



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Simulación del canal PLT in-home tomando en cuenta efectos estocásticos debidos a las cargas del sistema**

**Juan Miguel David Becerra Tobar**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento Sistemas e Industrial  
Bogotá, Colombia

2012



# **Simulación del canal PLT in-home tomando en cuenta efectos estocásticos debidos a las cargas del sistema**

**Juan Miguel David Becerra Tobar**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Telecomunicaciones**

Director (a):

Ph.D.(c) Zoila Ramos de Florez

Línea de Investigación:

Redes y sistemas de telecomunicaciones

Grupo de Investigación:

GITUN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2012



## *Dedicatoria*

*A mis padres*

*Por sus consejos, su ejemplo de perseverancia y excelencia en todos y cada uno de los aspectos de su vida, sus enseñanzas, su apoyo y sobre todo su amor.*

*A mi hermano*

*Por su compañía y apoyo incondicional, sus consejos y sinceridad, por las continuas risas y rabias que me ha regalado.*

*A mis amigos*

*Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación y cuya presencia ha aportado distintas enseñanzas y conocimientos a mi vida.*

## *Lema*

*Nada es verdad, todo está permitido.*

*Anónimo*



## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional de Colombia por ofrecerme la oportunidad y el apoyo necesario para alcanzar el título de master en ingeniería-telecomunicaciones. A la doctora Zoila Ines Ramos de Florez, docente de la Universidad Nacional, por haberme mostrado la tecnología PLT, eje principal de la tesis, y su dirección y guía en el desarrollo de la tesis. Al doctor Mauro Florez Calderón, docente de la Universidad Nacional, por mostrarme la importancia de la tecnología PLT desde el punto de vista político sectorial. Al doctor Jorge Eduardo Ortiz Triviño, docente de la Universidad Nacional, por sus enseñanzas en el campo de la estadística aplicada a las telecomunicaciones, eje secundario de la tesis, y sus revisiones del trabajo realizado. A los ingenieros Gustavo Alonso Chica Pedraza y Jhon Alexander Reinoso Vargas, estudiantes de la Maestría en Ingeniería-Telecomunicaciones y miembros del grupo de investigación GITUN, por permitirme participar en las pruebas piloto PLT in-home realizadas en el grupo.





## Resumen

Este documento trata sobre la realización de una simulación por computador del canal PLT in-home utilizando el modelo de Zimmermann con la adición de los efectos estocásticos debidos a las cargas conectadas a la red eléctrica.

Se analizó el estudio realizado por el grupo de trabajo 1901 del IEEE sobre la respuesta en frecuencia de la red eléctrica para determinar el modelo idóneo a simular. Consecutivamente, se estudió el comportamiento de las cargas en ambientes in-home de forma estocástica con el objetivo de adicionarlo al modelo de Zimmermann para utilizarlo como un modelo dinámico. Posteriormente, se diseñó e implementó un simulador por computador del modelo de Zimmermann con la adición antes mencionada. Por último, la simulación es validada por medio del uso de múltiples técnicas de validación.

**Palabras clave:** telecomunicaciones por líneas de potencia (PLT), comunicaciones por líneas de potencia (PLC), selectividad en frecuencia, canales variantes en el tiempo, efectos estocásticos.

## Abstract

This document aims to show a PLT in-home's computer simulation using Zimmermann's model with stochastic effects addition due to loads plugged to electric grid.

A study performed by IEEE 1901 working group was analyzed to establish which model is suitable to simulate. Subsequently, stochastic behavior of in-home loads was studied in order to add it to Zimmermann's model, allowing it to be used as a dynamic model. Following, a computer simulator was designed and implemented to simulate Zimmermann's model with the addition mentioned before. At last, simulation is validated by using several validation techniques.

**Keywords:** Power Line Telecommunication (PLT), Power line communication (PLC), frequency selective, time-varying channels, stochastic behavior.

# Contenido

Pág.

Resumen IX

Contenido XI

<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVI</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Elección de un modelo de canal para redes PLT in-home .....</b>	<b>7</b>
1.1 Modelo de respuesta en frecuencia del canal PLT in-home .....	7
1.2 Modelos estáticos .....	8
1.3 Modelos dinámicos .....	9
1.4 Selección del modelo para la simulación .....	10
1.5 Explicación del modelo .....	12
<b>2. Adición del comportamiento estocástico al modelo para distintos escenarios, variaciones a corto plazo y a término indefinido .....</b>	<b>19</b>
2.1 Componente estocástico del modelo. ....	19
2.2 Variaciones por topología .....	19
2.3 Variaciones en períodos largos.....	20
2.4 Variaciones en períodos cortos.....	21
2.5 Adición estocástica .....	23
<b>3. Diseño e implementación del simulador del modelo por computador.....</b>	<b>29</b>
3.1 Herramienta de software para el simulador.....	29
3.2 Estructura de datos.....	30
3.2.1 Representación de la red eléctrica .....	31
3.2.2 Estructura para las cargas .....	33
3.2.3 Estructura para el algoritmo genético .....	34
3.3 Diseño del algoritmo .....	36
3.3.1 Búsqueda de las trayectorias .....	37
3.3.2 Cálculo de la distancias de cada trayectoria.....	42
3.3.3 Algoritmo para calcular el factor de ponderación.....	44
3.3.4 Valor esperado del canal.....	49
3.3.5 Series de tiempo .....	53

---

<b>4. Validación de la simulación .....</b>	<b>59</b>
4.1 Técnicas de validación .....	59
4.1.1 Recolectar información y datos del sistema de alta calidad .....	59
4.1.2 Mantener un documento con suposiciones y realizar una revisión estructurada.....	60
4.1.3 Validar los componentes de la simulación por medio de técnicas cuantitativas.....	61
4.1.4 Validar el producto de la simulación completa .....	61
4.2 Selección de las técnicas de validación a realizar .....	62
4.3 Aplicación de las técnicas de validación .....	63
4.3.1 Validación por teoría utilizada .....	63
4.3.2 Comprobación de la función de probabilidad .....	64
4.3.3 Validación y verificación de los subsistemas del simulador.....	66
4.3.4 Test de sensibilidad .....	74
4.3.5 Metodología para validar los resultados por medio de medidas.....	77
4.3.6 Validación del producto de la simulación .....	81
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>87</b>
5.1 Conclusiones.....	87
5.2 Recomendaciones.....	88
<b>Bibliografía .....</b>	<b>91</b>

## Lista de figuras

Pág.	
	<b>Figura 1-1:</b> Representación en 3D del comportamiento del canal PLT [34] ..... 8
	<b>Figura 1-2:</b> Parámetros distribuidos de una línea de transmisión..... 13
	<b>Figura 2-1:</b> Diagrama de estados de las cargas [62]..... 20
	<b>Figura 2-2:</b> Impedancia variante en el tiempo de un dispositivo eléctrico [30]..... 21
	<b>Figura 2-3:</b> Caso conmutado [22]. ..... 22
	<b>Figura 2-4:</b> Caso armónico [22]. ..... 23
	<b>Figura 2-5:</b> Estados de la carga..... 24
	<b>Figura 2-6:</b> Ejemplo ubicación de las cargas y topología esperada ..... 26
	<b>Figura 3-1:</b> Estructura de la representación de la red eléctrica. .... 32
	<b>Figura 3-2:</b> Red con una rama..... 32
	<b>Figura 3-3:</b> Representación matricial, componentes a y b respectivamente. .... 33
	<b>Figura 3-4:</b> Composición del dato lista..... 35
	<b>Figura 3-5:</b> Representación general del algoritmo utilizado para realizar la simulación. 36
	<b>Figura 3-6:</b> Generador de árbol con límite de nodos..... 40
	<b>Figura 3-7:</b> Algoritmo para encontrar trayectorias exitosas en el árbol. .... 41
	<b>Figura 3-8:</b> Resultado del algoritmo de búsqueda de trayectorias. .... 42
	<b>Figura 3-9:</b> Algoritmo para obtener la distancia de cada trayectoria. .... 43
	<b>Figura 3-10:</b> Cálculo de impedancia de carga para nodos sin cargas..... 45
	<b>Figura 3-11:</b> Cálculo de coeficientes de reflexión debidos a las cargas y equipos PLT.. 46
	<b>Figura 3-12:</b> Calculo de factor de ponderación a partir de variables aleatorias. .... 48
	<b>Figura 3-13:</b> Cálculo de probabilidades ..... 50
	<b>Figura 3-14:</b> Cálculo del valor esperado de la respuesta del canal. .... 51
	<b>Figura 3-15:</b> Topología de ejemplo ..... 52
	<b>Figura 3-16:</b> Vista 3D de la respuesta esperada entre nodos 1 y 4..... 53
	<b>Figura 3-17:</b> Función $g_{st}$ ..... 55
	<b>Figura 3-18:</b> Evaluación de los estados de las cargas en el tiempo $t$ ..... 56
	<b>Figura 4-1:</b> Comparación entre porción de tiempo y probabilidad para el estado apagado ..... 64
	<b>Figura 4-2:</b> Comparación realizada con múltiples series de tiempo para el estado apagado. .... 65
	<b>Figura 4-3:</b> Topología A..... 66
	<b>Figura 4-4:</b> Topología B..... 66
	<b>Figura 4-5:</b> Trayectorias topología A, inicio 1 final 4 ..... 67
	<b>Figura 4-6:</b> Trayectorias topología A, inicio 2 final 3 ..... 67
	<b>Figura 4-7:</b> Trayectorias topología B, inicio 1 final 4 ..... 67

---

<b>Figura 4-8:</b> Trayectorias topología B, inicio 2 final 3.....	67
<b>Figura 4-9:</b> Distancias totales de las 6 primeras trayectorias.....	68
<b>Figura 4-10:</b> Vector de coeficientes de reflexión debidos a las impedancias z. ....	69
<b>Figura 4-11:</b> Magnitud de la impedancia de la carga 1 .....	70
<b>Figura 4-12:</b> Magnitud del coeficiente de reflexión debido a la carga 1 .....	71
<b>Figura 4-13:</b> Magnitud de la impedancia de la carga 2 .....	72
<b>Figura 4-14:</b> Magnitud del coeficiente de reflexión debido a la carga 2 .....	73
<b>Figura 4-15:</b> Factores de ponderación .....	73
<b>Figura 4-16:</b> Respuesta esperada del canal con todas las trayectorias halladas.....	75
<b>Figura 4-17:</b> Respuesta en 0.0045 segundos.....	76
<b>Figura 4-18:</b> Respuesta en 0.0085 segundos.....	77
<b>Figura 4-19:</b> Esquema de medida .....	78
<b>Figura 4-20:</b> Ejemplo de acoplador [34].....	79
<b>Figura 4-21:</b> Ejemplo de filtro pasa bandas [34] .....	79
<b>Figura 4-22:</b> Ejemplo de detector de cruces por cero [34] .....	79
<b>Figura 4-23:</b> Evolución cíclica de la respuesta de amplitud del canal [33] .....	82
<b>Figura 4-24:</b> Respuesta del canal, topología B.....	83
<b>Figura 4-25:</b> Respuesta del canal en dB .....	84



## Lista de tablas

<b>Pág.</b>		
	<b>Tabla 3-1:</b> Ponderación de criterios para selección de la herramienta.....	30
	<b>Tabla 3-2:</b> Escala de valores criterios 1 y 2. ....	30
	<b>Tabla 3-3:</b> Relación entre tipo de carga y sus parámetros. ....	33
	<b>Tabla 3-4:</b> Características de cables típicamente utilizados en redes in-home [22] .....	34
	<b>Tabla 4-1:</b> Comparación entre cálculos teóricos y datos del simulador.....	68
	<b>Tabla 4-2:</b> Ejemplos de cargas variantes e invariantes en el tiempo.....	69
	<b>Tabla 4-3:</b> Parámetros de las cargas .....	74
	<b>Tabla 4-4:</b> Lista de equipos .....	78
	<b>Tabla 5-1:</b> Características y tecnologías de las normas actuales de PLT [70] .....	¡Error!
	<b>Marcador no definido.</b>	



## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$C$	Un lenguaje de programación		
$C_0$	Velocidad de la luz en el vacío	$\frac{m}{s}$	
$f$	frecuencia	$s^{-1}$	
$Hz$	Hertz	$s^{-1}$	
$i$	fila		
$j$	Columna		
$MSPS$	Millones de muestras por segundo	$\frac{Samples}{s}$	
$W$	Vatios	$\frac{kg * m^2}{s^2}$	$V * I$
$Y$	Parámetros de admitancia	$\frac{A}{V}$	$\frac{I}{V}$
$Z$	Impedancia	$\frac{V}{A}$	$\frac{V}{I}$

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\Gamma$	Coeficiente de reflexión		
$\epsilon$	Permitividad	$\frac{F}{m}$	
$\omega$	Frecuencia angular	$\frac{rad}{s}$	$2\pi f$

### Subíndices

Subíndice	Término
'	Parámetro distribuido primario
A	Parte constante de la impedancia
B	Parte variante de la impedancia
i	i-ésimo camino
L	Carga
m	Señal de energía eléctrica, 60 o 50 Hz
n	Estado
ON	Estado encendido
p	fase

## Superíndices

### Superíndice Término

k	Proporción de atenuación capacitiva o resistiva, potencia
n	Exponente, potencia

## Abreviaturas

### Abreviatura Término

<i>AC</i>	Corriente alterna
<i>ADC</i>	Convertidor analógico a digital
<i>BER</i>	Tasa de error de bits
<i>BPS</i>	Bits por segundo
<i>DAC</i>	Convertidor digital a analógico
<i>dB</i>	Decibel
<i>ENOB</i>	Numero efectivo de bits
<i>ENWD</i>	“Eastern municipal wáter district”
<i>IEEE</i>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<i>IP</i>	Protocolo de internet
<i>LAN</i>	Red de área local
<i>MAC</i>	Control de acceso al medio
<i>NGN</i>	Redes de próxima generación
<i>OFDM</i>	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
<i>PC</i>	Computador personal
<i>PIB</i>	Producto interno bruto
<i>PLC</i>	Comunicaciones por líneas de potencia
<i>PLT</i>	Telecomunicaciones por líneas de potencia
<i>PVC</i>	Policloruro de vinilo
<i>QoS</i>	Calidad de servicio
<i>RF</i>	Radiofrecuencia
<i>RLC</i>	Resistencia, inductancia, capacitancia
<i>SCR</i>	Rectificador controlado de silicio
<i>SNR</i>	Relación señal a ruido
<i>TIC</i>	Tecnologías de la información y las comunicaciones





# Introducción

La transmisión de servicios de telecomunicaciones utilizando la red eléctrica conocida como PLT, BPL o PLC es una tecnología emergente con gran importancia para el futuro de las telecomunicaciones, tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) debido a los beneficios que genera, tales como: una reducción del 50% en el costo de la instalación comparado con otras tecnologías de banda ancha, porque utiliza una infraestructura previamente existente [1,2,3]; la tasa de transferencia de 5 Gbps según los últimos estándares [4,5]; distancia máxima de 300 metros, superior a Ethernet o wi-fi [6]; la gran flexibilidad, que la convierten en una opción viable para los operadores de telecomunicaciones [7]; es ideal para edificaciones tanto antiguas como nuevas, ya que no hay necesidad de realizar obras civiles extras o tender cableado, entre otros.

