) y remover todos los Bonds conectados a esta unión.

5. Para simplificar la gráfica se toman en cuenta las siguientes propiedades de reducción, mostradas en la figura 2.19.

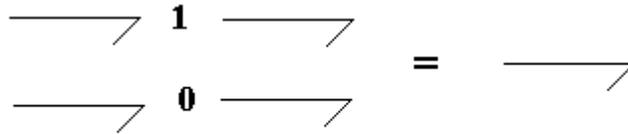


Figura 2.19 Simplificación de Bonds.

Recomendaciones para implementar el procedimiento para obtener el Bond Graph anteriormente descrito aplicado a circuitos eléctricos, se enuncian a continuación:

- ❖ En el paso 1, a cada voltaje distinto en el circuito le corresponde una unión-0.
- ❖ En el paso 4, el punto de referencia es el nodo de tierra, el cual tiene un voltaje de cero.

Para ilustrar el procedimiento se incorpora un ejemplo de un circuito eléctrico mostrado en la figura 2.20.

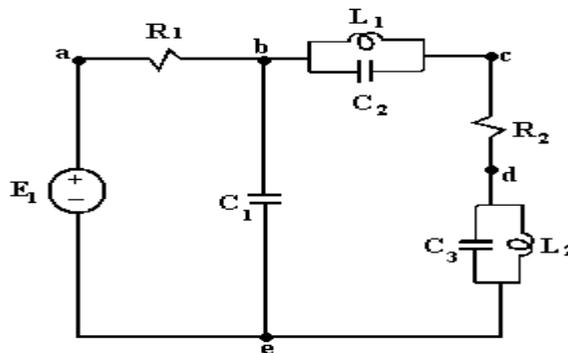


Figura 2.20 Ejemplo de un circuito eléctrico.

Se muestran los pasos 1, 2, 3, y 4 del procedimiento descrito anteriormente y se ilustran en la figura 2.21.

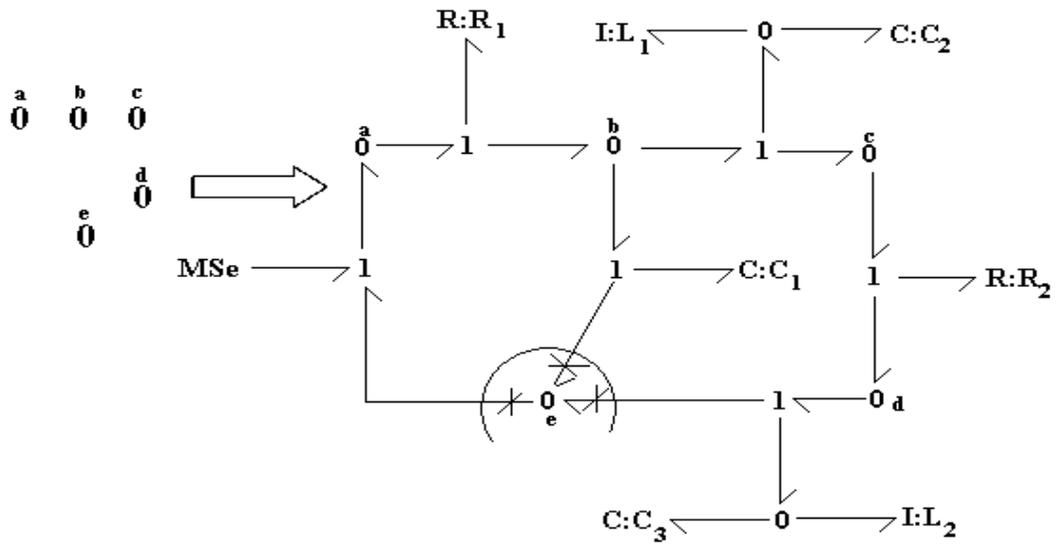


Figura 2.21 Procedimiento para obtener el Bond Graph de un circuito eléctrico.

Una vez eliminando el nodo de referencia y reduciendo el circuito (paso 5) se le asigna causalidad y se obtiene el Bond Graph que se observa en la figura 2.22.

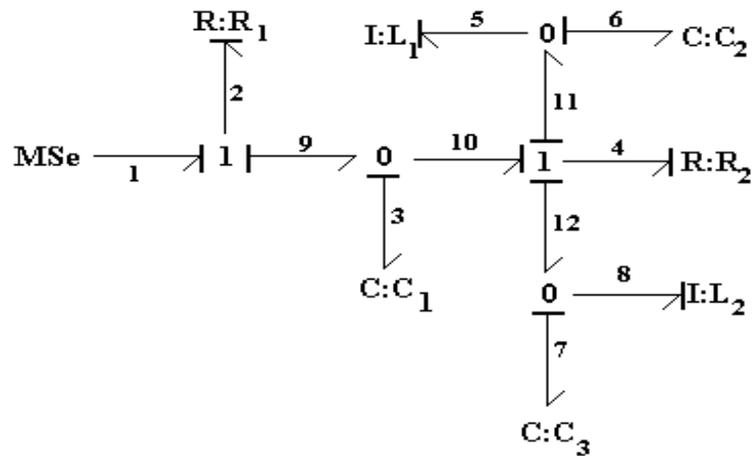


Figura 2.22 Bond Graph del ejemplo de un circuito eléctrico.

2.2.9 Estructuras de unión en sistemas multipuerto

Suponer algunos tipos de sistemas grandes como campos interconectados, nos brinda una estructura dinámica en consecuencia la generación, manipulación y reducción de muchas ecuaciones es hecha para una culminación exitosa.

2.2.9.1 Vectores Clave (Vectores significativos)

En Bond Graph en forma convencional, todos los bond pueden ser clasificados en Bonds externos, que enlazan a los elementos o puertos R, C, MS_e y MS_f , y en Bonds internos que ligan a 0, 1, TF y GT. Así como los Bonds internos pueden ser clasificados de acuerdo a su forma de exposición de energía. La figura 2.20 ilustra el diagrama de bloques de la estructura unión de un Bond Graph.

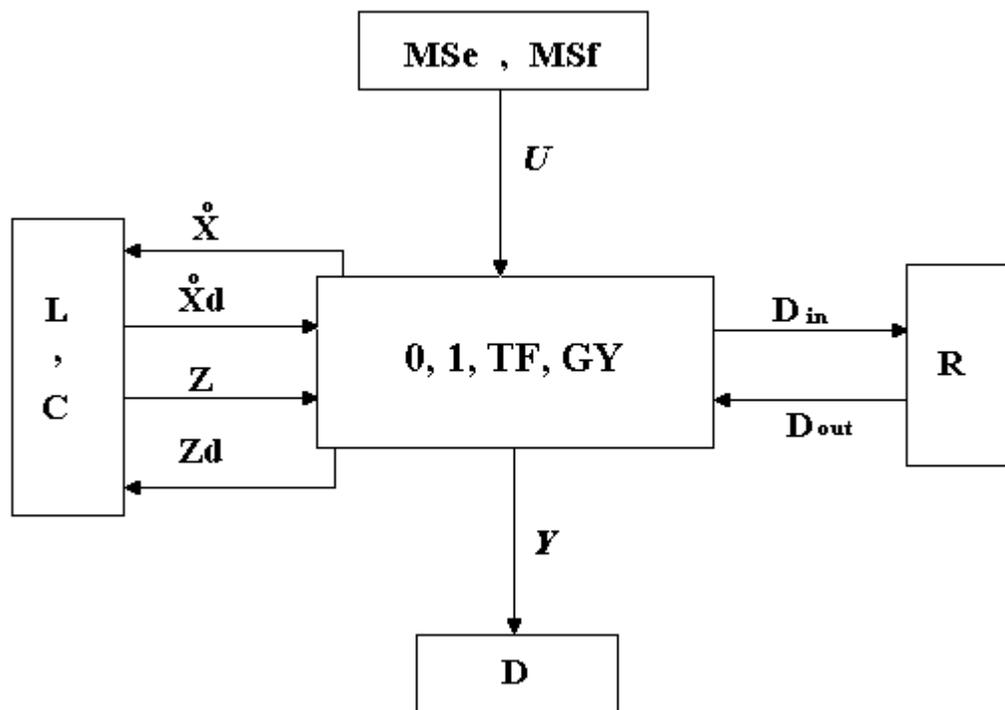


Figura 2.23 Diagrama de bloques de la estructura de unión de un Bond Graph.

Las variables de la figura 2.22 indican que (MS_e , MS_f), (L, C) y R indican los campos de fuente, almacenamiento y disipación respectivamente, (D) el detector y (0, 1,

TF, GY) la estructura de unión con transformadores (TF), giradores (GY), uniones-0 y uniones-1.

Los vectores que constituyen al sistema llamados (vectores clave) están expresados en la figura 2.22, donde $u(t)$ contiene las variables de potencia o los esfuerzos y flujos establecidos por los elementos de las fuentes en la estructura de unión. Los estados $x(t)$ y $x_d(t)$ están compuestos por variables de energía, momento generalizado $p(t)$ en elementos I y desplazamiento generalizado $q(t)$ en elementos capacitivos (c) en causalidad integral y derivativa respectivamente; $z(t)$ y $z_d(t)$ están conformadas por variables de co-energía en causalidad integral y derivativa, $D_{in}(t)$ y $D_{out}(t)$ son una mezcla de esfuerzos y flujos que muestran los intercambios energéticos entre el campo de disipación y la estructura de unión.

2.2.9.2 Relaciones de campo y Ecuación de estado

Las relaciones de campo no lineales de la figura 2.22 de almacenamiento y disipación son:

$$z(t) = \Phi F(x) \quad (1.16)$$

$$z_d(t) = \Phi F_d(x_d) \quad (2.17)$$

$$D_{out}(t) = \Phi L(D_{in}) \quad (2.18)$$

Dónde:

$F(x)$ Indica una función que relaciona cada z_i con x_i para $i = 1, \dots, n$.

$F_d(x_d)$ Indica una función que relaciona cada z_{di} con cada x_{di} para $i = 1, \dots, m$.

$L(D_{in})$ Indica una función que relaciona cada D_{outi} con cada D_{ini} para $i = 1, \dots, r$.

El comportamiento de un elemento en específico esta descrito por una ley física la cual es llamada como s relación constitutiva. Si las relaciones son lineales se obtiene:

$$z(t) = F_x(t) \quad (2.19)$$

$$z_d(t) = F_d x_d(t) \quad (2.20)$$

$$D_{out}(t) = LD_{in}(t) \quad (2.21)$$

dónde L , F y F_d son matrices reales de dimensiones $(r \times r, n \times n, m \times m)$, respectivamente.

Las relaciones de la estructura de unión están dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ D_{in}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} z(t) \\ D_{out}(t) \\ u(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$z_d = -S_{14}^T z(t) \quad (2.23)$$

dónde la estructura de una unión está formada por:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Los elementos de S toman valores dentro de conjunto $\{0, \pm 1, \pm n, \pm r\}$ donde n y r son los módulos de transformador y girador. La matriz S esta particionada de acuerdo a la dimensión de sus vectores clave. Las submatrices S_{ij} tienen las siguientes propiedades:

- S_{11} y S_{22} son matrices cuadradas asimétricas.
- S_{12} es la matriz traspuesta negativa de S_{21} y viceversa.

Las propiedades anteriores están basadas en el principio de conservación de la energía.