Adicionalmente, en el marco de las redes de nueva generación, NGN, la convergencia de servicios es fundamental, por lo cual se requiere de la independencia del servicio sobre la red que se transmite, por lo tanto, la comunicación debe realizarse completamente sobre IP [8]. PLT demuestra ser una tecnología que se encuentra al nivel de este requerimiento, ya que tiene una compatibilidad completa para las transmisiones de banda ancha sobre IP [9,4,5]. Por otro lado, está comprobada la transmisión de paquetes de servicios que no necesariamente funcionan todos sobre IP, como es el caso de los paquetes “triple play” [10], en caso de aquellos operadores o usuarios que piensen continuar este modelo de negocio.

Por otra parte, se encuentran los beneficios que obtiene un país al aumentar el acceso a banda ancha, que según estudios realizados por el banco mundial son: un incremento de 10% en la penetración de banda ancha, impacta positivamente con un 0.5% de elasticidad del PIB junto con un incremento entre 0.1% al 1.4% del mismo [11,12,13], fin para el cual PLT provee grandes posibilidades. También se encuentra la creciente aparición de dispositivos electrónicos que utilizan conexión a Internet para ofrecer nuevas funciones y así mejorar su funcionalidad. Dada esta tendencia; PLT es la mejor opción

para implementar el “Internet de las cosas” [14,15] por medio del uso de IPv6, debido a que provee cobertura completa en ambientes domésticos o de oficina [16].

Sin embargo, la implementación de PLT se ha visto retrasada debido al desconocimiento de la tecnología por parte de operadores, tanto de telecomunicaciones como de energía eléctrica, barreras de entrada al sector y modelos tradicionales de negocio en telecomunicaciones [7]. Se debe tomar en cuenta que PLT no es una tecnología reciente; el primer uso de la red eléctrica para la transmisión de información data de la década de 1950, cuando se diseñaron las primeras técnicas para enviar mensajes utilizando la red de energía con tasas de transferencia de unos bits por segundo [17], desde entonces han existido distintos protocolos o generaciones: X-10 de 1975, también llamada “Power Line Carrier”, usada comúnmente en domótica [18]; en 1997 las compañías United Utilities y Northern Telecom crearon “Digital Power Line”; el año siguiente se incluye el uso de la técnica de modulación OFDM, dando paso al PLT comercial con 1.2 Mbps [19]; posteriormente aparecen equipos comerciales que funcionaban a 14 Mbps [20], seguidos por otra generación con velocidades de 85 Mbps. Actualmente existen equipos con velocidades de 200 Mbps y se espera que próximamente se trabaje a frecuencias cercanas a los 100 MHz con tasas de 5 Gbps [4,5].

Adicionalmente, se encuentra que la red eléctrica es un medio hostil para la transmisión de servicios de telecomunicaciones, por lo que es necesario realizar caracterizaciones de la red para obtener implementaciones que puedan cumplir con los requerimientos de QoS que el servicio requiera; esto aumenta el tiempo de instalación. Por esta razón se han llevado a cabo numerosos estudios de caracterización y modelado de la red eléctrica con el objetivo de ayudar a la rápida implementación de esta tecnología [21,22,23,24].

Dentro de las características observadas al transmitir servicios de telecomunicaciones en la red eléctrica se encuentran: vulnerabilidad a la interferencia o la producción de la misma sobre otras redes de telecomunicaciones [25,26], comportamiento multi-trayecto similar al presentado en las redes inalámbricas causado por desacoples en la red, sin embargo, no presenta una atenuación rápida con respecto a la longitud y cambio de la posición de los nodos con el tiempo [27,28], variación de forma estocástica de las cargas conectadas al canal, lo cual modifica su comportamiento, ruido causado por fuentes conmutadas o por otras fuentes [29].

Los cambios del canal debidos a las cargas se clasifican en 2 tipos: aquellos causados por la conexión o desconexión de aparatos a la red y los producidos por el comportamiento de las cargas en el tiempo como fuentes conmutadas o convertidores de potencia en el sentido general. En el primer caso, las variaciones están ligadas a la actividad humana; lo cual imposibilita su predicción por medio de métodos determinísticos obligando al uso de procesos estocásticos [30]. Mientras en el segundo caso, el comportamiento es variante en el tiempo para el rango de frecuencias que utiliza PLT y varía en función de la amplitud instantánea del voltaje AC [31,32,33]. Ignorar el efecto multi-trayecto y la naturaleza estocástica del canal causa una disminución en el rendimiento de los servicios de banda ancha del 60% aproximadamente [28,34,35], problema común en las implementaciones y estudios realizados a partir de modelos estáticos.

No obstante, sólo la sección interna o in-home de la red eléctrica se ve afectada por los efectos de las cargas y el efecto multi-trayecto de forma tan marcada como se mencionó anteriormente. Existen 3 secciones de la red PLT que se clasifican según la sección de la red eléctrica en la que funcionan: para media tensión se utiliza para el sistema de distribución o backbone [1,36], en el caso de baja tensión se hace una división entre la red externa a las casas también conocida como outdoor; la cual se utiliza como red de acceso y está enfocada a resolver el problema de la última milla, esta comprende el segmento desde el transformador hasta el medidor de energía eléctrica [37]; mientras las redes internas domesticas reciben la denominación de “in-home” y se pueden separar tomando en cuenta que le pertenecen al usuario; no al distribuidor de energía eléctrica.

Tomando en cuenta que en PLT in-home existe un gran interés por parte de empresas y organismos reguladores por las razones anteriormente mencionadas [19,38] junto con la creciente importancia de las llamadas redes inteligentes, donde PLT ofrece la mejor opción para hacer viable este tipo de sistemas [39]. Por estas razones, es necesario desarrollar herramientas de computación que permitan predecir el comportamiento del canal con el nivel de detalle adecuado para las redes in-home; el diseño de estas redes se vería beneficiado al realizar simulaciones que permitan prever el comportamiento de la red, a partir de modelos provenientes de caracterizaciones previamente realizadas junto con los efectos que se observan en el ambiente interno y así disminuir el tiempo de

diseño e implementación. Adicionalmente, debe estar en capacidad de trabajar sobre distintas topologías, para que los resultados puedan ser implementados en diferentes escenarios. Por lo tanto, el diseño, implementación y optimización de forma más eficiente y rápida de las redes PLT, es un beneficio plausible a partir de las simulaciones al igual que el caso de otros sistemas de telecomunicaciones.

Existen desarrollos anteriores enfocados a simular parámetros de capas superiores, como: throughput, jitter, BER o broker y su relación con la elección de protocolos para la capa MAC, en estos casos NS-2 es una herramienta comúnmente utilizada [40,41,42,43]. No obstante, ya que su fin último es determinar parámetros de nivel superior se desconoce las topologías y los modelos de canal utilizados. Por otro lado, existen desarrollos donde a partir de lenguajes como C se crean software de simulación de respuesta del canal [44] o parámetros [30,45,46]. También existe una simulación realizada con el software ATP-EMTP [47], el cual es utilizado en [48] para simular la atenuación que produce la transmisión de una señal de banda angosta (110 kHz) sobre la red eléctrica; aunque no se han encontrado más referencias a este software.

Otras simulaciones que están enfocadas a la respuesta del canal, utilizan programas como MATLAB, a través de sus herramientas como SIMULINK o utilizando código, para simular por medio de funciones de transferencia. No obstante, la mayoría se realizan para escenarios específicos, es decir, para redes con una caracterización determinada donde la simulación se ajusta a los datos prácticos, causando una aplicación limitada de los resultados [49]; en caso de realizar simulaciones de manera estadística se ignora el componente temporal de la respuesta de la red eléctrica [39,50,51,52]. Sin embargo, algunos trabajos en MATLAB hacen uso de otros tipos de modelos; por ejemplo en [23] se utiliza un modelo compuesto de parámetros primarios de las líneas de transmisión.

SPICE es una herramienta de software típicamente utilizada para simular circuitos usando esquemáticos, por lo tanto, por medio de medidas realizadas con analizadores de redes se pueden obtener los parámetros primarios; permitiendo obtener una respuesta del canal [24,53,54], aunque debido a la naturaleza del modelo los resultados no son aplicables a escenarios que no sean similares a aquellos donde se tomaron las medidas.



Por lo tanto, se requiere desarrollar un simulador que sea aplicable a diferentes escenarios del ambiente in-home e incluya los efectos que tienen las cargas en la red, esta necesidad ha sido reconocida por el IEEE [34] y es el objetivo de este trabajo, realizado utilizando la metodología para simular sistemas [55].

Se parte de los antecedentes recogidos y analizados por el grupo de trabajo de la norma IEEE 1901 sobre la respuesta en frecuencia y tiempo de la red eléctrica para transmisiones de banda ancha donde se escogió el modelo de Zimmermann, que es el más propicio para simular. Posteriormente, se estudiaron las distintas causas que provocan variaciones en la respuesta del canal con respecto a los escenarios y las cargas del sistema, luego se adicionaron estos comportamientos al modelo seleccionado, a su vez se presenta el trasfondo matemático de la adición, siendo este el primer trabajo que utiliza el modelo de Zimmermann con variación temporal causada por las cargas del sistema. Se continúa con el diseño e implementación del simulador por computador, donde se presentan todas las consideraciones necesarias para el correcto funcionamiento y los subsistemas del mismo. Subsecuentemente, la validación de la simulación realizada por medio de distintas técnicas es presentada.

La simulación se limita únicamente a la respuesta del canal, no se tuvo en cuenta el ruido presente en la red o la obtención de parámetros de nivel superior en la capa OSI. Al final se presentan las conclusiones del trabajo. Cada paso anteriormente mencionado se encuentra desarrollado en un capítulo de la tesis en el mismo orden que fueron presentados.



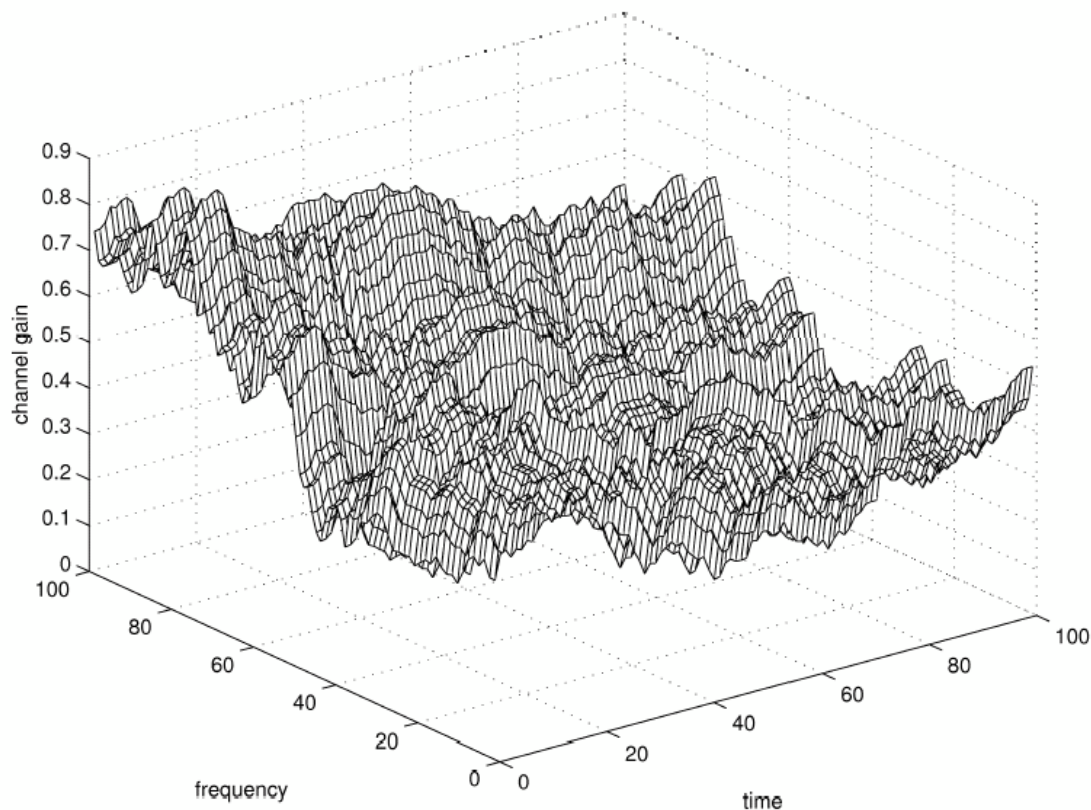
# **1. Elección de un modelo de canal para redes PLT in-home**

## **1.1 Modelo de respuesta en frecuencia del canal PLT in-home**

Este capítulo pretende mostrar los modelos de respuesta del canal de la red PLT más comunes y la selección del mismo para el prototipo del simulador. Esta elección es importante debido a que PLT al igual que otras redes posee una variedad de modelos que han ido evolucionando con el tiempo, siempre con el objetivo de representar de la manera más simple y efectiva los efectos adversos de utilizar la red eléctrica como canal de comunicaciones.

La ganancia del canal  $H(f, t)$  está representada en la Figura 1-1, se observa una dependencia de la frecuencia en la forma de la respuesta, sin embargo, varía de forma aleatoria con respecto al tiempo, demostrando el comportamiento estocástico del cableado eléctrico. Por lo tanto, el canal se puede modelar por medio de sus características estáticas y dinámicas, generando dos opciones principales en lo que respecta a la clasificación de los modelos.

**Figura 1-1:** Representación en 3D del comportamiento del canal PLT [34]



## 1.2 Modelos estáticos

Los modelos estáticos son aquellos que describen las características invariantes en el tiempo del canal, es decir, las propiedades que no están cambiando en el orden de segundos o milisegundos, por ejemplo, la conexión de un electrodoméstico a la red eléctrica cambia sus parámetros, pero esta variación se puede considerar como permanente en un periodo de tiempo corto. Frecuentemente este tipo de modelos están representados por matrices de parámetros S, ABCD, circuitos equivalentes, funciones de transferencia u otros parámetros (Z o Y por ejemplo).

En el caso de los modelos por parámetros S, tradicionalmente el parámetro  $S_{21}$  ha sido la forma más popular de expresar la capacidad de una línea de transmitir una señal.

Utilizando un analizador de redes se realiza la caracterización de  $S_{21}$  en función de frecuencia.

Por otro lado, el comportamiento del canal también puede ser representado por medio de circuitos con conexiones de elementos RLCG [24]. Normalmente cada uno de estos elementos se expresa de forma que sea dependiente de la frecuencia para representar mejor la respuesta del canal. Estos modelos son conocidos como circuitos equivalentes y pueden ser simplificados para obtener líneas de transmisión [56,57].

Cuando se utilizan funciones de transferencia o matrices [58,59] el procedimiento básicamente es el mismo. Por ejemplo, utilizando la transformada inversa del parámetro  $S_{21}$  se obtiene la respuesta impulso de la red eléctrica. La ventaja de estos modelos radica en que permiten reducir los tiempos de simulación.

Usualmente los modelos estáticos son obtenidos a partir de medidas hechas en circuito abierto y corto circuito, ajustando simulaciones o caracterización de parámetros  $S$  [23]. Por lo tanto estos son válidos desde que se haya realizado la caracterización red, proporcionándoles una naturaleza determinística restringiéndolos a representar ambientes específicos.

En lo que respecta a la sección interna y externa de la red eléctrica, la principal diferencia entre el modelamiento de las redes internas y externas es la dificultad de obtener la topología de una red interna, por ejemplo: el mapa de una red de media tensión se obtiene fácilmente de los datos de la empresa que administra la red, mientras en el caso doméstico no se encuentran planos eléctricos, especialmente en construcciones antiguas.

### 1.3 Modelos dinámicos

Los modelos dinámicos describen los cambios transitorios del canal que ocurren en el orden de segundos o milisegundos. En su mayoría estos efectos están relacionados con la presencia de convertidores de potencia en la red, como “choppers” o inversores, debido al cambio periódico de sus impedancias al apagar y encender los elementos que se encargan de modificar la topología del circuito [60]. Además, el modelo debe tomar en

cuenta el efecto de los elementos presentes en circuitos tan comunes como los reguladores de intensidad luminosa, SCR's por ejemplo.

Para modelar estas variaciones, la manera más apropiada es el uso de modelos estocásticos, de esta forma no se sujeta el modelo a una forma determinística permitiéndolo aplicar de un manera más amplia. La forma en que se adiciona una parte estocástica al modelo dependerá del tipo de modelo en sí.

Acerca de los ambientes de aplicación, la diferencia entre los modelos internos y externos radica en la presencia de las causas de estas variaciones. En el caso del ambiente externo, estos efectos se dan en raras ocasiones. Por lo tanto, estos modelos son completamente necesarios para los ambientes internos donde los dispositivos que afectan son usados cada vez con mayor frecuencia.

## **1.4 Selección del modelo para la simulación**

Los modelos de la red usualmente son seleccionados y ajustados según el programa en que se desee simular, es decir, cuando se planea utilizar paquetes de software como ORCAD normalmente se usa el modelo de circuitos equivalentes [24], si se planea usar programas como MATLAB los modelos matriciales o funciones de transferencia proveen la opción ideal [58]. Sin embargo, este criterio no es suficiente para llevar a cabo un trabajo de aplicación más amplia.

Para realizar la selección se debe iniciar con identificar parámetros o características importantes de los modelos que se ajusten a los requerimientos del sector de las telecomunicaciones en el renglón de las redes eléctricas in-home.

La implementación de la tecnología PLT ha estado limitada debido a la dificultad de predecir el comportamiento del canal en múltiples escenarios, inclusive a nivel in-home existen desigualdades entre los tipos de construcciones más comunes, por ejemplo, las distancias observadas en casas y en edificios de apartamentos son distintas por lo cual se requiere de antemano una caracterización del canal. Sin embargo, un modelo de

canal que sea utilizable en múltiples escenarios es deseable, aunque sea necesaria una gran cantidad de datos para llegar a un acuerdo sobre los parámetros del modelo y su variación respecto al escenario.

Adicionalmente, existen 2 factores que afectan el canal, a saber: la topología y la variabilidad temporal debido a cambios en las cargas. Mientras la topología se puede observar como un proceso estocástico, ver la respuesta del canal en función de variables espaciales complicando fuertemente el modelo, o abordarse desde un modelo que considere la longitud del cableado como un parámetro para calcular su respuesta, la variabilidad temporal se debe abordar como un proceso estocástico.

Los modelos determinísticos no están en la capacidad de representar la variabilidad temporal de la red eléctrica, por lo tanto, no se ajustan los requerimientos de la simulación. Además estos concuerdan con un único escenario, es decir, se han realizado numerosas simulaciones con estos modelos obteniendo buenos resultados, pero en cada caso sólo se aplican al lugar en que fue realizada la caracterización del canal, lo cual los hace poco confiables para realizar implementaciones a gran escala.

Es necesario tener en cuenta las variaciones en el tiempo del canal PLT debido al cambio de las cargas debido a que ignorar estos efectos causa una disminución en el rendimiento de los servicios de banda ancha del 60% aproximadamente [28]. Adicionalmente, al encontrarse la tecnología PLT en etapa de estandarización se requiere un modelo que facilite la comparación de diferentes sistemas de forma genérica.

Lo anterior proporciona como única opción los modelos dinámicos, para seleccionar el modelo indicado se realizó una búsqueda entre los distintos modelos de tipo estocástico que se han realizado y se encontró que el IEEE escogió el modelo de Zimmermann [21] en su esfuerzo por realizar el estándar IEEE 1901 [34]. Debido a la importancia de este organismo y al arduo trabajo que plasmaron al reunir y depurar la información contenida en las investigaciones sobre modelos estocásticos se utilizará este modelo como punto de partida para esta tesis.

## 1.5 Explicación del modelo

Este modelo es estocástico, por lo tanto, las características estáticas del canal se definen por medio de la ecuación (1.1), donde  $f$  es la frecuencia y  $l$  es la distancia entre el receptor y el transmisor. Para obtener la ganancia en dB solo se requiere aplicar la ecuación (1.2).

$$L(f, l) = E\{|H(f, t)|^2\} \quad (1.1)$$

$$L(f, l)(dB) = 10\log[L(f, l)] \quad (1.2)$$

La descripción estadística del comportamiento estático del canal proviene de declarar una función de densidad de probabilidad para  $L$ , ver ecuación (1.3), esta función es multidimensional aunque sólo utilice un resultado. Sin embargo, debido a la naturaleza multidimensional de esta descripción, es demasiado complicada para implementaciones prácticas. Una manera de simplificarla es asumir que la forma de la densidad es la misma para todas las frecuencias o longitudes, también se pueden utilizar datos recolectados por medio de campañas de caracterizaciones.

$$pdf_{L(f,l)}(x(f, l)) \quad (1.3)$$

El IEEE propone que si las caracterizaciones de los medios denotan que no existe correlación con respecto al tiempo, la frecuencia o la distancia se pueden omitir estos índices en la definición de la variable aleatoria, en pro de utilizar funciones de correlación sobre el ancho de banda relacionado con el tiempo y la frecuencia que son más comunes a los sistemas de comunicación.

La respuesta del canal en función de la frecuencia de forma general se define en la ecuación (1.4), donde uno de los términos exponenciales representan la atenuación debida a la frecuencia y la longitud del cable, comportamiento que se observa como un filtro pasa bajo con frecuencia selectiva. El otro término modela la demora existente entre la emisión y la recepción de la señal. Estos términos a su vez se encuentran ponderados por el factor  $g$ , el cual representa el efecto multi-trayecto, por lo tanto, la respuesta total

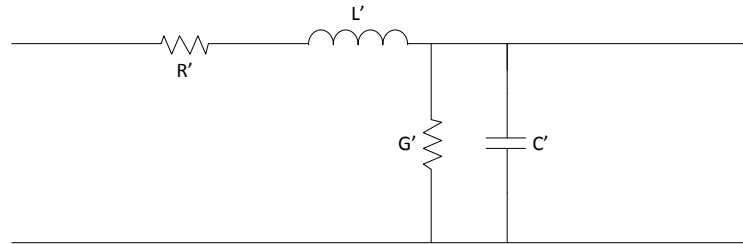


del canal se observa como la sumatoria de las respuestas de cada una de las ramas presentes entre el emisor y receptor.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{|g_i(f)|^{\varphi_{g_i}(f)}}_{\text{Ponderación}} * \underbrace{e^{-(a_0+a_1 f^k)d_i}}_{\text{atenuación}} * \underbrace{e^{-j2\pi f \tau_i}}_{\text{demora}} \quad (1.4)$$

La expresión que representa la atenuación del canal se obtiene analizando el canal utilizando teoría de líneas de transmisión [61]. Por lo tanto, se definen los parámetros de la línea, a saber, la impedancia característica y la constante de propagación, ver ecuaciones (1.5) y (1.6) respectivamente, donde los parámetros  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  y  $C'$  corresponden a la resistencia, inductancia, admitancia y capacitancia por unidad de longitud, las cuales se pueden ver en la Figura 1-2.

**Figura 1-2:** Parámetros distribuidos de una línea de transmisión



$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (1.5)$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') * (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta \quad (1.6)$$

Primero se considera que la línea de transmisión de longitud  $l$  está adaptada, por lo tanto la transferencia se expresa en función de la longitud y la constante de propagación por medio de la ecuación (1.7). A su vez los elementos de la línea se estiman a partir de

la teoría de campos electromagnéticos aplicados a la geometría más común encontrada en la transmisión de estas señales, es decir, dos cables paralelos separados por una distancia  $a$  y contenidos en una circunferencia de radio  $r$ .

$$H(f) = e^{-\gamma * l} = e^{-\alpha(f) * l - j\beta(f) * l} \quad (1.7)$$

$$R' = \sqrt{\frac{\pi\mu_0}{kr^2}} f \rightarrow R' \sim \sqrt{f} \quad (1.8)$$

Tomando en cuenta que la frecuencia de trabajo de la red está en el orden de MHz, la resistencia es función de la frecuencia debido al efecto piel, la cual puede ser aproximada utilizando la ecuación (1.8). En el caso de la inductancia y la capacitancia se expresan por medio de las ecuaciones (1.9) y (1.10), mientras en (1.11) se aproxima el valor de la admitancia en función de la frecuencia utilizando la característica circular de los conductores y el factor de disipación dieléctrico del material aislante, PVC.

$$L' = \mu_0 \mu_r \frac{a}{r} \quad (1.9)$$

$$C' = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{r}{a} \quad (1.10)$$

$$G' = 2\pi f C' \tan \delta \rightarrow G' \sim f \quad (1.11)$$

Usando propiedades del material y geometría se puede observar que  $R' \ll \omega L'$  y  $G' \ll \omega C'$  en el rango de frecuencias en que trabaja la tecnología PLT. Por lo cual, los cables se pueden modelar por medio de su impedancia característica y la constante de propagación se simplifica en las ecuaciones (1.12) y (1.13).

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (1.12)$$

$$\gamma = \underbrace{\frac{R'}{2Z_L} + \frac{1}{2}G'Z_L}_{Re(\gamma)=\alpha} + \underbrace{j\omega\sqrt{L'C'}}_{Im(\gamma)=\beta} \quad (1.13)$$

Reemplazando y simplificando los parámetros del circuito en dos constantes, se obtiene que  $\alpha$  se incrementa con la frecuencia, el cual representa la atenuación, ver ecuación

(1.14). Esta relación puede ser proporcional a la raíz cuadrada de  $f$  para algunos conductores o proporcional a  $f$ , también puede ser una mezcla dependiendo del valor de las constantes  $k_1$  y  $k_2$ . Por medio de múltiples investigaciones y suposiciones físicas se puede simplificar como se observa en la ecuación (1.15).

$$\alpha = k_1\sqrt{f} + k_2f \quad (1.14)$$

$$\alpha(f) = a_0 + a_1f^k \quad (1.15)$$

Por lo tanto, seleccionando de forma adecuada  $a_0$ ,  $a_1$  y  $k$  la atenuación del canal PLT se resume en la ecuación (1.16), donde  $k$  se elige entre 0.5 y 1, valores pequeños indican la predominancia de las pérdidas por efecto piel;  $a_0$  aumenta las pérdidas por longitud y  $a_1$  representa el comportamiento pasa bajos del canal, a mayor  $a_1$  más notorio se vuelve este efecto.

$$A(f, d) = e^{-(a_0+a_1f^k)d} \quad (1.16)$$

Para obtener el factor de ponderación del canal, se debe obtener los posibles caminos entre el transmisor y el receptor, posteriormente el peso de cada uno de los caminos está dado por el producto de los coeficientes de transmisión y reflexión que componen cada uno de los segmentos del camino.