Un sistema LTI MIMO (sistema invariante en el tiempo con múltiples entradas y múltiples salidas), está expresado por variables de estado como:

$$\dot{x}(t) = A_p x(t) + B_p u(t) \quad (2.25)$$

$$y(t) = C_p x(t) + D_p u(t).$$

Relacionando la ecuaciones (2.22 y 2.23) con (2.25) se obtienen las siguientes relaciones:

$$A_p = E^{-1}(S_{11} + S_{12} * M * S_{21})F \quad (2.26)$$

$$B_p = E^{-1}(S_{13} + S_{12} * M * S_{23}) \quad (2.27)$$

$$C_p = (S_{31} + S_{32} * M * S_{21})F \quad (2.28)$$

$$D_p = (S_{33} + S_{32} * M * S_{23}) \quad (2.29)$$

Resultando,

$$E = I + S_{14} * F_d^{-1} * S_{14}^T * F \quad (2.30)$$

$$M = [I + L * S_{22}]^{-1}L. \quad (2.31)$$

Las relaciones obtenidas permiten la obtención de un modelo de un sistema físico en variables es de estado, utilizando la representación de Bond Graph.

Capítulo 3

Modelado de un Apartarrayo en un enfoque de Bond Graph

3.1 Introducción

Los nuevos materiales poliméricos, están remplazando a la tradicional porcelana, empezándose a utilizar en 1986-1987, construyendo apartarrayos de distribución, de los cuales estuvieron disponibles hasta de 145 KV al finalizar la década de los ochentas.

El elemento no lineal ha tomado el lugar de los descargadores con huecos convencionales a escala mundial. El elemento no lineal (ZnO) fue desarrollado en Japón y la aplicación en apartarrayos, se estableció en Japón por primera vez. Desde la conclusión del primer dispositivo con estas características en 1975, las mejoras ha sido muchas algunas son, características de vida, no linealidad, y la capacidad de absorción de energía. Sobre todo la mejora de las características en vivo contra el estrés continuo de voltaje de corriente alterna ha sido significativa. Pero la estabilidad térmica debe ser estudiada cuidadosamente, además de las características del elemento de (ZnO) en sí.

Los apartarrayos son utilizados ampliamente para la protección de sistemas eléctricos de transmisión, sub-transmisión, distribución, subestaciones eléctricas, etc. Así como los componentes por los que están conformados (transformadores, generadores, bancos de capacitores, líneas, etc.), de los efectos potencialmente dañinos generados por las descargas atmosféricas u otros fenómenos, tratando de proteger los elementos más costosos de la instalación, con la finalidad de hacer más eficiente el sistema eléctrico y evitar interrupciones en el servicio, que se traduciría directamente en pérdidas económicas.

Durante la presencia de sobretensiones el apartarrayo se encuentra sujeto a severos esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos, esto se debe a que el dispositivo drena una gran cantidad de corriente, la cual disipa energía calorífica en los varistores (resistencias no lineales) conectados en cascada. La severidad de los esfuerzos depende directamente de los factores como la magnitud y duración de la sobretensión, las características de construcción del apartarrayo, así como las condiciones de operación del dispositivo al momento de presentarse la falla.

Para analizar el comportamiento de un apartarrayo ante fallas se debe contar con un modelo del dispositivo que puntualice las relaciones (eléctricas, térmicas o mecánicas) que se pretendan analizar, para el estudio del comportamiento del apartarrayo ante una falla se pretende establecer un modelo, confiable de validez para finalmente poder explicitar el comportamiento de ese modelo mediante una expresión matemática. El modelo servirá finalmente de base para el simulador además de sacar conclusiones y adoptar medidas que permitan aprovechar las propiedades de protección y evitar las malas consecuencias.

3.2 Modelo No-lineal de un apartarrayo

Aunque las características físicas de los apartarrayos varían considerablemente de un tipo a otro, existe una similitud suficiente en su comportamiento eléctrico para sugerir un modelo básico para mostrar su análisis. Sin embargo, el modelo real de este dispositivo está constituido por dos secciones la parte lineal y la no-lineal, la figura 3.1 muestra un apartarrayo y el circuito equivalente del modelo real del dispositivo.

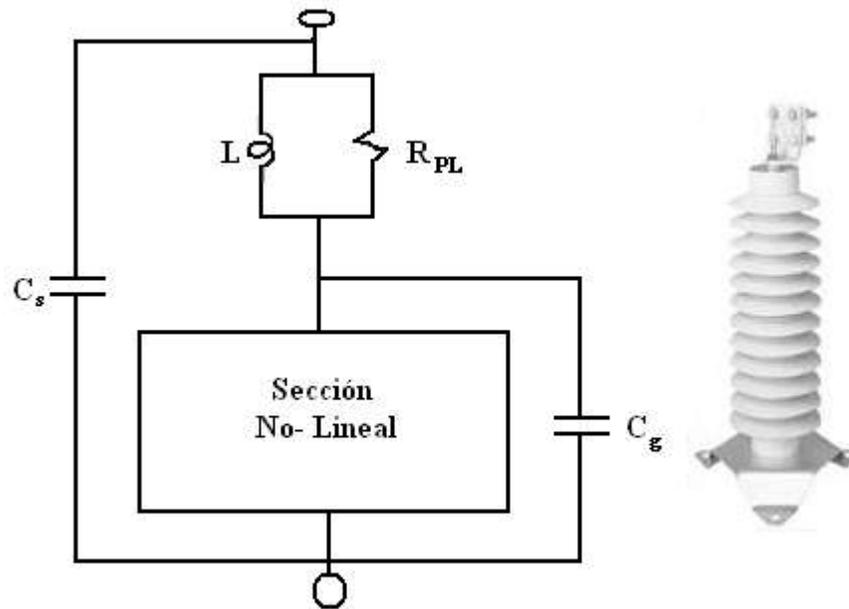


Figura 3.1 Apartarrayo y su circuito equivalente (modelo real).

En el modelo se describen los efectos no lineales como la formación de serpentina, la conductividad, extinción del arco eléctrico, oscilaciones de alta frecuencia, disipación de calor en el medio circulante.

La parte no lineal del modelo se ilustra en la figura 3.2, básicamente representa la reacción compleja de la formación inicial del arco serpentina seguida por la formación de plasma e incluye el potencial termiónico observado durante la fase de encendido o cuando la conducción inicia (entra en operación).

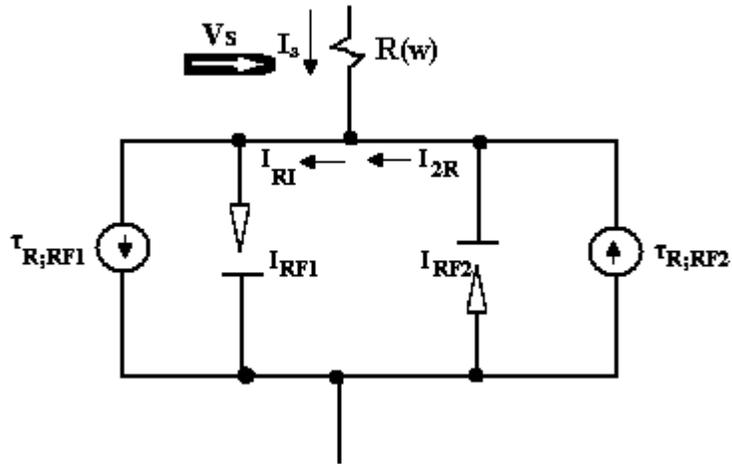


Figura 3.2 Sección No-lineal de un apartarrayo.

Los diversos parámetros del modelo y las ecuaciones no lineales que utilizan los parámetros serán definidos en las siguientes ecuaciones.

La sección No-lineal del modelo es descrito por las siguientes variables y ecuaciones:

R_g = Resistencia no lineal (Depende de la energía que disipa en vacío y se transfiere al medio circulante).

$$R_g = \frac{K_1}{W} \tag{3.1}$$

$$W = W_{IN} - W_{OUT} \tag{3.2}$$

$$W_{IN} = \int \left[\frac{V_g^2}{R_{gn-1}} + |V_g| * i_y \right] dt \tag{3.3}$$

$$W_{OUT} = \int \frac{W}{\tau d} dt \text{ o } \int P_{m1} dt \quad (3.4)$$

Dónde:

R_g = Resistencia instantánea del espacio (gap) en (ohms).

V_g = Tensión instantánea a través del gap en voltios.

I_g = Corriente instantánea a través del gap en amperes.

W = Energía instantánea en el gap en (joules).

W_{IN} = Energía instantánea generada en entrada al gap en (joules).

W_{OUT} = Energía Instantánea disipada por el gap en el medio circundante (joules).

K_1 = Factor de escala en relación R_g a W (Ω -joules).

P_{m1} = Potencia máxima instantánea perdida en el medio circundante en (volts).

d = Tiempo de disipación constante (Tiempo promedio en el cual la constante térmica (joules) se disipa en el medio circulante.

R_{gmax} = Resistencia máxima de la cámara de aire (ohms)

R_{gmin} = Resistencia mínima del gap de aire (ohmios)

W_{min} = Mínimo de energía en el gap de aire (joules)

V_{DB} = Voltaje de umbral para el colapso del gap $V_{DB} \approx 100$ KV /in en el aire en condiciones normales.

τ_{SF} = Tiempo de formación de la serpentina (τ_{SF} aumenta con la anchura del hueco).

i = Corriente generada a través del Gap.

i_{gmin} = Valor instantáneo del arco actual por debajo del cual se extingue.

3.3 Modelo lineal de un apartarrayo

En su funcionamiento real, los dos elementos importantes a tomar en cuenta son: La estabilidad característica de los diversos esfuerzos de tensión y corriente (características de la vida) y la estabilidad térmica (equilibrio entre el elemento de calefacción y las características de disipación como descargador completo).

El dispositivo se caracteriza por los componentes tanto lineales y no lineales del modelo. La característica lineal puede obtenerse muy fácilmente mediante el uso de un analizador de redes y resolviendo para los valores de L , R_{pL} , C_s , y el elemento C_g , la figura 3.3 ilustra el modelo lineal del sistema despreciando la porción No-lineal del modelo real.

L = Inductancia de plomo (por lo general en nano henrios).

R_{pL} = Pérdida de flujo ("Q") asociada a L por lo general en K ohms.

C_s = Capacitancia parásita.

C_g = Capacitancia en el gap (medida o calculada en base al gap).

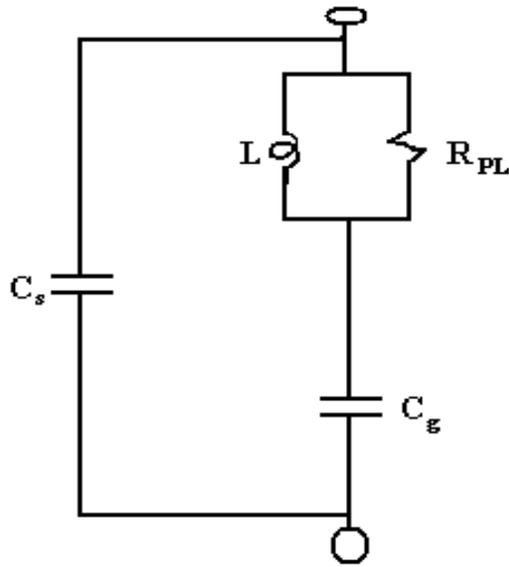


Figura 3.3 Modelo lineal del apartarrayo.

3.4 Estado del apartarrayo en el sistema eléctrico

Los apartarrayos están conectados permanentemente a los circuitos que protegen y entran en operación en el instante en que la sobretensión alcanza un valor convenido, superior a la tensión nominal del sistema.

Estos componentes se caracterizan por:

- Representan un circuito abierto (alta impedancia) por debajo del voltaje de ruptura.
- Se convierte en un corto circuito virtual por encima del voltaje de ruptura.
- La resistencia se reduce exponencialmente una vez superado el voltaje de ruptura o conducción.

Como sea venido mencionando los apartarrayos son dispositivos eléctricos formados por una serie de elementos resistivos no lineales y explosores que limitan la amplitud de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas, maniobras en el sistema eléctrico, etc. El dispositivo debe de comportarse como un simple aislador mientras la sobretensión no exceda cierto valor predeterminado, convertirse en un conductor al momento de alcanzar el voltaje predeterminado para su funcionamiento y conducir a tierra la onda de corriente generada por la sobretensión.

Una vez desaparecida la sobretensión y restablecida la tensión nominal el dispositivo debe ser capaz de interrumpir la corriente que está drenando a tierra.

Para que el apartarrayo lleve a cabo una correcta protección deben de colocarse en una distancia muy próxima al elemento a proteger, el nivel de protección disminuye en medida a la distancia de localización del apartarrayo.

a) Características de Temperatura

El dispositivo requiere funcionar como amortiguador de la energía de picos de rayos, sobretensión de conmutación, sobretensiones temporales. El elemento, debe soportar este tipo de energía absorbida sin ser destruido. La absorción de sobretensiones provoca el aumento de la temperatura del elemento y con ello el aumento de la corriente de fuga. El aumento de la corriente de fuga genera una mayor pérdida de potencia del elemento. Si la pérdida de potencia es superior a la disipación de calor desde el elemento, la temperatura del elemento y la corriente de fuga continúan aumentando, y finalmente el elemento se sobrecalienta.

Cuando el voltaje de CA (Corriente Alterna) se aplica al elemento, fluye una corriente combinando resistencias y capacitores. Los cambios resistivos, de corriente y la temperatura dependen del voltaje que se aplica, pero su variación debe ser considerada porque el valor absoluto es mayor en el caso de la aplicación de voltaje de corriente alterna. Las características de dependencia de temperatura de los elementos son particularmente importantes en el diseño

térmico del dispositivo. Si el voltaje de corriente alterna se aplica continuamente, existen unos pequeños flujos de corriente y muestra pérdida de energía (el consumo de energía).

3.5 Modelado de un apartarrayo en Bond Graph

El modelo que se presenta fue extraído del artículo “AN ELECTRICAL SURGE ARRESTOR (ESA) MODEL FOR ELECTROMAGNETIC PULSE ANALYSIS “del cual se obtendrá su equivalente en Bond Graph, complementando el circuito, se representa el modelo real de un apartarrayo conectado a una línea del sistema eléctrico.

El diagrama esquemático del modelo del apartarrayo descrito en la figura 3.3 se conecta a una fase del sistema eléctrico y se representa en la figura 3.4.

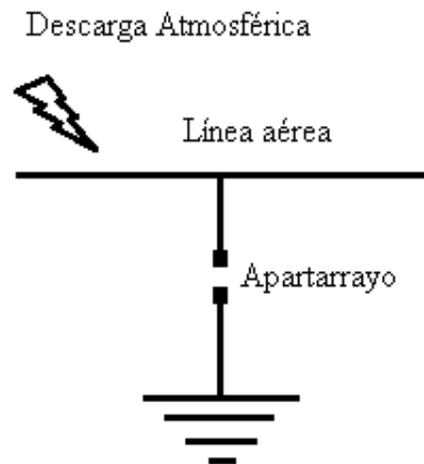


Figura 3.4 Apartarrayo Conectado al sistema eléctrico.

De la figura 3.4 se obtiene el circuito equivalente resultando la figura 3.5.

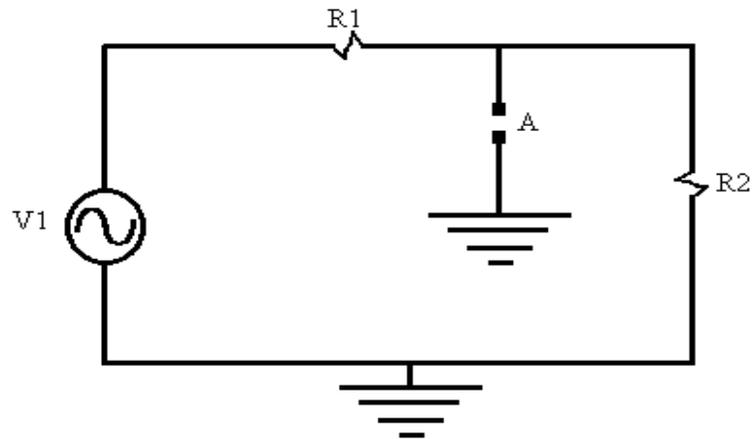


Figura 3.5 Circuito equivalente de la figura 3.4.

Dónde:

- V_i = Fuente de voltaje.
- R_1 = Resistencia de la línea.
- R_2 = Carga (Elemento protegido).
- A = Apartarrayo.

Para la obtención del Bond Graph del circuito presentado en la figura 3.5 se le incorpora el circuito correspondiente al modelo lineal del apartarrayo descrito en la sección 3.2 generando la figura 3.6.

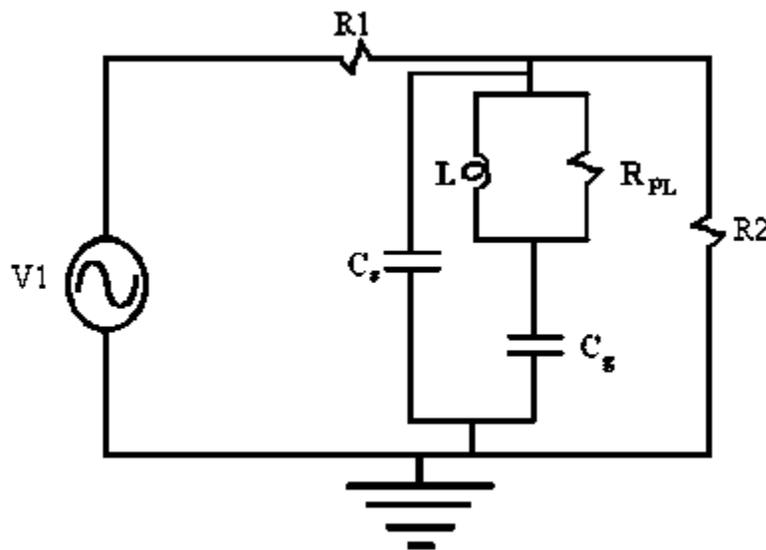


Figura 3.6 Circuito equivalente (Línea-Apartarrayo-Carga).

Obteniendo el Bond Graph de la figura 3.6 y aplicando los pasos descritos en la unidad (2.2.8) se genera la figura 3.7.

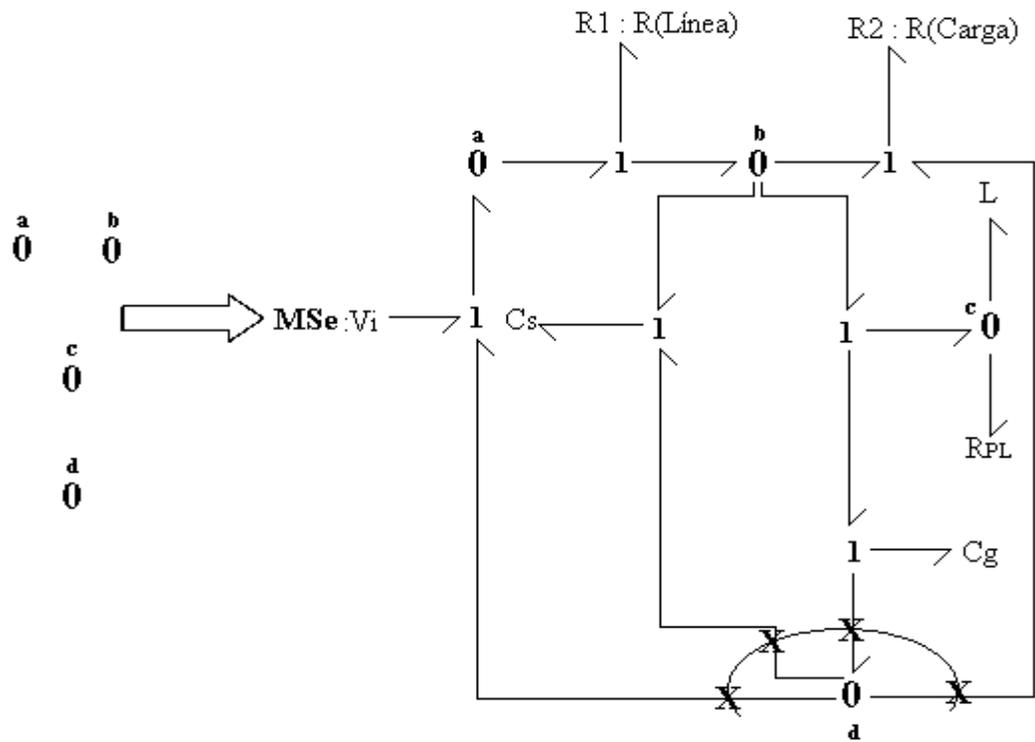


Figura 3.7 Pasos 1-4 para la obtención del Bond Graph.

Reduciendo la figura 3.7 se obtiene la figura 3.8 que se muestra a continuación:

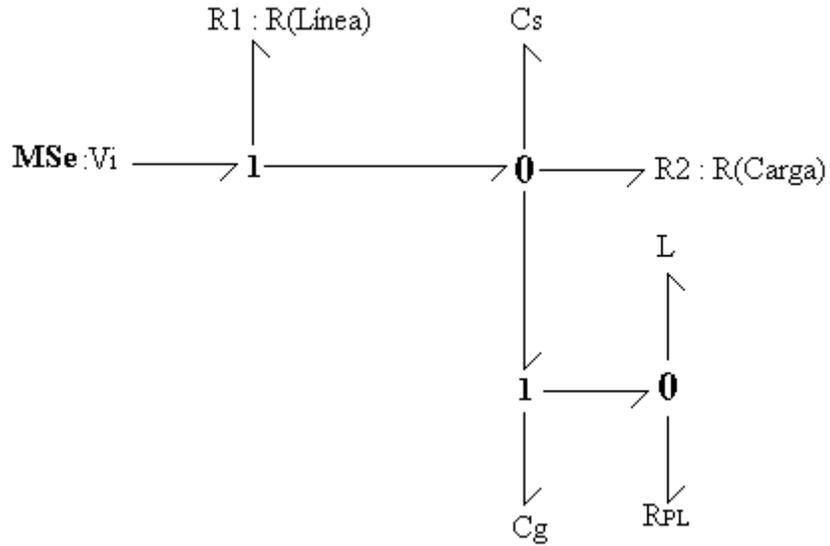


Figura 3.8 *Equivalente en Bond Graph del circuito (Línea-Apartarrayo-Carga).*

Agregándole causalidad a la figura 3.8 resulta la ilustración mostrada en la figura 3.9 de la cual se obtienen los vectores clave y las relaciones constitutivas.