El número de caminos es infinito en caso de existir más de una rama conectada a la vía fundamental, por esta razón es necesario limitar la cantidad de caminos a tomar en cuenta. Proceso que puede ser realizado declarando un umbral o usando otro criterio, ejemplo: si un camino aporta menos del 10% de la potencia comparado con el camino principal ignorarlo no tendría mayores efectos en la simulación, por lo tanto el umbral en este caso es del 10%.

La demora o el retraso de la señal está dado por la ecuación (1.17), donde  $d$  es la longitud total que recorre la señal,  $c_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del aislante, es importante señalar que cada camino tiene un retraso diferente, el cual, al igual que el efecto multi-trayecto, depende de la longitud del camino.

16 Simulación del canal PLT in-home tomando en cuenta efectos estocásticos debidos a las cargas del sistema

---

$$\tau = \frac{d}{v_p} = \frac{d\sqrt{\epsilon_r}}{c_0} \quad (1.17)$$





## **2. Adición del comportamiento estocástico al modelo para distintos escenarios, variaciones a corto plazo y a término indefinido**

### **2.1 Componente estocástico del modelo.**

En orden de obtener un simulador del canal PLT más cercano a la realidad es imperativo considerar la naturaleza estocástica de la red eléctrica, procedimiento que exige la declaración de una variable aleatoria que represente la respuesta del canal como se mencionó en la sección 1.3. En consecuencia, se debe empezar por definir que comportamientos estocásticos se dan en el canal, los cuales se pueden clasificar principalmente en 3 tipos: topología, conexión o desconexión de los equipos y entre estos dispositivos, el tipo de carga.

El objetivo de este capítulo, es ampliar cada una de estas causas, presentar como se interrelacionan entre ellas y adicionarlas al modelo de Zimmermann, debido a que no es estocástico por sí mismo [58].

### **2.2 Variaciones por topología**

Se tratará brevemente las variaciones por topología debido a su importancia para la implementación de PLT y a la alta dependencia del modelo respecto a los posibles caminos que puede tomar la señal, aunque no sea objetivo de esta tesis.

Según [58], este es un modelo determinístico debido a que una vez obtenido los factores de ponderación para una topología este solo se puede aplicar a topologías similares. Además, para redes con una gran cantidad de ramas el cálculo de estos factores es muy complejo. Sin embargo utilizando algoritmos genéticos o de inteligencia artificial el cálculo

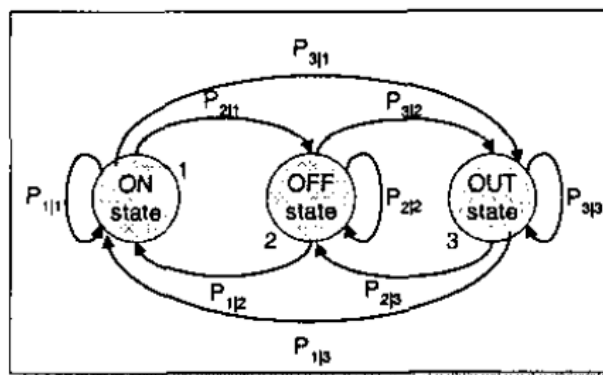
de las distintas trayectorias se simplifica aunque se requiere un conocimiento certero de la topología de la red, eliminando el factor estocástico debido a la topología.

## 2.3 Variaciones en períodos largos

La conexión, desconexión, encendido o apagado de dispositivos como duchas, planchas, televisores, hornos microondas, entre otros modifican la respuesta del canal de la red eléctrica. Estos cambios vistos por las señales usadas para las comunicaciones PLT son permanentes, permitiendo algún tipo de adaptación a la nueva respuesta por parte de los equipos que intervienen en la comunicación. La característica principal de estas variaciones es que la frecuencia con que ocurren los cambios está ligada a la actividad humana, dándole su naturaleza aleatoria.

El cambio de las cargas en tiempos largos se modela por medio de un proceso de markov con 2 estados, esto se debe a que en la mayoría de los casos basta con los estados encendido y apagado debido a la desconexión de la red provocada por el interruptor, este comportamiento es causado por la naturaleza exponencial entre la transición de estados. No obstante, existen cargas cuyo efecto sobre la red está ligado a 3 estados: desconectado, conectado pero apagado y conectado funcionando [62], la relación entre estos esta descrita en la Figura 2-1.

**Figura 2-1:** Diagrama de estados de las cargas [62].

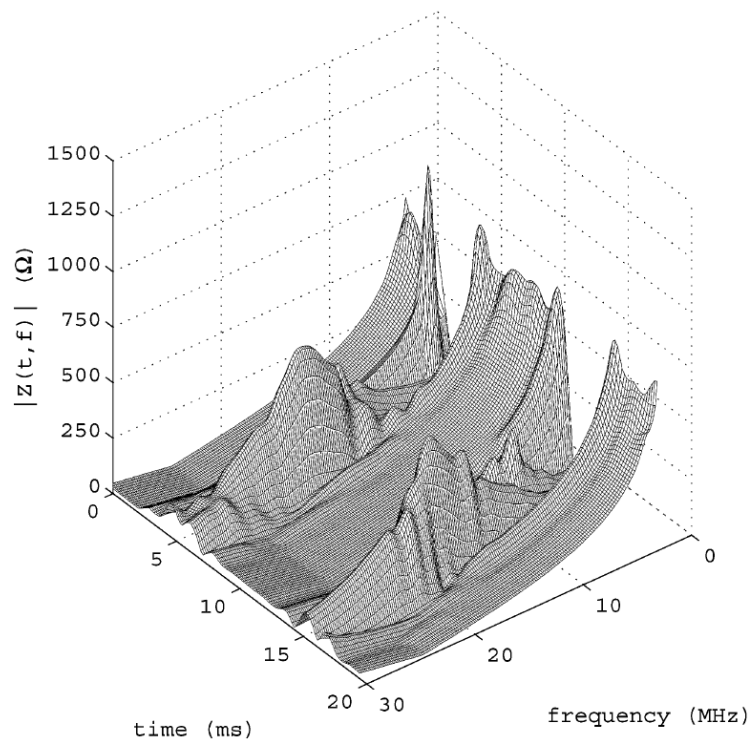




## 2.4 Variaciones en períodos cortos

Este efecto se debe a la respuesta en tiempo y frecuencia de la impedancia de entrada de las cargas de la red in-home y normalmente ocurren en tiempos comparables con la tasa de transmisión de la tecnología PLT. Por lo tanto, estas variaciones se pueden clasificar en tres tipos principales utilizando el comportamiento de estas cargas con respecto al tiempo. Primero, se encuentran las impedancias constantes respecto al tiempo y la frecuencia, típicamente tienen valores de  $5\Omega$ ,  $50\Omega$ ,  $150\Omega$ ,  $1000\Omega$  e infinito representando impedancias bajas, estándar RF, similares a la línea de transmisión, altas y circuito abierto. Segundo, Impedancias invariantes en el tiempo pero selectivas en frecuencia, un ejemplo de este tipo son los circuitos RLC. Por último, están las cargas variantes en el tiempo y selectivas en frecuencia, tales como dispositivos que utilizan rectificadores con diodos, SCR o mosfets [22], este comportamiento se puede observar en la Figura 2-2.

**Figura 2-2:** Impedancia variante en el tiempo de un dispositivo eléctrico [30].

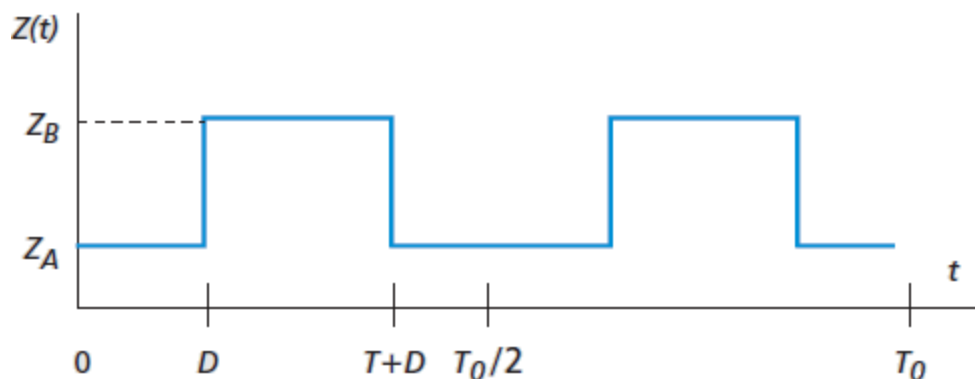


Para el segundo tipo, se puede describir el comportamiento de las cargas utilizando la ecuación (2.1), la cual puede ser obtenida por métodos de análisis de circuitos y usa 3 parámetros: R, resistencia en resonancia;  $\omega_0$ , frecuencia de resonancia angular; y Q, factor de calidad.

$$Z_{RLC}(\omega) = \frac{R}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (2.1)$$

El tercer grupo está dividido en 2 subgrupos: el primero representa aquellos dispositivos que conmuta entre 2 estados, ver Figura 2-3, como resultado se tienen 2 valores asociados, el cambio entre estados esta sincronizado con el periodo de la señal de energía de la red. En caso de requerir simplificar los cálculos se puede asumir un solo estado, esto es aplicable a cargas que rectifican con diodos, debido al corto tiempo que los diodos se encuentran en circuito abierto comparado con el periodo de la señal de energía.

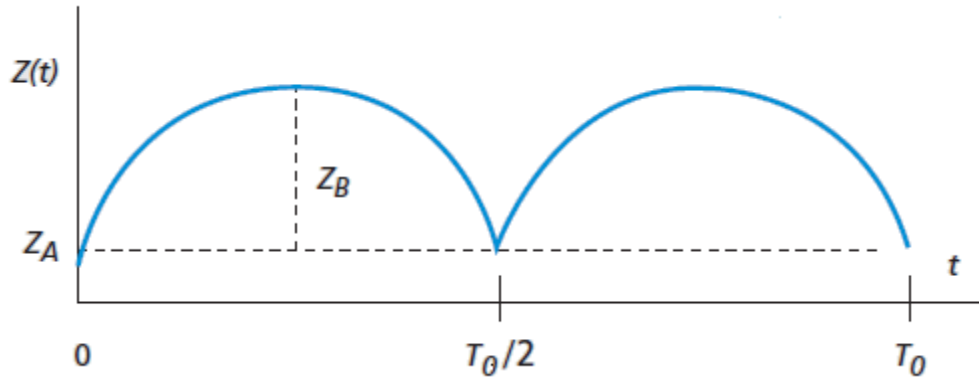
**Figura 2-3:** Caso conmutado [22].



El segundo subgrupo corresponde a aquellas cargas con una variación armónica, ver Figura 2-4, es decir su valor depende del voltaje instantáneo de la señal de energía, la cual es modelada en (2.2). Los parámetros que componen este modelo están son:  $Z_A$ , la cual es una impedancia que es constante en todo el tiempo;  $Z_B$  representa la amplitud de la variación armónica; y  $\theta$ , muestra el desfase o la diferencia de la variación con respecto al cruce por cero de la señal fundamental. Comúnmente los dispositivos que muestran este comportamiento son de tamaño pequeño. Obsérvese que este modelo concuerda con el comportamiento visto en la Figura 2-2, cuando se analiza a una frecuencia determinada variando el tiempo.

$$Z(\omega, t) = Z_A(\omega) + Z_B(\omega)|\sin(2\pi f_m t + \theta)| \quad (2.2)$$

**Figura 2-4:** Caso armónico [22].



## 2.5 Adición estocástica

Analizando la composición del modelo de Zimmermann, se puede observar que los efectos que tienen las cargas sobre la respuesta del sistema se dan sobre el factor de ponderación debido a la definición de los factores de reflexión y trasmisión, ver ecuaciones (2.3) y (2.4). Los otros 2 factores no se ven afectados ya que dependen de parámetros o de la distancia ligada al camino que se esté utilizando y estos son independientes de las cargas.

$$r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.3)$$

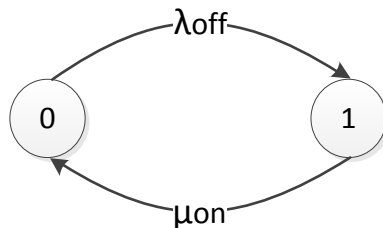
$$t = 1 - |r| \quad (2.4)$$

Aunque el punto de partida sea el comportamiento de la carga su efecto se puede tratar con mayor facilidad utilizando el factor de reflexión, esto se debe a la disminución de transformaciones de variables necesaria, es decir si se utiliza la carga tendremos una transformación donde la variable aleatoria se somete al cociente de una resta y una suma de la variable en si misma con una constante, ahorrando recursos y simplificando los cálculos.

Adicionalmente se sabe que el comportamiento de las cargas está dado por una cadena de markov, para el caso de esta tesis se utilizarán solo 2 estados debido a que comúnmente las personas no desconectan los equipos cuando los apagan, por lo tanto

este proceso esta es una distribución de Poisson truncada donde los tiempos de transición están dados por el tiempo promedio que la carga este encendida o apagada, lo cual se expresa en la Figura 2-5.

**Figura 2-5:** Estados de la carga



Si se define a la variable  $n$  como el valor del estado y al factor de reflexión como una función de  $n$ , frecuencia y tiempo obtenemos la ecuación (2.5), donde  $Z_{ON}$  representa la impedancia que tiene la carga cuando está encendida, la cual a su vez está determinada por el tipo de carga. Para el desarrollo de esta tesis se tomará la impedancia que tienen los dispositivos cuando están apagados y desconectados como un circuito abierto, es decir un coeficiente de valor 1, sin embargo si existen datos sobre este estado basta con cambiar el valor del coeficiente de reflexión utilizando la impedancia en apagado.

$$r(f, t, n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n = 0 \\ \frac{Z(f, t)_{ON} - Z_0}{Z(f, t)_{ON} + Z_0} & \text{if } n = 1 \end{cases} \quad (2.5)$$

Cada estado tiene una probabilidad dada por la ecuación (2.6) [63].

$$P_n = \frac{\frac{1}{n!} \left( \frac{\lambda_{off}}{\mu_{on}} \right)^n}{\sum_{k=0}^1 \frac{1}{k!} \left( \frac{\lambda_{off}}{\mu_{on}} \right)^k} \quad (2.6)$$

Definiendo así la variable aleatoria asociada al coeficiente de reflexión, mientras el factor de transmisión es una transformación del mismo. En el caso de la aplicación completa del modelo de Zimmermann, la transformación ocurre de manera más compleja, por esta razón es difícil declarar una función de probabilidad generalizada, lo cual no está contemplado dentro de este trabajo. Sin embargo, utilizando herramientas

computacionales se puede suplir esta necesidad, otra opción es hacer uso de una distribución lambda generalizada [64] con parámetros obtenidos a partir de medidas o simulaciones.