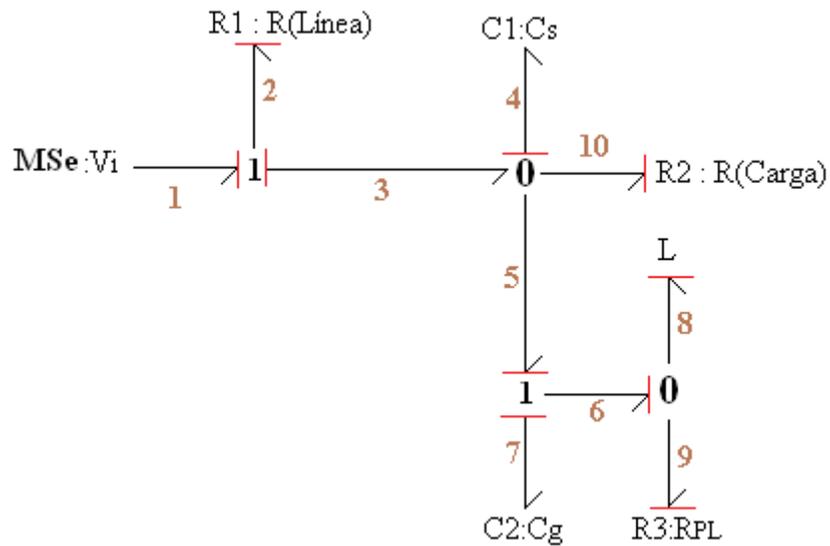


Figura 3.9 *Bond Graph obtenido con su respectiva causalidad.*

De la figura 3.9 se obtienen las siguientes relaciones:

$$X = \begin{bmatrix} q_4 \\ q_7 \\ p_8 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} f_4 \\ f_7 \\ e_8 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$Z = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_7 \\ f_8 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$D_{out} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_9 \\ f_{10} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$D_{in} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_9 \\ e_{10} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Vectores clave y relaciones constitutivas resultantes:

$$Z = FX \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} e_4 \\ e_7 \\ e_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ q_7 \\ p_8 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$D_{out} = LD_{in} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} f_2 \\ f_9 \\ f_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ e_9 \\ e_{10} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Con las relaciones anteriores se constituye la estructura unión que forman la siguiente matriz para desprender la formulación de las ecuaciones de estado.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ D_{in} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ D_{out} \\ U \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

En donde ($U = e_1$) y ($y = f_9$).

Sustituyendo valores en (3.14) se tiene que:

$$\begin{bmatrix} [f_4] \\ [f_7] \\ [e_8] \\ [e_2] \\ [e_9] \\ [e_{10}] \\ [f_9] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0 & 0 & -1] \\ [0 & 0 & 1] \\ [1 & -1 & 0] \\ [-1 & 0 & 0] \\ [-1 & 1 & 0] \\ [1 & 0 & 0] \\ [0 & 0 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [1 & -1 & -1] \\ [0 & 1 & 0] \\ [0 & 0 & 0] \\ [0 & 0 & 0] \\ [0 & 0 & 0] \\ [0 & 0 & 0] \\ [0 & 1 & 0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [0] \\ [1] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [e_4] \\ [e_7] \\ [f_8] \\ [f_2] \\ [f_9] \\ [f_{10}] \\ [e_9] \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

La formulación de la matriz (3.15) se desprende de las relaciones:

$$f_4 = f_2 - f_8 - f_9 - f_{10}$$

$$f_7 = f_8 + f_9$$

$$e_8 = e_4 - e_7$$

$$e_2 = e_1 - e_4$$

$$e_9 = e_4 - e_7$$

$$e_{10} = e_4$$

$$f_9 = f_9$$

Las ecuaciones de estado a encontrar son:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (3.16)$$

$$y(t) = CX(t) + DU(t) \quad (3.17)$$

Dónde:

$$A = [S_{11} + S_{12}MS_{21}]F$$

$$B = [S_{13} + S_{12}MS_{23}]$$

$$C = [S_{31} + S_{32}MS_{21}]F$$

$$D = [S_{33} + S_{32}MS_{23}]$$

En donde A, B, C, D son las variables a encontrar, además de que M= (Matriz de resistencias) y F = (Matriz de elementos de almacenamiento de energía).

Sustituyendo A, B, C, D en las ecuaciones (3.16 y 3.17) se obtienen:

$$\dot{X} = [S_{11} + S_{12}MS_{21}]FX + [S_{13} + S_{12}MS_{23}]U \quad (3.18)$$

$$y = [S_{31} + S_{32}MS_{21}]FX + [S_{33} + S_{32}MS_{23}] \quad (3.19)$$

Sustituyendo valores en A se obtiene:

$$A = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{ccc} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{ccc} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right] * \left[\begin{array}{ccc} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} \end{array} \right] * \left[\begin{array}{ccc} -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{array} \right) ([F])$$

$$A = \left[\begin{array}{ccc} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_1} \right) & -\frac{1}{R_2} & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right] * \left[\begin{array}{ccc} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{array} \right]$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_2 C_1} - \frac{1}{R_3 C_1} - \frac{1}{R_1 C_1} \right) & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ & \frac{1}{R_2 C_1} & 0 \\ & 0 & \frac{1}{R_2 C_2} \\ & & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De forma similar, sustituyendo valores en B tenemos que:

$$B = \left([0] + \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Reemplazando valores en la ecuación (3.18) se obtiene la siguiente expresión:

$$[\dot{X}] = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{R_2 C_1} - \frac{1}{R_3 C_1} - \frac{1}{R_1 C_1} \right) & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ & \frac{1}{R_2 C_1} & 0 \\ & 0 & \frac{1}{R_2 C_2} \\ & & 0 & 0 \end{bmatrix} * [X] + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [U] \quad (3.20)$$

Sustituyendo valores C se observa que:

$$C = \left([0] + [0 \quad 1 \quad 0] * \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$C = \left[-\frac{1}{R_2} \quad \frac{1}{R_2} \quad 0 \right]$$

Por ultimo remplazando valores en D resulta que:

$$D = \left([0] + [0 \quad 1 \quad 0] * \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$D = [0]$$

Así se obtiene la expresión:

$$[y] = \left[-\frac{1}{R_2} \quad \frac{1}{R_2} \quad 0 \right] [X] + [0] \quad (3.21)$$

Capítulo 4

Simulación de circuitos protegidos con apartarrayo en 20-SIM

4.1 Introducción

Los estudiantes de ingeniería adquieren una comprensión básica de los principios científicos, que con su audacia los combinan con el conocimiento empírico asociado a una gran creatividad para alcanzar soluciones matemáticas muy aceptables aun así un elemento de gran relevancia es la simulación, es el medio por el cual las ecuaciones matemáticas se convierten en gráficos que ayudan al estudiante a tener más fundamentos apegados a la realidad que prueben o desmientan su investigación.

En la actualidad, el modelado y la simulación es una actividad indispensable a la que nos enfrentamos con el análisis y diseño de sistemas multidisciplinares de cierta complejidad. El objetivo es ayudar o dar el soporte necesario al proceso de análisis matemático y diagnóstico del sistema en estudio. El software debe complementar el análisis realizado por el investigador para que éste pueda modelar y simular de tal forma que los análisis que realice sean eficientes, que se encuentren en un escenario real, para que en lo inmediato posible se puedan recrear modelos reales que sean probados bajo características reales de operación.

Un software adecuado hace posible establecer una valoración final antes de que los sistemas sean construidos, y pueden aliviar la necesidad de experimentos caros y dar soporte a todas las etapas de un proyecto desde el diseño conceptual, pasando por el montaje hasta llegar a su funcionamiento

El simulador 20-Sim ofrece una alternativa de alta calidad para el modelado y la simulación de sistemas físicos, eléctricos, mecánicos, químicos, etc.

20-sim es un programa de modelado y simulación que funciona en la plataforma de Windows. Con 20-sim, usted podrá simular el comportamiento de sistemas dinámicos, como sistemas eléctricos, mecánicos, hidráulicos y cualquier combinación de estos. 20-sim soporta completamente el modelado gráfico, de manera que se pueden diseñar y analizar sistemas dinámicos de manera muy intuitiva, sin tener que comprometer la potencia del equipo. 20-sim también funciona con el uso de componentes, lo cual le permite modelar sistemas como si fuesen bosquejos de problemas de ingeniería. Al escoger los componentes que necesita de librería, los podrá concatenar para reconstruir su diagrama de ingeniería, sin tener que escribir una sola línea de matemáticas.

4.2 Circuito básico

Para comprender un sistema eléctrico se debe analizar por secciones que sean fáciles de visualizar y ubicar en forma física en el sistema eléctrico, razón por lo cual esta consideración inicia con un caso básico en donde interviene la fuente de voltaje, la línea de transporte y un elemento de carga, dicha descripción se simboliza en la figura 4.1 la cual representa su circuito equivalente.

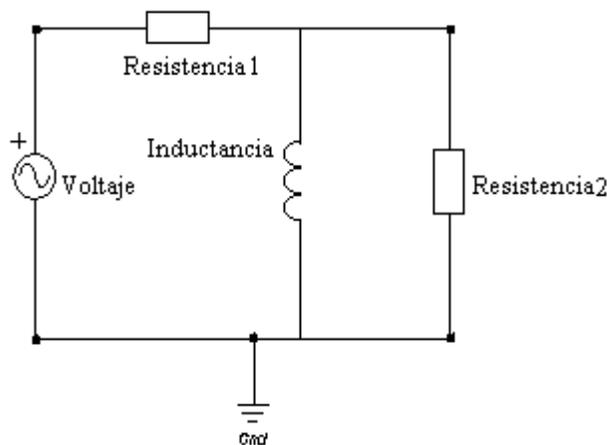


Figura 4.1 Circuito básico.

Para dar inicio con la simulación es necesario obtener su modelo en Bond Graph (BG), ya que el BG es el conjunto de elementos que se ingresan al simulador de 20-SIM para recoger su funcionamiento en una serie de gráficas, la figura 4.2 representa el Bond Graph del circuito ilustrado por la figura 4.1.

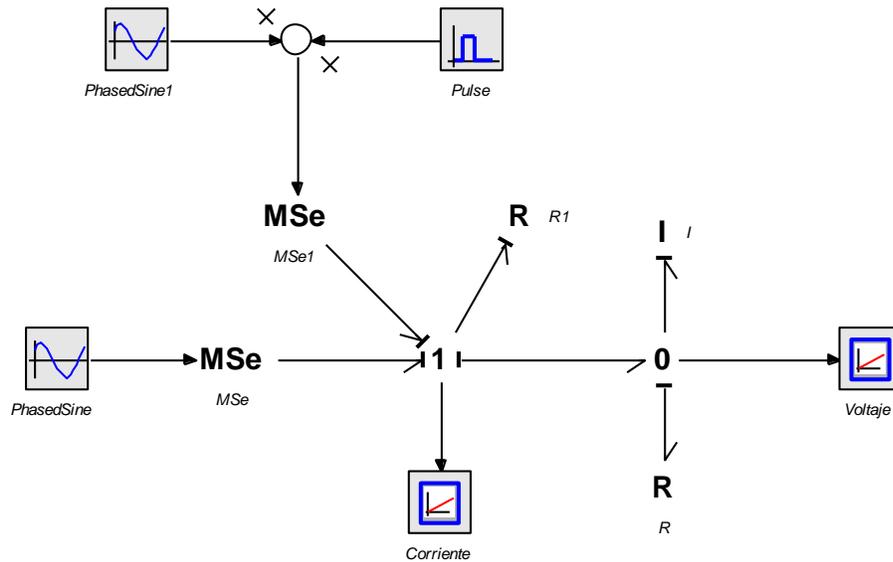


Figura 4.2 Bond Graph (Circuito Básico).

4.2.1 Simulación del circuito básico

La simulación nos dará como resultado el comportamiento del circuito en estado estable y cuando es sometido a una falla, las características a simular son el voltaje y la corriente, el principal objetivo de la simulación es obtener resultados del comportamiento en estado estable y bajo falla para hacer la comparación de los efectos a los que se ve sometido el circuito bajo estas dos condiciones.

Los parámetros de los elementos que están involucrados en el circuito son los siguientes $V=220v$, $I=10$ henrios, $R_1=2.5$ ohm, $R_2=3.5$ ohm, la magnitud de la falla es tomada al azar, los valores son arbitrarios y se pueden mejorar los resultados probando con distintos valores.

a) Simulación del circuito básico en estado estable

En primera instancia se presenta la simulación del circuito en estado estable y el resultado que se obtiene al ingresar el circuito al simulador de 20-Sim es presentado en la figura 4.3.

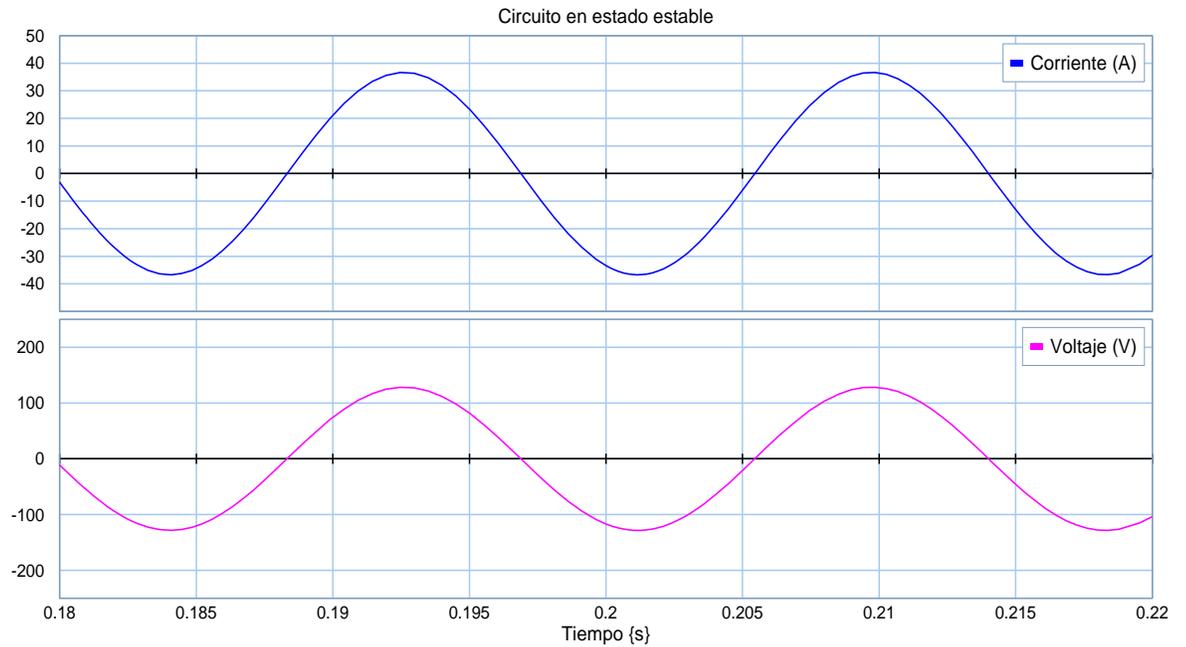


Figura 4.3 Simulación (Estado estable).

b) Simulación del circuito básico bajo falla

La figura 4.2 se somete a un proceso de simulación para observar cual es el comportamiento de este circuito al presentársele una falla la cual es implementada por un generador de señales.

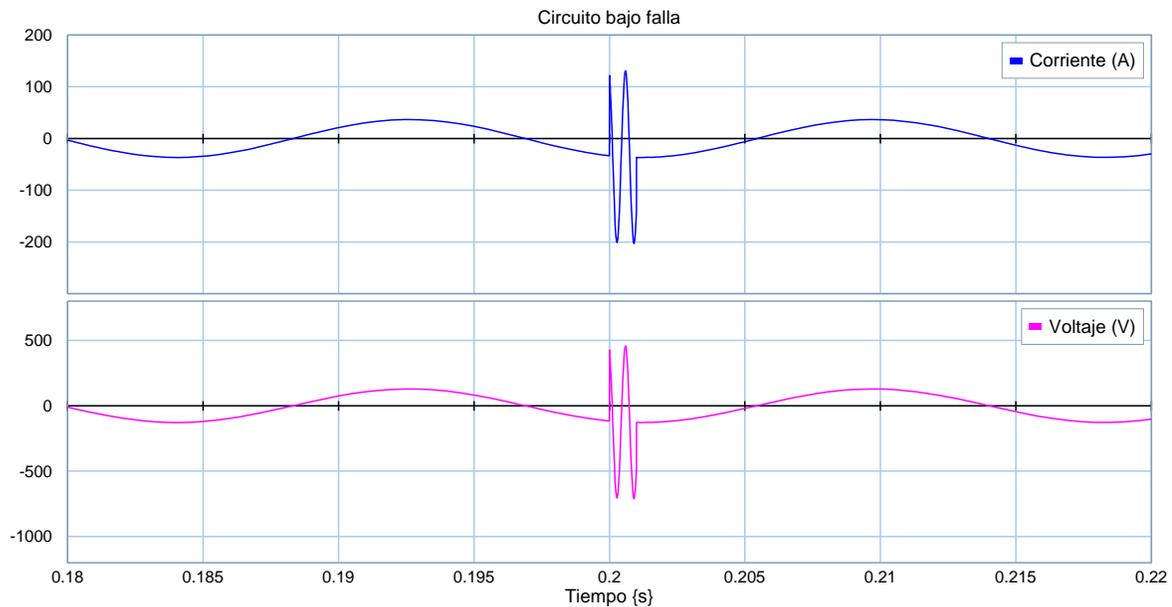


Figura 4.4 Simulación (Bajo falla).

Se puede observar que en estado estable el voltaje y la corriente se mantienen estables pero al presentarse la falla las dos señales se incrementan drásticamente volviéndose el circuito inestable.

Las observaciones que se pueden realizar es que las variaciones que se susciten dependen directamente de la intensidad de la falla, la corriente al igual que el voltaje depende directamente de la severidad de la falla, además un factor importante es la longitud de onda con la que se presenta la falla lo originará que las ondas de corriente y voltaje se repitan más o menos ciclos por segundo.

4.3 Caso de estudio de un circuito protegido con un apartarrayo

Una parte fundamental de esta tesis es la observación del comportamiento de circuitos eléctricos protegidos por apartarrayo, el caso de estudio (Circuito con apartarrayo) que se ilustra en la figura 4.5 consta de varias secciones de la red eléctrica y algunas cargas que representan un circuito apegado a la realidad, la parte encerrada en rojo son los elementos que componen el apartarrayo.

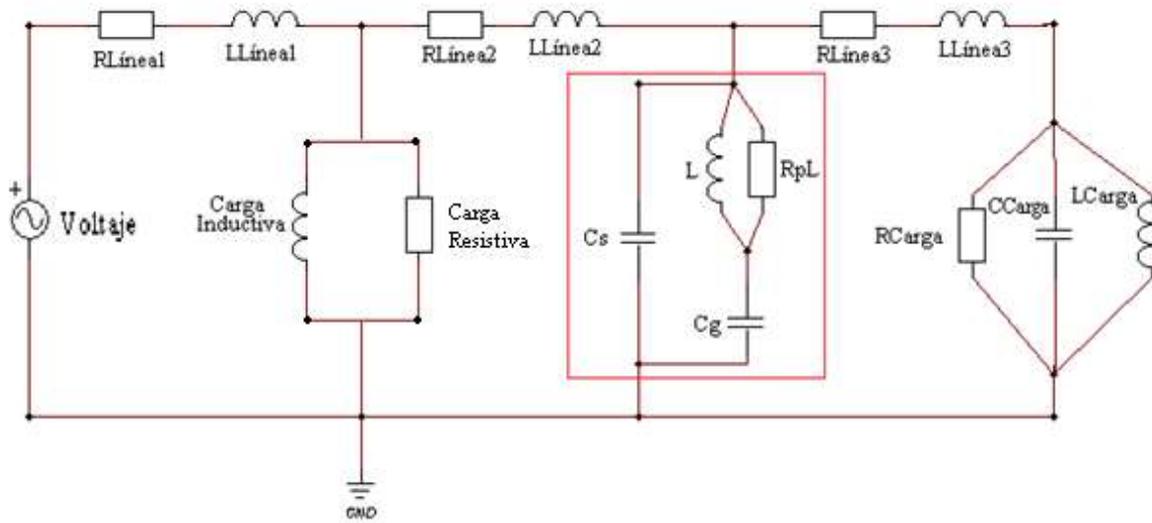


Figura 4.5 Circuito protegido con apartarrayo.

De la figura 4.5 se genera el modelo equivalente en Bond Graph que se ilustra en la figura 4.6.

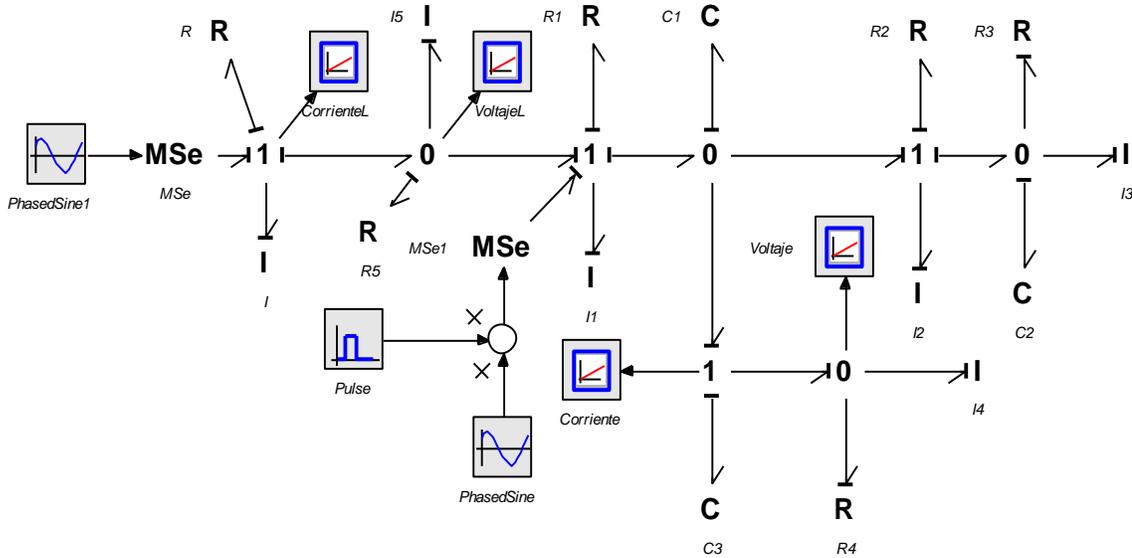


Figura 4.6 Bond Graph (Circuito protegido por Apartarrayo).

4.3.1 Simulación del circuito protegido por apartarrayo

La simulación de este circuito pretende comprobar que el apartarrayo en condiciones de operación en estado estable no entrará en operación, pero una vez que la falla se presente en el nodo al que se encuentra conectado el apartarrayo entrará en operación, drenando una gran cantidad de energía a tierra y una vez que la falla desaparezca el circuito volverá a operar normalmente.

Los valores con los que se prueba el circuito son estrictamente para estas simulaciones, son para el efecto de observar el comportamiento del circuito en las etapas a las que este circuito se ve sometido en condiciones de estado estable y sometido a una falla.

Los parámetros del apartarrayo que se utilizan en la simulación son $C_s=1$ pf, $C_g=3.18$ pf, $R_{PL}=2500$ ohm y $L=130$ nh estos valores están muy próximos a los valores reales que utilizan los apartarrayos que actualmente se encuentran en servicio y a la venta.

Las características a destacar en la simulación de este circuito protegido por un apartarrayo son el voltaje y la corriente que circulan por el elemento protector cuando este se encuentra operando en condiciones estables y cuando entra en operación a presentarse una falla en el circuito.

a) Simulación (circuito protegido por apartarrayo) en estado estable

Lo que se espera de este circuito, en condiciones de operación (estado estable) el voltaje y la corriente que circula por el apartarrayo deben de mantenerse en cero, esto bajo los argumentos de la aseveración de que el apartarrayo en operación normal no deja circular energía a través de él. Al someter el modelo de la figura 4.6, se tiene el comportamiento mostrado en la figura 4.7.