Posteriormente si se desea conocer el valor esperado de la respuesta del canal, se aplica la definición de valor esperado al modelo de Zimmermann, en (2.7) se realiza este proceso donde “at” y “de” representan los factores de atenuación y retardo respectivamente, gracias a que el valor esperado es un operador lineal este se puede aplicar directamente al termino interno de la sumatoria. Como fue mencionado anteriormente at y de no se ven afectados por las cargas, de hecho no tienen variación de tipo probabilística y por lo tanto se observan como constantes (2.8).

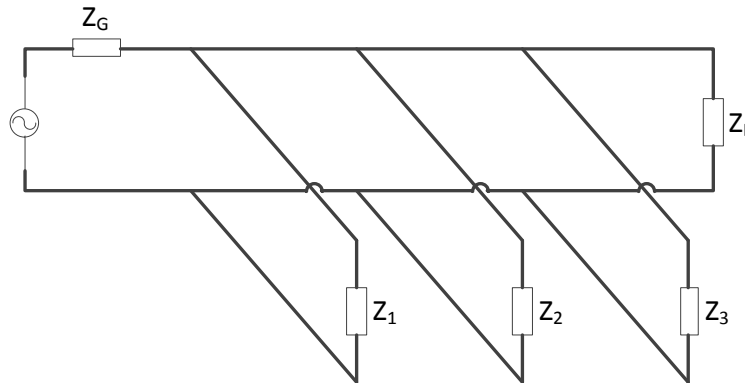
$$E(H(f, t)) = \sum_{i=1}^N E(g_i(f, t)at_i de_i) \quad (2.7)$$

$$E(H(f, t)) = \sum_{i=1}^N E(g_i(f, t))at_i de_i \quad (2.8)$$

Esto reduce el problema a calcular el valor esperado del factor de ponderación, para este fin se debe tomar en cuenta que cada uno de los coeficientes de reflexión que observa la red eléctrica son independientes ya que se deben a su carga correspondiente. Para soportar esta última condición es necesario que cada nodo tenga máximo conectada una carga, caso contrario el coeficiente de reflexión debe tomar en cuenta el paralelo de todas las impedancias conectadas y no se podría utilizar esta definición de variable aleatoria.

En el caso de tener un tomacorriente, las dos tomas deben estar separados como nodos conectados entre sí por un cable, esta distancia no genera atenuación pero si desfase. Por lo tanto las topologías resultantes tendrán una forma similar a la mostrada en la Figura 2-6.

**Figura 2-6:** Ejemplo ubicación de las cargas y topología esperada



Se procede a aplicar la definición de valor esperado de una función de un vector de variables aleatorias [65], se utiliza la opción discreta ya que la función de distribución de probabilidad de los coeficientes tiene esta naturaleza (2.9). El vector de variables aleatorias está compuesto por cada uno de los coeficientes debido a las cargas y la función de distribución conjunta del vector resulta de la multiplicación de las distribuciones de cada carga debido a la independencia en el comportamiento de las mismas.

$$E(g_i(f, t)) = \sum_{\Gamma_i} \sum_{\Gamma_{i-1}} \cdots \sum_{\Gamma_1} g_i(\Gamma_i, \Gamma_{i-1}, \dots, \Gamma_1) * f_{\Gamma_i, \Gamma_{i-1}, \dots, \Gamma_1}(\Gamma_i, \Gamma_{i-1}, \dots, \Gamma_1) \quad (2.9)$$

Adición del comportamiento estocástico al modelo para distintos escenarios,27  
variaciones a corto plazo y a término indefinido

---





## **3. Diseño e implementación del simulador del modelo por computador**

El objetivo de este capítulo es mostrar el diseño y la implementación de un simulador del canal de Zimmermann con efectos estocásticos debido a las cargas, aplicado al ambiente in-home. Primero, se explicará la selección de la herramienta de software a utilizar; segundo, la estructura de datos que se utilizó; y tercero, se expondrá el diseño del algoritmo para realizar la simulación.

### **3.1 Herramienta de software para el simulador**

En lo que respecta a las simulaciones de canal PLT existen una serie de herramientas de software y lenguajes de programación comúnmente utilizados, tales como: C, Visual Basic, MATLAB (SIMULINK), NS2 y SPICE, entre otros. Cuya selección, como se mencionó en 1.4, normalmente está ligada al tipo de modelo que planea simular, para el caso del modelo de Zimmermann, las simulaciones son realizadas frecuentemente en MATLAB [52,39], mientras otros no especifican la herramienta utilizada [50,51].

Para el caso del desarrollo de esta tesis, se consideró importante que la herramienta tenga funciones enfocadas al manejo de funciones de transferencia y matrices. Además, tomando en cuenta la ampliación a futuro de este simulador a capas superiores del modelo OSI, la capacidad de generar u obtener bloques de comunicaciones preexistentes también se tomó como un criterio de selección. Adicionalmente se consideró la experiencia recolectada por trabajos anteriores [39,51,50,52] en el tratamiento del modelo de Zimmermann.

**Tabla 3-1:** Ponderación de criterios para selección de la herramienta.

Criterio	Ponderación	Calificación				
		C	NS2	SPICE	MATLAB	Visual basic
Matrices y funciones de transferencia	70%	4	4	2	5	3
Bloques de comunicación	10%	3	5	0	5	2
Uso en trabajos anteriores	20%	0	0	0	5	0
total	100%	3.1	3.3	1.4	5	2.3

Con el objetivo de seleccionar la herramienta de la manera más justa posible, se utilizó una matriz de ponderación (Tabla 3-1: Ponderación de criterios para selección de la herramienta.), Donde los porcentajes se valoraron de acuerdo con la importancia que tienen en el desarrollo del simulador, mientras las calificaciones se dieron de acuerdo a la experiencia manejando cada una de estas herramientas para conseguir los resultados esperados de los criterios 1 y 2, matrices y bloques respectivamente, utilizando una escala cualitativa (Tabla 3-2).

**Tabla 3-2:** Escala de valores criterios 1 y 2.

Valor	Resultado
5	Manejo sencillo con múltiples opciones
4	Manejo sencillo pero restrictivo en las opciones que ofrece
3	Tiene y se puede modificar o se puede crear
2	Su manejo es bueno pero es transparente y no se puede modificar
1	El manejo es difícil
0	No tiene

Para el criterio 3, se determina si la herramienta ha sido usada para simular el modelo de Zimmermann. En conclusión se obtiene que MATLAB sea la herramienta a utilizar.

## 3.2 Estructura de datos

Para el desarrollo de este simulador se planeó partir de la topología con el objetivo de eliminar el efecto estocástico debido a la forma de la red, entonces es necesario declarar una estructura de datos que permita representar las características de la red, como distancias, calibre, cargas, etc. Por otro lado se requirió otras estructuras para el desarrollo del algoritmo en cada una de sus etapas.

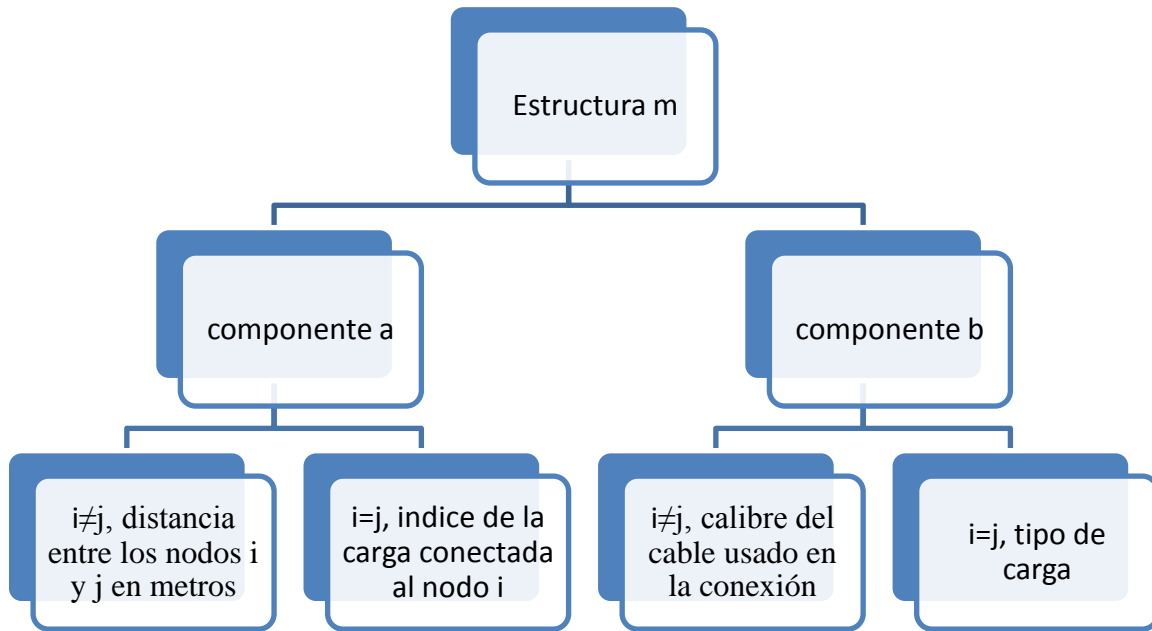
### 3.2.1 Representación de la red eléctrica

El modelo de Zimmermann requiere conocer las distancias existente en la red, además la información referente a los tomacorrientes existentes y si estos tienen cargas conectadas y que tipo son, también los valores para calcular los coeficientes de reflexión y la posibilidad de agregar nuevos datos sin modificar el algoritmo.

Tomando lo anterior en cuenta, se utilizó una estructura con forma de matriz para representar la conexión entre nodos, se puede simplificar en 2 matrices, una encargada de almacenar la distancia entre nodos, se asignó el valor cero para representar desconexión, esta matriz recibe el nombre de componente a; la otra tiene los datos acerca del calibre de la conexión en las intersecciones de la fila  $i$  y la columna  $j$  desde que ambas variables sean diferentes y se le denomina como componente b.

En las intersecciones  $i, i$ , es decir cuando ambos índices son iguales, algunos datos referentes a las cargas son guardados. En el componente a, se encuentra el índice de carga, donde un valor de cero representa circuito abierto, en el otro componente se guarda información relevante al tipo de carga conectada, en la Figura 3-1 se puede observar de manera más clara como se representa la red (este tema se explicara a profundidad en la sección 3.2.2).

**Figura 3-1:** Estructura de la representación de la red eléctrica.



Si es necesario adicionar más datos se pueden utilizar más componentes, por ejemplo para agregar fuentes de ruido. Con el objetivo de poner en claro esta estructura y como se aplica, se realizó un ejemplo: se tiene una red con una topología como la que se muestra en la Figura 3-2, donde los nodos están representados en azul, las cargas en negro y las distancias en rojo se obtendría una representación matricial como la que se observa en la Figura 3-3.

**Figura 3-2:** Red con una rama.



**Figura 3-3:** Representación matricial, componentes a y b respectivamente.

1	10	0	0	1	16	0	0
10	0	4	2	16	0	16	16
0	4	2	0	0	16	1	0
0	2	0	0	0	16	0	0
(a)				(b)			

### 3.2.2 Estructura para las cargas

Debido a los cuatro tipos de cargas y los diferentes parámetros que conllevan se requiere una representación eficiente y fácil de manipular para el usuario. Utilizando el tipo de carga se pueden establecer 4 combinaciones de parámetros (Tabla 3-3), es decir se requiere una matriz indexada por medio del índice de carga. Tanto el índice como el tipo de carga se almacenan en la topología pero los parámetros de cada carga se almacenaran en una matriz denominada “cargas”.

**Tabla 3-3:** Relación entre tipo de carga y sus parámetros.

Tipo	Descripción	Parámetros			
1	Constante	Valor			
2	Invariante RLC	Resistencia	Factor calidad	de Frecuencia natural	
3	Conmutado	Valor 1	Valor 2	Ciclo útil	
4	Armónico	Resistencia	Factor calidad	de Frecuencia natural	Valor constante

Sin embargo, para el manejo en MATLAB es ideal tener todos los parámetros en una sola variable que pueda ser evaluada respecto a la frecuencia y el tiempo, afortunadamente esto puede ser logrado usando las variables simbólicas, las cuales se almacenan en el vector z.

Adicionalmente se requiere almacenar los tiempos promedio en horas, en los cuales las cargas se encuentran encendidas o apagadas, con este fin estos datos se almacenaran en una matriz denominada tiempo, donde la columna 1 almacena el tiempo de encendido

mientras tanto el de apagado va en la columna 2 utilizando el índice de carga para organizar los datos.

Por otro lado, la impedancia característica de cada trayecto es importante para el cálculo de los parámetros del modelo, pero estos datos no están estandarizados por lo tanto en vez de insertar ese dato en la representación de la red se destinó una matriz denominada “carac” para almacenar la impedancia característica relacionada al calibre del cable utilizado. En [22] se presentan algunos de estos datos medidos relacionados al área transversal del cable (ver Tabla 3-4) los cuales se utilizaran para realizar las pruebas de este simulador, sin embargo si existen medidas previas realizadas o un análisis teórico del cual se obtengan datos distintos a los presentados se pueden introducir en “carac”.