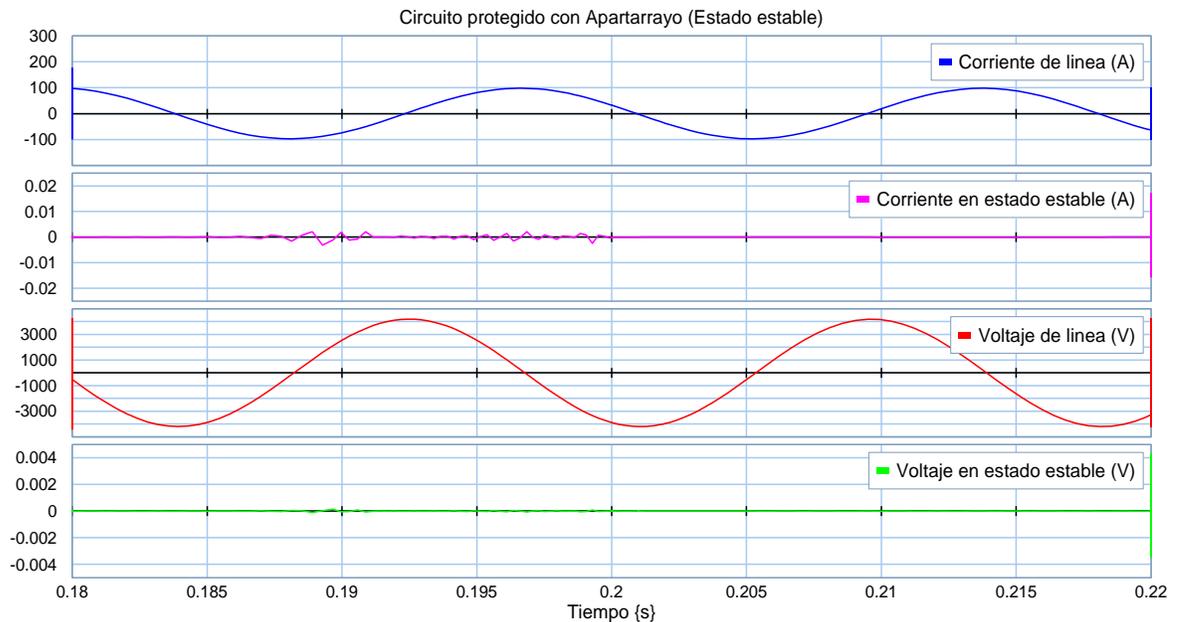


Figura 4.7 Simulación en estado estable (Circuito protegido por Apartarrayo).

Se puede observar claramente en la simulación que los resultados mostrados en corriente y voltaje de falla respectivamente no sufren ningún cambio esto mientras el circuito se encuentra operando en condiciones de estado estable.

b) Simulación (circuito protegido por apartarrayo) bajo falla

A diferencia de los resultados en estado estable lo esperado bajo una falla debe de registrarse un incremento muy elevado en la corriente y voltaje respectivamente en el momento que la falla se haga presente en el sistema eléctrico, los resultados generados por la aparición de un sobrevoltaje (falla) se observan en la figura 4.8.

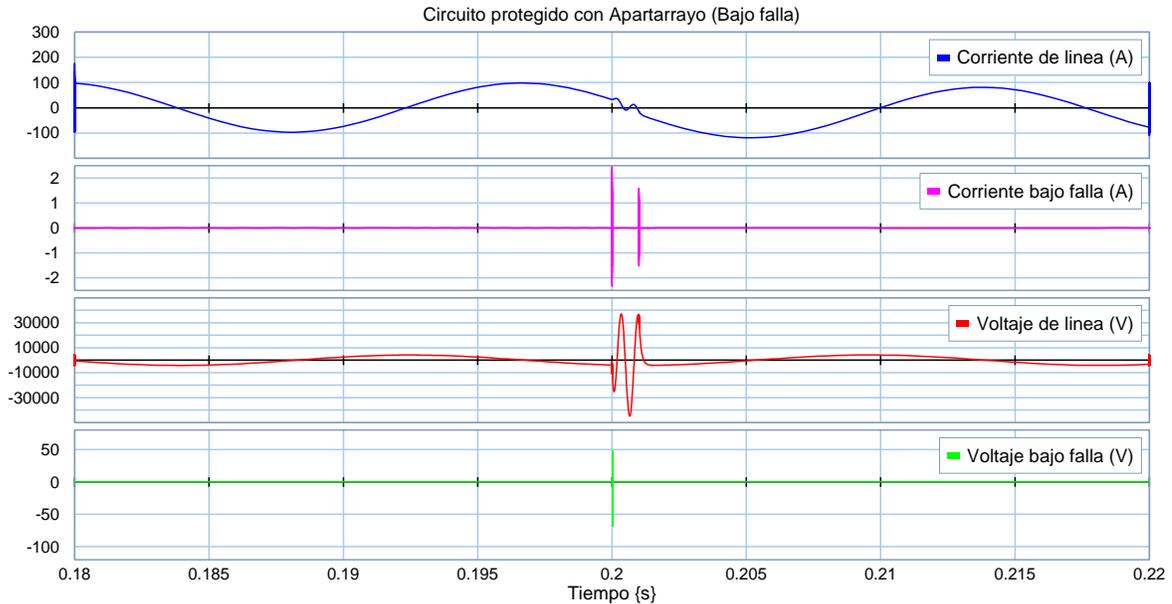


Figura 4.8 Simulación bajo falla (Circuito protegido por Apartarrayo).

Comparando los dos casos simulados se observa que el circuito en estado estable no requiere del apartarrayo, pero cuando la falla se presenta el apartarrayo es demandado y entra en operación cumpliendo con la función de drenar un excedente de energía que se genera con la presencia de la falla.

En la simulación bajo falla se diferencia un aumento muy significativo de corriente y voltaje en el momento de la presencia de la falla.

Además se puede observar que el circuito tarda algunos ciclos en volver a tener la estabilidad de funcionamiento de estado estable.

Se puede constatar también que hay una pequeña variación en sentido opuesto a al flujo de la energía, esto nos comprueba que al momento de generarse una falla repentinamente se generan ondas en ambos sentidos de las líneas de conducción.

4.4 Caso de estudio múltiple

En la rama de ingeniería eléctrica, los componentes del sistema eléctrico se encuentran interconectados para realizar la función de transportar la energía eléctrica a los puntos de consumo, los elementos deben de estar en óptimas condiciones, razón por la cual se analiza un conjunto de elementos de un circuito, la sección en análisis es representada en la figura 4.9, la cual está conformada por una fuente de voltaje, cuatro transformadores, elementos de carga y cuatro elementos de protección (Apartarrayos).

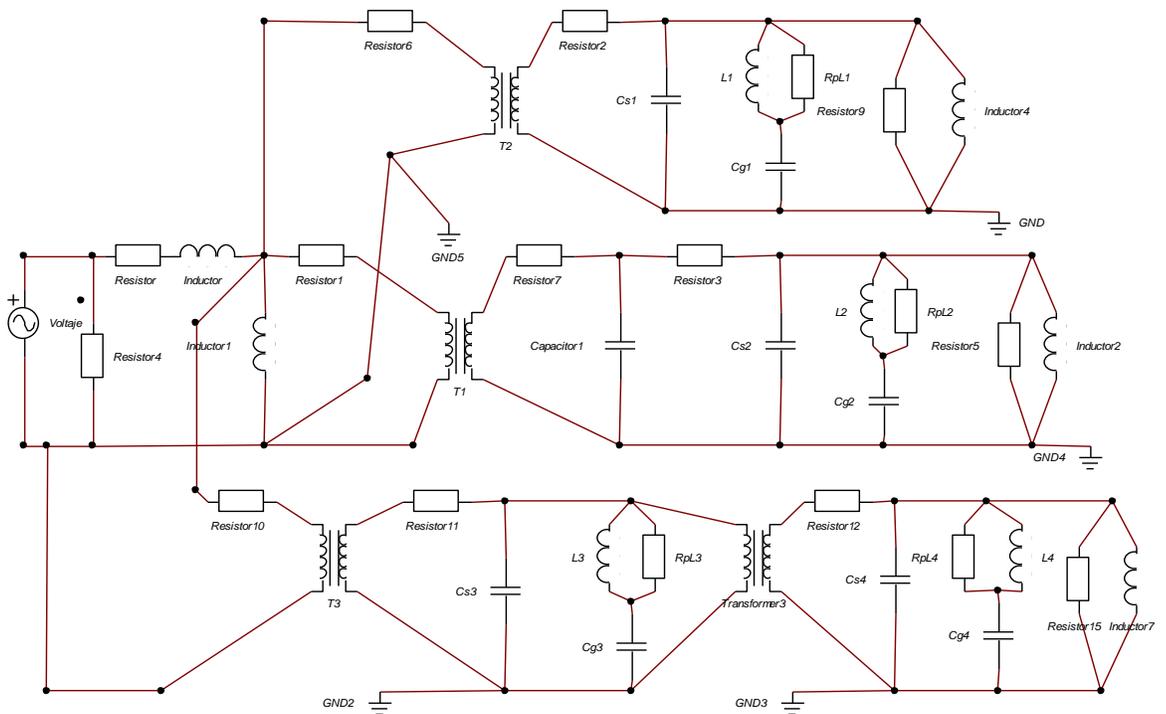


Figura 4.9 Circuito (Caso de estudio múltiple).

Para este caso en especial y por la cantidad de apartarrayos que intervienen en el circuito las simulaciones se mostrarán divididas en primera instancia se observa el voltaje en sus dos etapas de análisis (estado estable, bajo falla), posteriormente se muestra la corriente en sus dos fases de análisis (estado estable y bajo falla).

Los valores de los apartarraysos que se utilizan en la simulación son $C_s=1$ pf, $C_g=3.18$ pf, $R_{pL}= 2500$ ohm y $L= 130$ nh estos datos están muy próximos a los valores reales que utilizan los apartarraysos tales datos son los mismos para los cuatro elementos de protección que intervienen en el circuito.

El análisis se desarrolla a partir de su modelo en Bond Graph el cual se genera a partir de la figura 4.9 el Bond Graph del circuito múltiple se muestra en la figura 4.10, en la que destacan algunos transformadores.