**Tabla 3-4:** Características de cables típicamente utilizados en redes in-home [22]

Tipo de cable	0	1	2	3	4
Sección mm <sup>2</sup>	1.5	2.5	4	6	10
$\epsilon_{eq}$	1.45	1.52	1.56	1.73	2
$Z_0(\Omega)$	270	234	209	178	143
C(pF/m)	15	17.5	20	25	33
L( $\mu$ H/m)	1.08	0.96	0.87	0.78	0.68
$R_0$	12	9.34	7.55	6.55	4.98
$G_0$	30.9	34.7	38.4	42.5	49.3

### 3.2.3 Estructura para el algoritmo genético

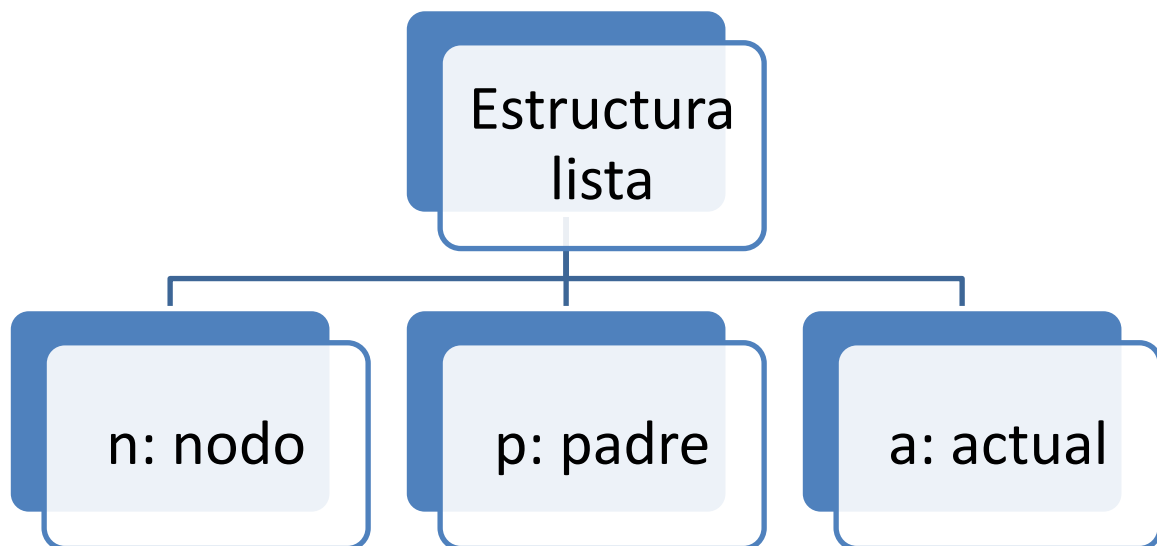
Debido a la necesidad de hallar varios caminos diferentes entre los nodos en comunicación se utilizó una estructura de datos común en la solución de problemas de enrutamiento [66], como son los árboles, específicamente las listas espagueti por las ventajas que representan para algoritmos de enrutamiento [67]. Por lo tanto el nodo donde se encuentra el emisor será la raíz del árbol y las hojas guardaran la trayectoria del mismo.

La lista espagueti se puede explicar como un árbol donde cada hoja (estructura o clase almacenada) tiene solo un apuntador que está dirigido a su respectivo padre, es decir

que desde cualquier hoja se puede rastrear la trayectoria siguiendo los apuntadores “padre”. Sin embargo, MATLAB no tiene apuntadores de ningún tipo [68], es decir que la forma tradicional como se tratan estos tipos de estructura de datos en leguajes como C no funciona, esto es debido a que los apuntadores almacenan una posición de memoria pero no datos y MATLAB no permite almacenar posiciones de memoria.

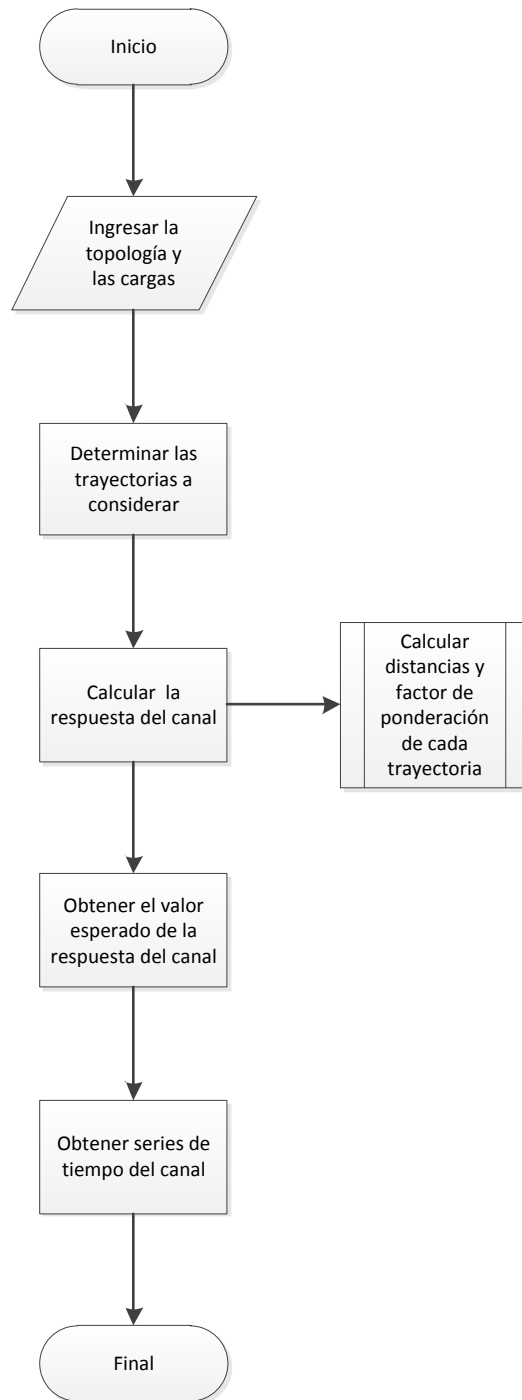
Para solucionar este problema se estableció una estructura como la mostrada en la Figura 3-4, para que esta estructura sea considerada una lista espagueti se necesita una forma de encontrar el padre de cada nodo, por lo tanto se utilizó el orden en que las hojas son adicionadas al árbol guardando el número del padre y el número con el que se adicionan, llamado componente a o actual, en p se almacena el actual del padre y n contiene la información del nodo sobre el que se está trabajando.

**Figura 3-4:** Composición del dato lista



### 3.3 Diseño del algoritmo

Figura 3-5: Representación general del algoritmo utilizado para realizar la simulación.



El simulador requiere una serie de pasos para determinar la respuesta del canal, los cuales están determinados por la estructura del modelo. Primero, se espera que el



usuario ingrese la topología utilizando la estructura explicada anteriormente. Segundo, se determinan los caminos diferentes que puede tomar la señal entre los nodos donde se realiza la comunicación. Tercero, utilizando las trayectorias, los datos de las cargas conectadas y el calibre del cable para determinar el valor esperado de la respuesta. Por último, realizar simulaciones que muestren la variación del canal con el tiempo. El algoritmo en general está resumido en la Figura 3-5.

### 3.3.1 Búsqueda de las trayectorias

Existen múltiples algoritmos para buscar trayectorias entre 2 puntos teniendo en cuenta una función de costo, específicamente la ruta más corta es uno de los que ha sido tratado ampliamente. Sin embargo la aplicación del modelo de Zimmermann tiene como requisito encontrar los diferentes caminos posibles, para realizar esto se requiere un algoritmo que sea capaz de rastrear la trayectoria utilizando variaciones de la misma.

Se optó por utilizar una búsqueda por cola, un tipo de estructura de dato bastante conocido, sobre un árbol tipo lista espagueti. Este tipo de algoritmo se basa en 2 partes, una función generadora de hijos y el uso de una cola para almacenar los nodos, la cual da el nombre al algoritmo. Debido a que la parte general del algoritmo es la cola, el uso de la misma se va a explicar primero.

Una cola funciona bajo el precepto FIFO, primero que entra es el primero que sale, y la búsqueda se realiza introduciendo las hojas del árbol en una cola. Inicialmente se introduce la raíz, luego esta se extrae, se crean los hijos de la raíz y estos se vuelven a introducir en la cola, luego se guarda la raíz en otra cola; este procedimiento se repite para cada una de las hojas del árbol hasta que se encuentre la hoja que se considere como éxito. También puede ser realizado con pilas pero el crecimiento del árbol es diferente y por lo tanto el consumo de memoria dependiendo del problema.

La diferencia antes mencionada es más clara tomando en cuenta el nivel o profundidad del nodo dentro del árbol, por ejemplo: la raíz tiene nivel 1, sus hijos nivel 2, los hijos de los hijos nivel 3 y así sucesivamente. Cuando se utiliza una pila, el dato que se obtiene para generar los hijos es el último ingresado, es decir que la función generadora trabaja sobre hojas a un nivel mayor comparado con la anterior, esto hace que el árbol crezca

rápidamente en profundidad. En el caso de las colas, la función generadora trabaja primero sobre los nodos de un mismo nivel antes de continuar con el siguiente nivel haciendo el árbol más ancho. Para finalizar la búsqueda es importante definir un criterio bajo el cual una o varias hojas sean consideradas éxitos, en este algoritmo es que el componente  $n$  sea el nodo donde se encuentra el receptor.

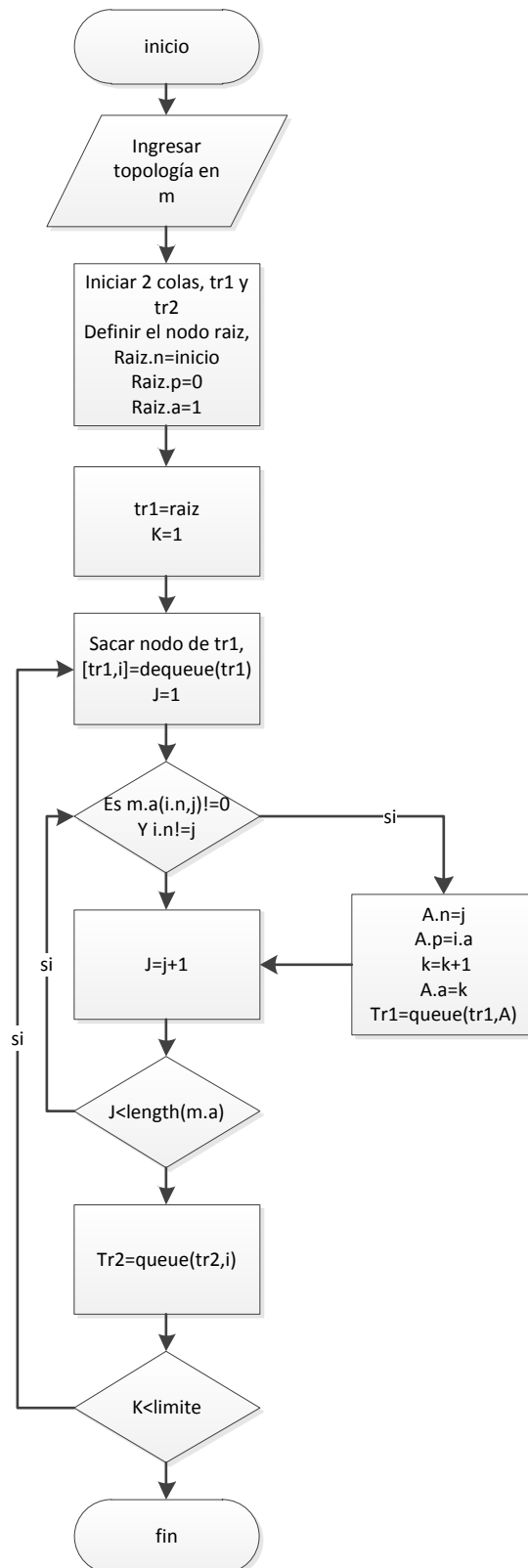
Además se necesita algo que limite el crecimiento del árbol como determinar casos en los cuales ya no es viable que una hoja tenga más hijos, ya que para el caso de las trayectorias hay infinitos resultados posibles y no todos son útiles o importantes para la simulación, Siendo esto responsabilidad de la función generadora. Por lo tanto se proponen 3 criterios posibles, primero limitar el número de nodos del árbol, poco práctico pero fácil de implementar para pruebas iniciales; Encontrar el camino con el mayor factor de ponderación basándose en el valor esperado del factor de reflexión debido a las cargas conectadas, este es un buen punto de partida para eliminar caminos que tengan un aporte pequeño comparado con el mayor factor presente; Utilizando la distancia entre los puntos, ya que este se encuentra relacionado con la porción de la señal que llega en debido al factor de atenuación; se pueden considerar otros si se requiere.

La función generadora utiliza el dato almacenado en el componente  $n$  para observar que otros nodos tienen conexión con el mismo en el componente  $a$  de la matriz que representa la red eléctrica tomando en cuenta que las casillas diagonales almacenan los datos de la carga, es decir recorriendo la fila  $n$  y observando que casillas son diferentes de cero se encuentran las conexiones y así se generan los hijos, la adición de la condición expuesta anteriormente es parte importante de esta función. Una representación del algoritmo en diagrama de flujo con la primera condición se presenta en la Figura 3-6, al final se trasladan todos los datos de  $tr1$  a  $tr2$  para almacenar el árbol en una sola cola, las funciones “queue” y “dequeue” son el equivalente de “push” y “pop”, no obstante se les denominó así para que no entraran en conflicto con los datos pila.