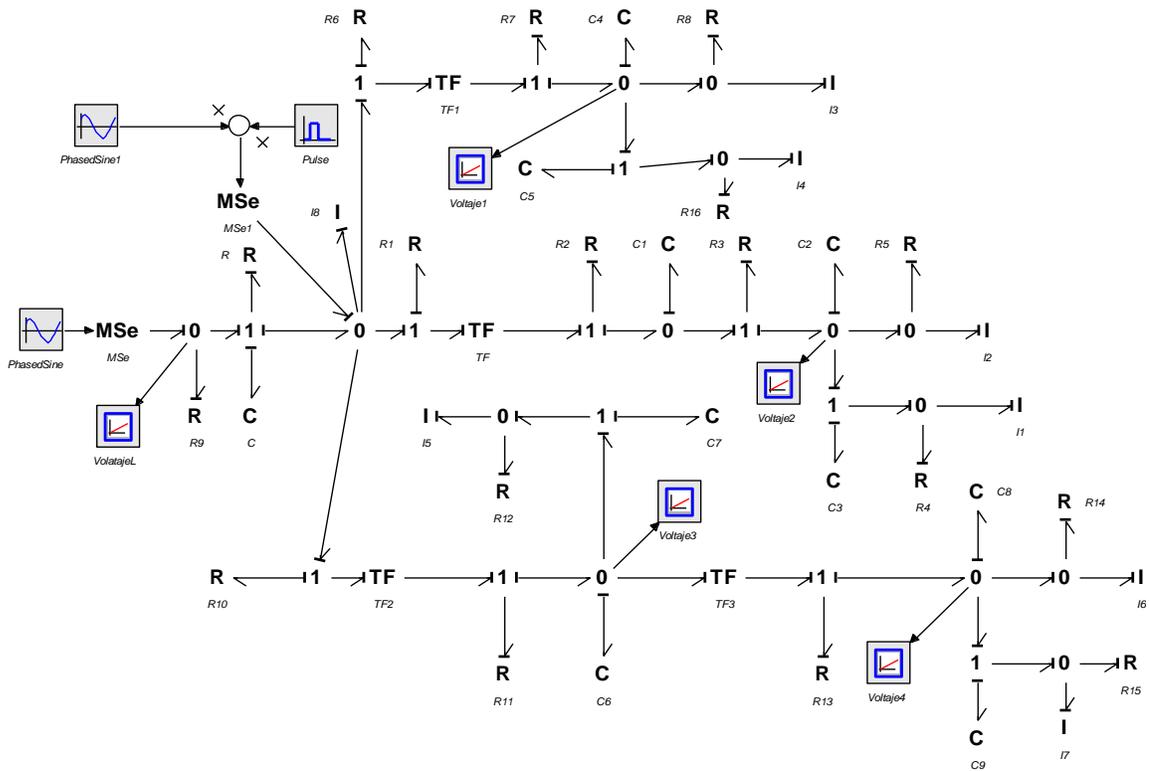


Figura 4.10 Bond Graph Caso de estudio múltiple (voltaje).

4.4.1 Simulación del circuito múltiple (Voltaje)

La simulación de este circuito intentará corroborar que los apartarraysos en condiciones de operación en estado estable no entraran en operación y los voltajes que se registren serán de 0 volts, pero una vez que la falla se presente en nodo al que se encuentran conectados los

apartarrayos respectivamente entraran en operación, por tal motivo se registran magnitudes de voltaje muy elevados que dependerán directamente de la magnitud de los valores que la falla traiga consigo (descarga atmosférica), los datos más representativos de la falla son la magnitud del voltaje, corriente y la frecuencia.

En general las descargas atmosféricas traen consigo magnitudes de voltaje, corriente y frecuencia muy elevados del orden los KVolts, Kampers y miles de ciclos en una fracción de segundo, motivos por los cuales una descarga atmosférica se vuelve tan relevante y peligrosa para un circuito eléctrico de aquí se desprende la importancia de proteger los circuitos eléctricos ante estos eventos meteorológicos.

Los datos de la falla con los que se lleva a cabo la simulación fueron asignados dentro de los rangos que se mencionan en el párrafo anterior.

a) Simulación circuito múltiple en estado estable (Voltaje)

Los parámetros que encontraremos en esta simulación deben de registrar valores muy próximos a cero, debido a que los apartarrayos no deben de operar en condiciones normales.

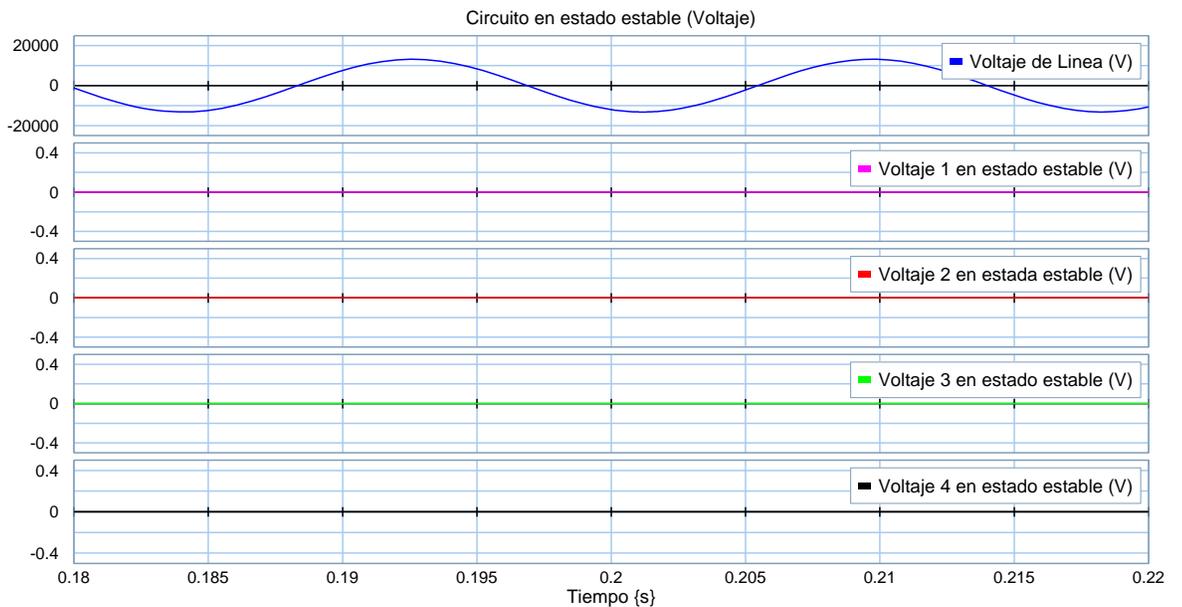


Figura 4.11 Simulación del circuito caso de estudio múltiple en estado estable (volteje).

b) Simulación circuito múltiple bajo falla (Voltaje)

Las cuantificaciones que se observarán con esta simulación deben de encontrarse dentro del orden de los kilo-volts, esto por el hecho de que la capacidad de la falla es muy grande.

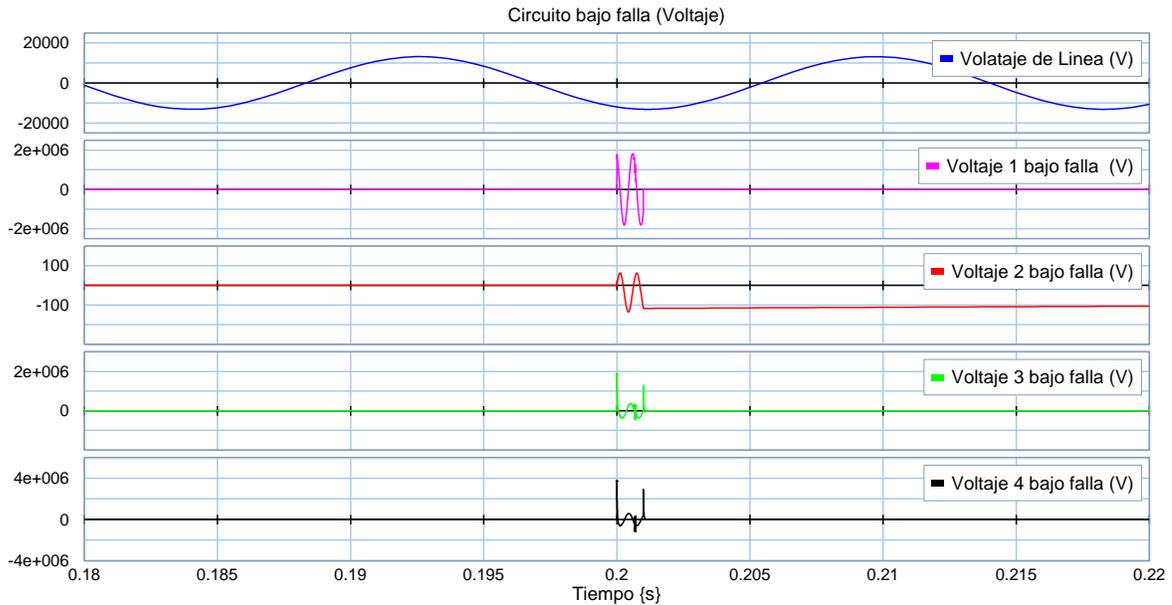


Figura 4.12 Simulación del circuito caso de estudio múltiple bajo falla (voltaje).

Las impresiones recogidas por las simulaciones anteriores es que los apartarrayos se comportan adecuadamente, por la razón de que en estado estable los voltajes se mantienen en cero y en presencia de falla los voltajes se elevan en un rango de los Kvolts.

4.4.2 Simulación del circuito múltiple (Corriente)

De la misma forma que en la simulación del voltaje, ahora se corrobora que la corriente se comporta de forma parecida al voltaje, la figura 4.13 representa el Bond Graph del caso de estudio múltiple desprendida de la figura 4.10. Sólo que ahora se ha modificado para que la simulación muestre el comportamiento de las corrientes en las dos etapas con las que sea venido trabajando (estado estable, bajo falla).

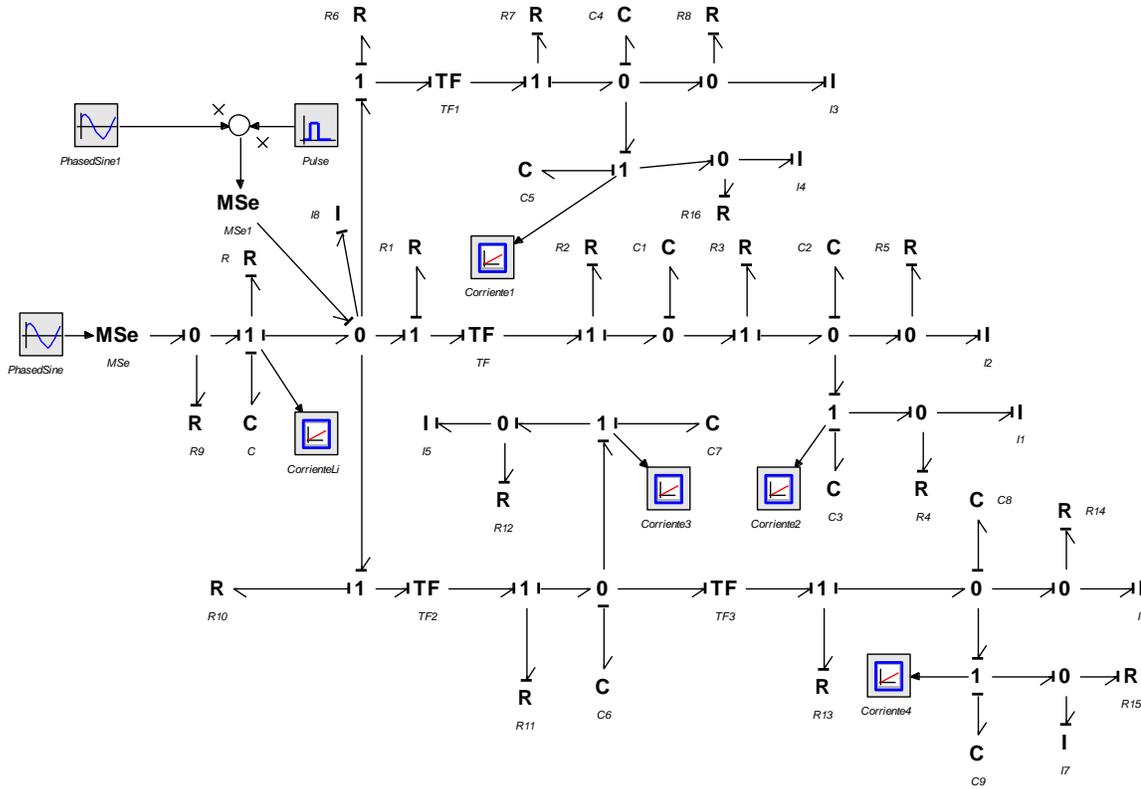


Figura 4.13 Bond Graph caso de estudio múltiple (Corriente).

a) Simulación circuito múltiple en estado estable (Corriente)

Tal y como se mostró el voltaje, la cantidad de corriente que circule por los Apartarrays deben de ser muy parecidas a los voltajes esto en cuanto a magnitud se refiere.

Al introducirse el modelo en BG de la figura 4.13 en el simulador 20-SIM, se obtiene el comportamiento de las corrientes que circulan por los apartarrays cuando el circuito se encuentra funcionando en condiciones normales de operación, la figura 4.14 muestra estos resultados.

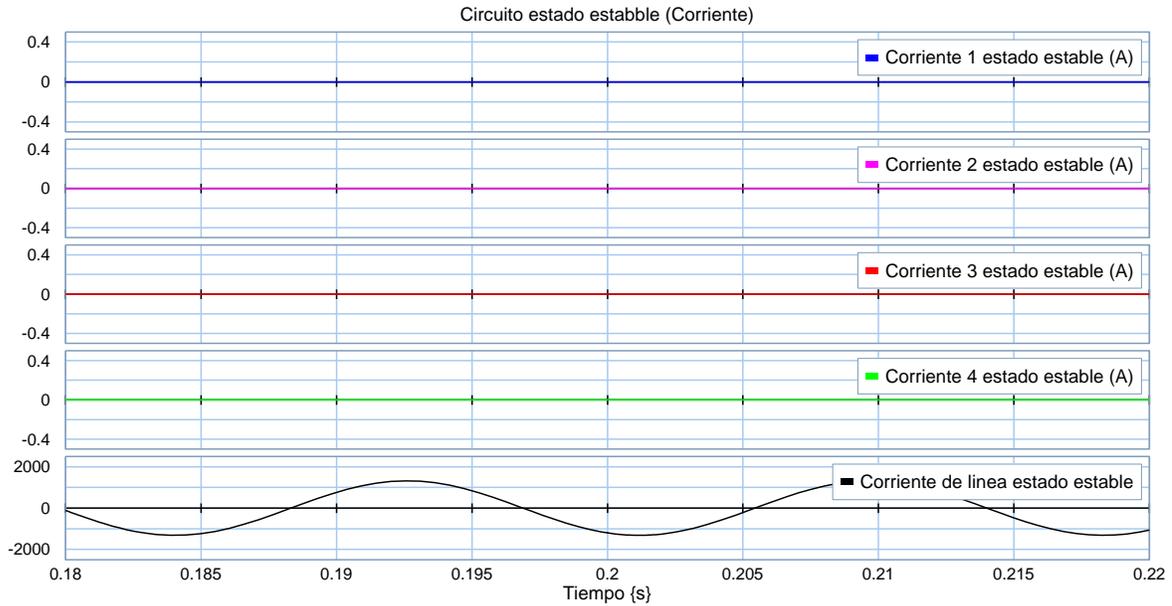


Figura 4.14 Simulación del circuito caso de estudio múltiple en estado estable (corriente).

Los resultados que genera la simulación nos muestra que mientras no exista una falla en el sistema, el apartarrayo no permitirá la circulación de corriente a través de él.

b) Simulación circuito múltiple con falla (Corriente)

Ahora observaremos si sucede algo parecido con la corriente a lo que sucede con el voltaje al presentarse una falla, esto es que las corrientes circulantes por los cuerpos de los apartarrayos cambien repentinamente de (0 amperes) a valores del orden de los (Kilo amperes) o algo parecido justo en el instante que se presentarse el disturbio en el circuito.

Los resultados que se conciben al ingresar el modelo de la figura 4.13 al simulador de 20-SIM, son arrojados las gráficas de la figura 1.15.

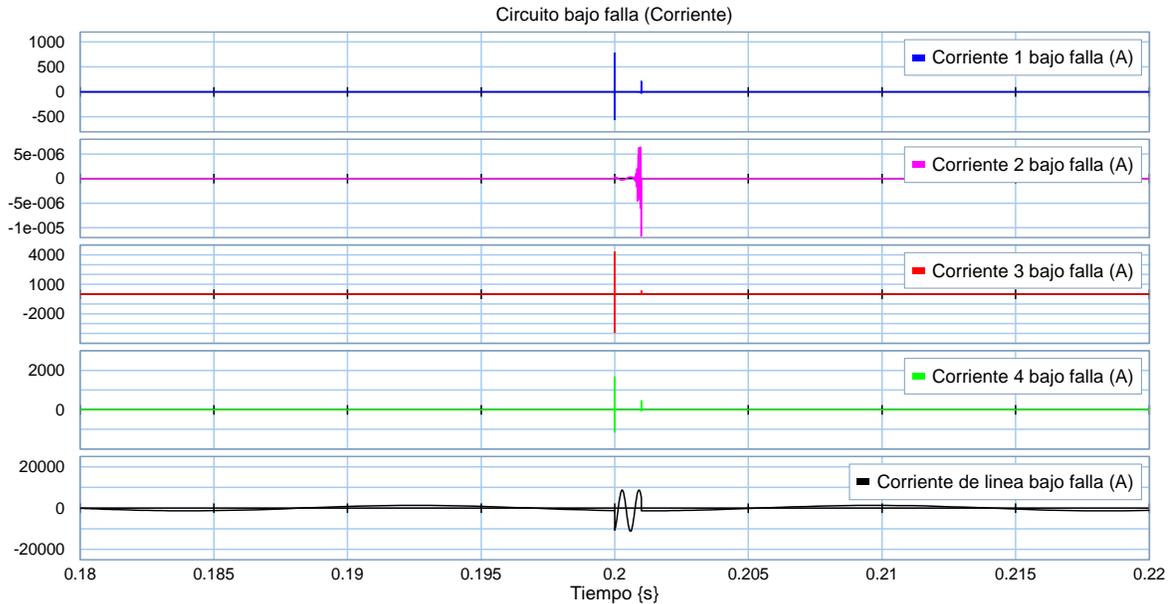


Figura 4.15 Simulación del circuito caso de estudio múltiple bajo falla (corriente).

En la figura 4.15 se observa que la corriente aumenta algunos cientos de amperes al instante en que el disturbio aparece drenándola a tierra y en los ciclos posteriores en algunos apartarrayos la corriente se reduce a (0 amperes) y es hasta el momento en que desaparece totalmente la falla, es cuando los apartarrayos muestran nuevamente corrientes circulando por ellos.

La interpretación que se puede hacer de las simulaciones del circuito (caso múltiple) es que los resultados arrojados coinciden con el funcionamiento real de un apartarrayo.

Aún con la expresado en los párrafos anteriores estos resultados no comprueban que los apartarrayos que se analizan en estos circuitos están funcionando correctamente, porque para realizar una afirmación de esta naturaleza se tienen que realizar números estudios al modelo presentado en este trabajo, además de que algunos valores que fueron elegidos para estas simulaciones no cuentan con los fundamentos necesarios para incluirlos dentro de los valores que los elementos reales representan en un circuito eléctrico en operación.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En la presente tesis se ha observado el funcionamiento de un apartarrayo bajo ciertas características de trabajo; además se utiliza el método de Bond Graph para el análisis del circuito eléctrico producido por un apartarrayo conectado a la red eléctrica; a través de este método se logró obtener el modelo matemático del apartarrayo tomando sólo la parte lineal del circuito formado por este elemento de protección.

Con el análisis realizado queda de manifiesto que el modelado con este método se facilita en trabajo, tiempo y esfuerzo en la obtención del modelo matemático de cualquier sistema que se desee analizar por medio de esta metodología.

El modelado con Bond Graph asiste al lector para ubicar de forma gráfica las partes del sistema que estén involucradas en la investigación, esto por poseer la característica de ser un método gráfico, logrando una clara descripción del funcionamiento del sistema, sin la necesidad que el lector conozca el modelo matemático o características de operación del sistema en estudio.

Un punto central en este trabajo de investigación fue presentar el modelo matemático obtenido a través de ecuaciones de estado del circuito eléctrico producido por el apartarrayo, el cual fue obtenido satisfactoriamente; la obtención de las ecuaciones de estado por medio de Bond Graph se facilita en gran medida, comparándolo con la aplicación clásica de las leyes físicas que rigen al circuito eléctrico del apartarrayo.

Los objetivos se cumplieron satisfactoriamente a excepción de los esfuerzos mecánicos que no se trataron por darle prioridad a los efectos eléctricos.

El modelado físico y la simulación del apartarrayo está basado en los lineamientos de la teoría del modelado en Bond Graph, las especificaciones eléctricas de los componentes eléctricos del apartarrayo y del sistema eléctrico; el modelado del apartarrayo

sigue el procedimiento especificado por Bond Graph para circuitos eléctricos, de igual forma las simulaciones son realizadas bajo el procedimiento gráfico desarrollado por BG.

Las simulaciones mostradas dependen en gran medida de la precisión de los parámetros involucrados en la simulación, debido a que cada elemento que forma parte de un sistema eléctrico tiene sus propias características de funcionamiento, por lo tanto las soluciones pueden ser múltiples para un circuito protegido por Apartarrayo.

5.2 Recomendaciones

La metodología proporcionada por Bond Graph facilita en gran medida el análisis de sistemas físicos, pero se debe sujetar a las reglas y lineamientos determinados por BG, para la obtención del modelo matemático y físico, esto se traduce en que el investigador debe de seguir al pie de la letra el procedimiento, además la técnica debe estar en contexto ya que existen variaciones en las instrucciones para los distintos sistemas que se pueden presentar (mecánicos, eléctricos, térmicos, hidráulicos, económicos, biológicos, etc.).

El modelo del apartarrayo que se analiza en este trabajo de tesis, es uno de los componentes más utilizados para proteger circuitos eléctricos ante la presencia de sobretensiones, razón por la cual este trabajo puede ser el punto de partida para el estudio más detallado de este elemento, dentro de las recomendaciones para trabajos futuros se tienen las siguientes:

- Realizar un estudio que presente un modelo que involucre la parte no lineal del apartarrayo.
- Considerar los efectos térmicos a los que se ve sujeto el apartarrayo al momento de drenar energía a tierra cuando este entra en operación.
- Trabajar en los parámetros reales de los elementos que están involucrados en un circuito real (Protección de un transformador por medio de Apartarrayo).
- Organizar un trabajo que trate los esfuerzos mecánicos a los que se ve sujeto el Apartarrayo bajo una falla.

Bibliografía

1. [Enríquez Harper, 2008]

Enríquez Harper, Gilberto, Elementos de diseño de subestaciones eléctricas, México Limusa, 2008.

2. [Enríquez Harper, 2004]

Enríquez Harper, Gilberto, El ABC de las instalaciones eléctricas industriales, México, Limusa, 2004.

3. [Enríquez Harper, 2008]

Enríquez Harper, Gilberto, Fundamentos de instalaciones eléctricas de media y alta tensión, México, Limusa, 2004.

4. [Hayt, Jr, Kemmerly, Durbin, 2007]

Hayt, Jr, William H., Kemmerly, Jack E., Durbin, Steven M., Análisis de circuitos en ingeniería, México DF, Mc Graw Hill, 2007.

5. [Navarro Márquez, Montañez Espinoza, Santillán Lázaro, 1999]

Navarro Márquez, José A, Montañés Espinosa Antonio, Sanmillán Lázaro, Antonio, Instalaciones eléctricas de alta tensión, sistemas de maniobra, medida y protección, España, Paraninfo, 1999.

6. [Camarena M. 2002]

Camarena M. Pedro, Instalaciones eléctricas industriales, México, CECSA, 2002.