Como se puede observar, la condición es interna a la función, por lo tanto si se cambia la condición la función cambia en sí. Nótese que al utilizar la búsqueda por cola se obtendrá la ruta más corta en lo que respecta cantidad de nodos visitados, a medida que se encuentren éxitos posteriores estos por obligación tendrán más nodos debido a la altura

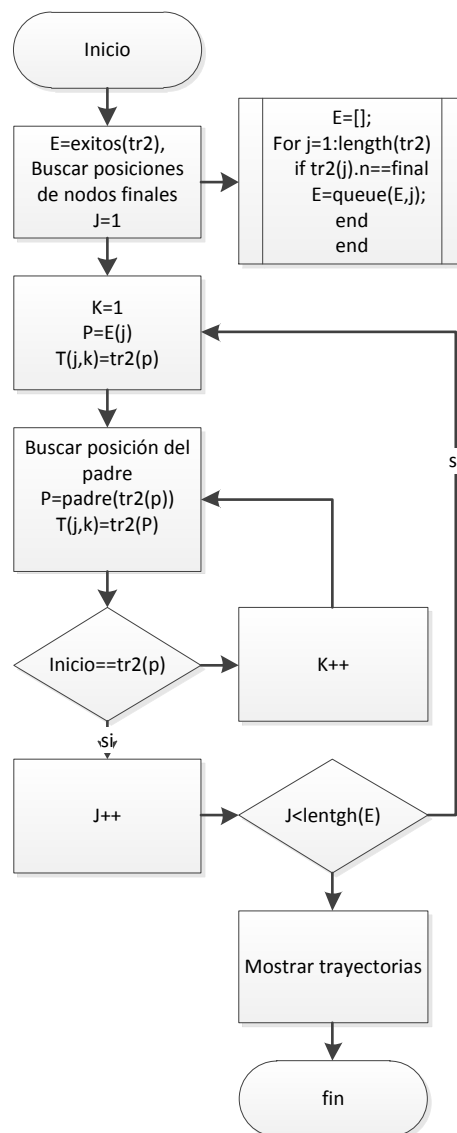
del árbol. Además, se toma en cuenta que la señal se puede reflejar en los nodos que se comunican.

Figura 3-6: Generador de árbol con límite de nodos



Posteriormente a la construcción del árbol, se debe buscar aquellas hojas cuyo valor almacenado en  $n$  es igual al nodo final, afortunadamente la implementación de colas y pilas en MATLAB parte de utilizar vectores, entonces se puede recorrer la cola como un vector y hallar los índices que son exitosos. Luego se puede utilizar la propiedad de la lista espagueti para encontrar la trayectoria mientras esta se va almacenando en una matriz para al final obtener todas las trayectorias exitosas. Esta parte del algoritmo se muestra en la Figura 3-7.

**Figura 3-7:** Algoritmo para encontrar trayectorias exitosas en el árbol.



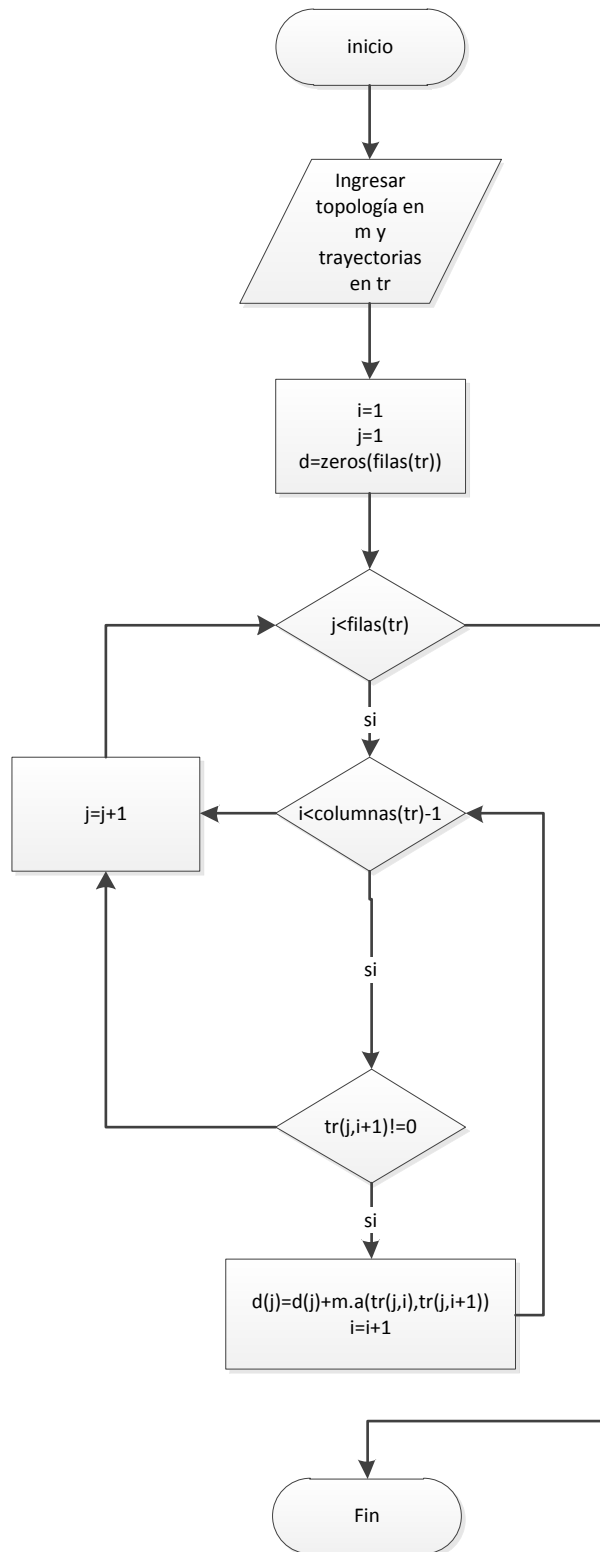
**Figura 3-8:** Resultado del algoritmo de búsqueda de trayectorias.

1	2	4	0	0	0	0	0	0
1	2	1	2	4	0	0	0	0
1	2	3	2	4	0	0	0	0
1	2	4	2	4	0	0	0	0
1	2	1	2	1	2	4	0	0
1	2	1	2	3	2	4	0	0
1	2	1	2	4	2	4	0	0
1	2	3	2	1	2	4	0	0
1	2	3	2	3	2	4	0	0
1	2	3	2	4	2	4	0	0
1	2	4	2	1	2	4	0	0
1	2	4	2	3	2	4	0	0
1	2	4	2	4	2	4	0	0
1	2	1	2	1	2	1	2	4
1	2	1	2	1	2	3	2	4
1	2	1	2	1	2	4	2	4
1	2	1	2	3	2	1	2	4
1	2	1	2	3	2	3	2	4
1	2	1	2	3	2	4	2	4
1	2	1	2	4	2	1	2	4

Finalmente se obtiene una matriz con una trayectoria exitosa por fila, para el caso que se utilizó de ejemplo en la sección 3.2.1, una topología con 4 nodos con inicio en 1 y final en 4 el resultado obtenido con un límite de 100 nodos se muestra en la Figura 3-8, como puede observarse este algoritmo proporciona un resultado satisfactorio, además se puede eliminar el árbol posteriormente para liberar memoria.

### 3.3.2 Cálculo de la distancias de cada trayectoria

El cálculo de la respuesta del canal requiere tener el valor de la distancia total que cada trayectoria tiene para los factores de atenuación y retardo. Utilizando la matriz resultante del algoritmo de búsqueda de trayectorias para obtener los datos indexados en la topología se puede resolver el problema de obtener la distancia total; se debe tomar 2 datos de cada fila de la matriz de trayectorias denominados  $i$  e  $i+1$ , luego se buscara la posición  $i$ ,  $i+1$  en el componente  $a$  de la representación de la red (donde se almacenan las distancias), la implementación de este procedimiento se expone en la Figura 3-9.

**Figura 3-9:** Algoritmo para obtener la distancia de cada trayectoria.

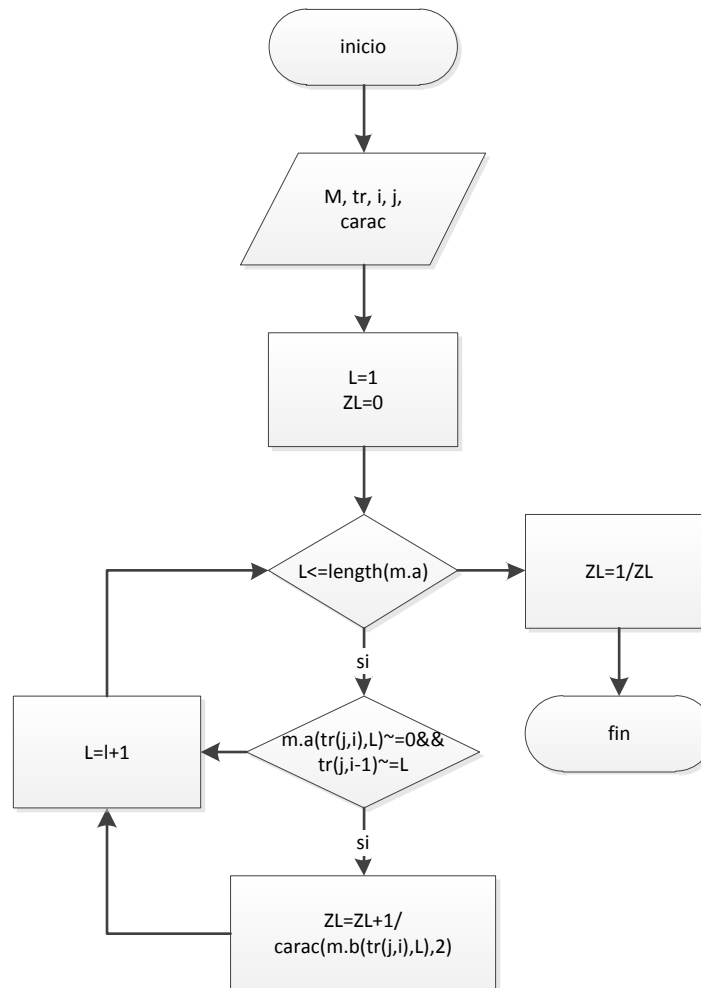
### 3.3.3 Algoritmo para calcular el factor de ponderación

El factor de ponderación de cada trayectoria se calcula por el producto de los coeficientes de reflexión y transmisión que se observan en una trayectoria dada, debido a la relación existente entre ambos el primer paso a llevar a cabo es el cálculo del coeficiente de reflexión. El cual a su vez requiere conocer la carga que es observada por el tramo de la red por el cual se desplaza la señal, posteriormente se requiere determinar si se requiere reflexión o transmisión.

Para el primer paso, se debe tomar en cuenta que los equipos PLT tienen una impedancia característica fija, es decir que existe una pérdida asociada debido a la reflexión causada por líneas desacopladas, debido a que la impedancia de los equipos no está relacionada en la matriz que representa la topología es necesario calcular estos coeficientes por aparte de aquellos que tienen cargas especificadas en la topología. El problema se divide en 2 casos distintos, nodos con o sin cargas conectadas, gracias a las especificaciones dadas en la sección 2.5 sobre la forma que debe tener la topología.

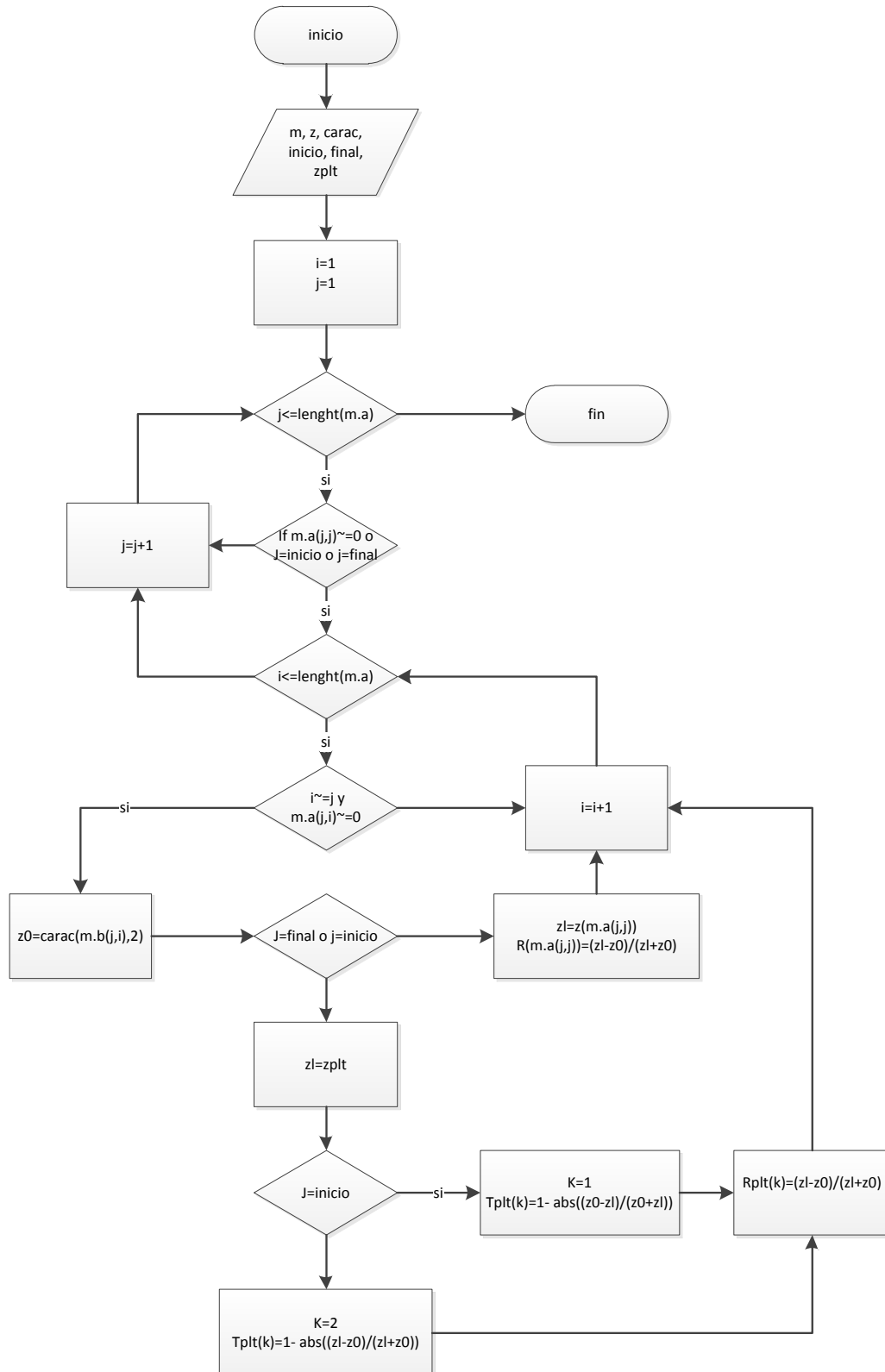
En el caso de nodos sin carga encontrados en una trayectoria dada, se computa la impedancia de carga que observa la conexión por la cual proviene la señal, este procedimiento se implementó bajo el nombre de "impcar" y su representación gráfica se muestra en la Figura 3-10. Este algoritmo requiere  $i$  y  $j$  los cuales representan la trayectoria y el índice de la misma sobre los que se requiere el cálculo, se busca en la matriz  $m$  los nodos que tienen conexión con  $tr(j,i)$  y se realiza el paralelo de las impedancias características conectadas excepto de  $tr(j,i-1)$  que representa el nodo del cual proviene la señal.



**Figura 3-10:** Cálculo de impedancia de carga para nodos sin cargas

La representación gráfica del algoritmo para calcular los coeficientes de reflexión debidos a las cargas conectadas se muestra en la Figura 3-11, adicionalmente se calcula la transmisión y reflexión de los nodos donde se conectan los transmisores PLT como caso especial. En caso de existir más equipos PLT se deben poner cargas de valor constante (50 ohms) en los nodos donde estén conectados. Para este fin se localizan los nodos que tienen cargas conectadas, comparando cada ítem de la diagonal de la matriz  $m$  con cero, luego se obtiene la impedancia característica de la conexión de la carga el calibre de la misma, entonces se aplica la definición del coeficiente de reflexión, esta función se denominó “refleimp”.

Figura 3-11: Cálculo de coeficientes de reflexión debidos a las cargas y equipos PLT

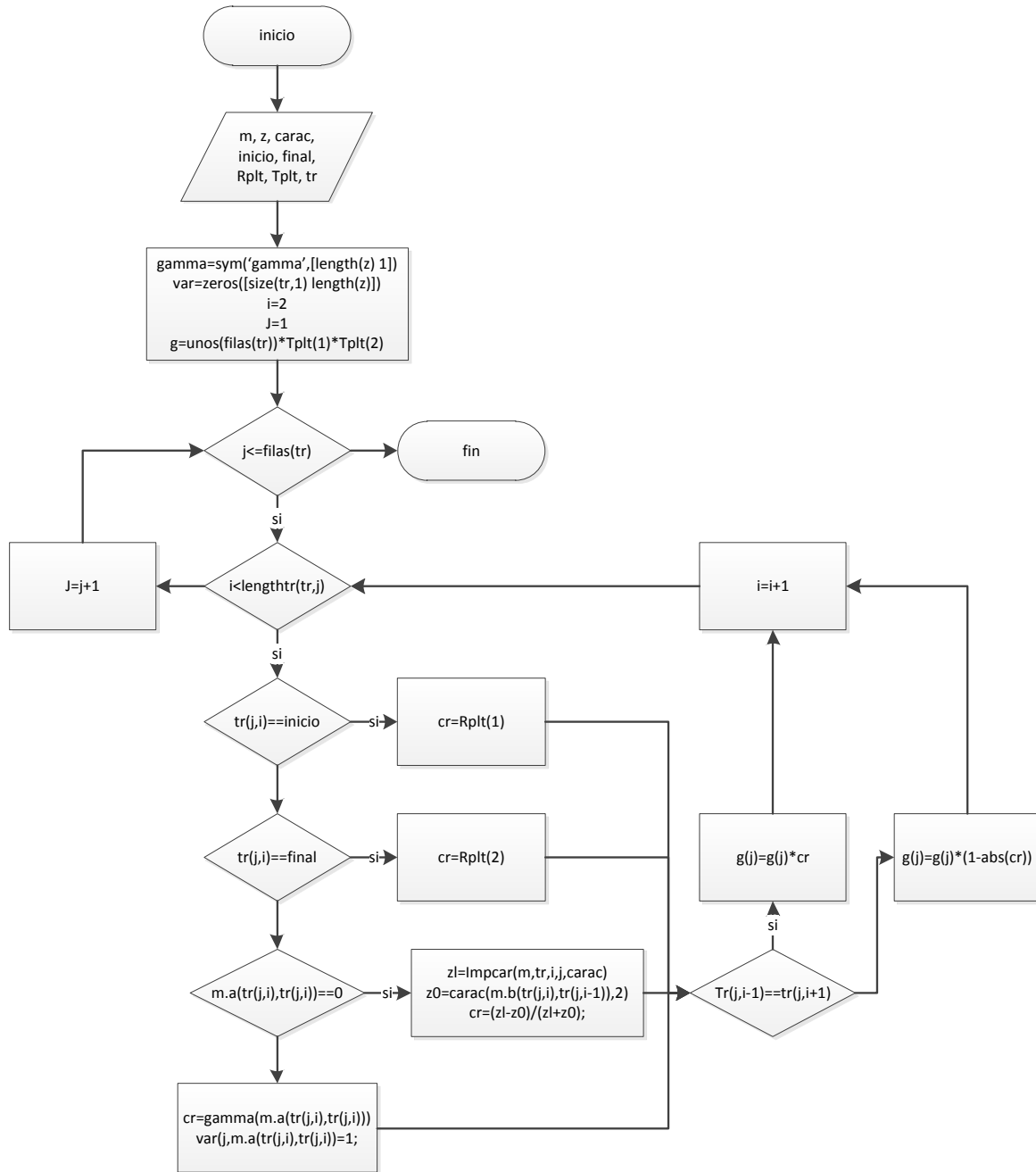


Con el fin de calcular el factor de ponderación de cada trayectoria y responder a la necesidad de simular series de tiempo o el valor esperado del canal se usara un vector de variables simbólicas que representarán el veto de variables aleatorias, mientras para los coeficientes vistos a medida que avanza la trayectoria son calculados con “impcar” obteniendo el paralelo de todas las impedancias características de los nodos conectados al tramo donde viene la señal.

Para determina si utilizar reflexión o transmisión se debe comparar el nodo del cual proviene la señal y a que nodo se dirige, si ambos son iguales se usara el primero sino el segundo, para aclarar esto si se observa cada trayectoria como un vector y nos encontramos sobre la posición  $i$ , se deben comparar las posiciones  $(i-1)$  y  $(i+1)$  para decidir que coeficiente utilizar.

El proceso en general se realiza mediante la función “facond”, su algoritmo se representa en la Figura 3-12, se utilizan los resultados de los algoritmos anteriores y produce como resultado el factor de ponderación con variables simbólicas ligadas al índice de carga y que variables fueron usadas en cada trayectoria (variable var). La función “lengthtr” determina la cantidad de nodos de la trayectoria  $j$ , ya que la señal puede ir al nodo final y reflejarse y volver gracias a la impedancia no acoplada de los equipos PLT, por lo tanto la trayectoria puede contener los nodos inicio y final repetidos. Posteriormente se puede reemplazar las variables simbólicas por los datos resultantes de “refleimp” o realizar otras operaciones según sea necesario.

Figura 3-12: Calculo de factor de ponderación a partir de variables aleatorias.



### 3.3.4 Valor esperado del canal

Este algoritmo tiene como objetivo aplicar la definición de valor esperado explicada en la ecuación (2.9) de la sección 2.5 y obtener una representación gráfica de la respuesta del canal. Este algoritmo requiere el cálculo de las probabilidades de cada uno de los estados de las cargas como primer paso, entonces se procede a hallar el valor esperado del coeficiente de ponderación de cada trayectoria el cual posteriormente es multiplicado por el factor de retardo, la atenuación por distancia es ignorada debido a que en ambientes in-home esta es despreciable, normalmente esta se empieza a tomar en cuenta para distancias mayores a 150 metros [34], por último se acumulan los resultados de cada trayectoria y se evalúan en un rango de frecuencias y tiempos de interés.

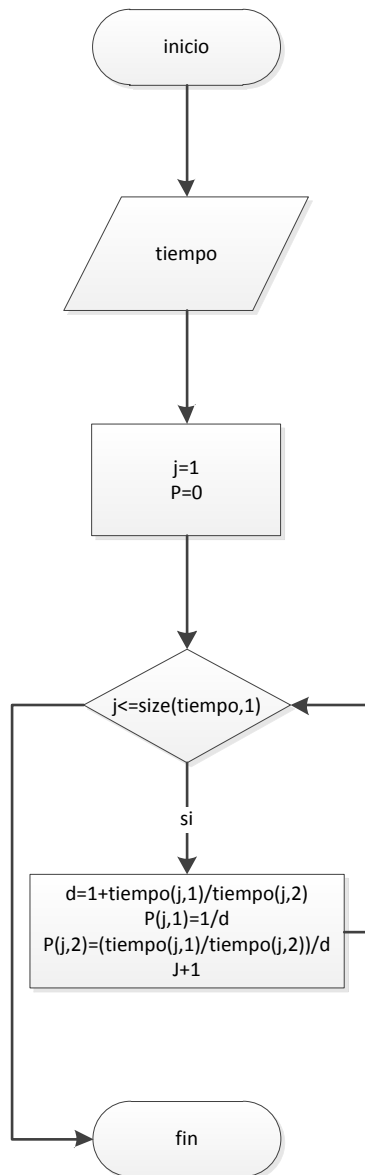
Las probabilidades se obtienen a partir de los tiempos de encendido y apagado almacenados en la matriz “tiempos” aplicando la ecuación (2.6), sin embargo para efectos de implementación del algoritmo se pueden realizar algunas simplificaciones para acelerar el cálculo:

- El denominador es constante para los estados.
- El estado cero tiene una probabilidad igual al inverso multiplicativo del denominador.
- El numerador del estado restante es la división del tiempo de apagado sobre el de encendido.

Aplicando estas operaciones, el algoritmo resultante requiere solo un ciclo para obtener los datos guardados en tiempo, ver Figura 3-13. En caso de considerarse más de 2 estados este procedimiento debe modificarse.

Es importante recordar que entre los resultados obtenidos en el cálculo del factor de ponderación, sección 3.3.3, se obtuvieron los coeficientes de reflexión causados por las cargas, estos valores pueden ser reemplazados en el factor de ponderación que esta expresado en términos del vector de variables aleatorias, así como el valor del coeficiente de reflexión debido a un circuito abierto.

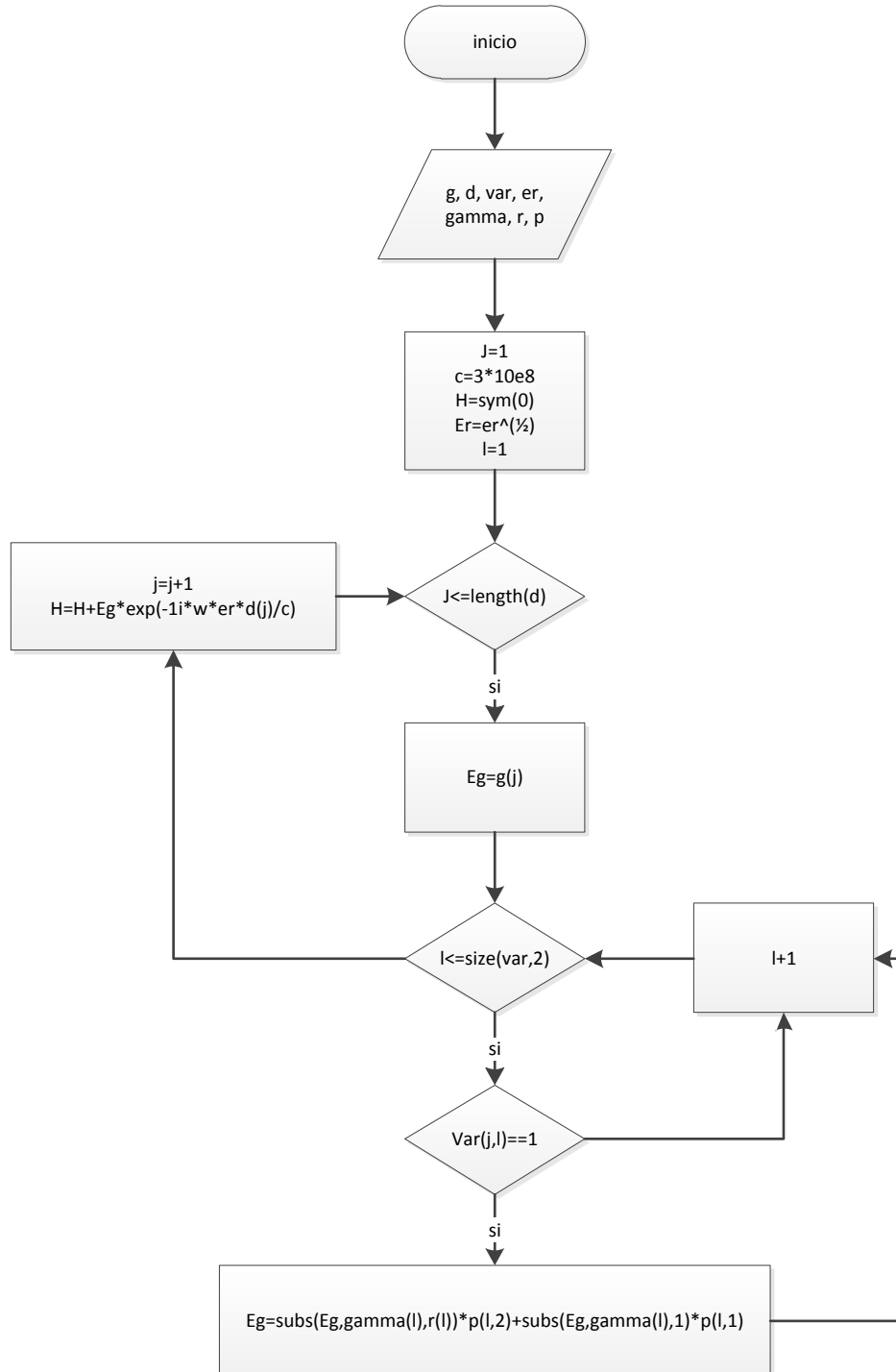
**Figura 3-13:** Cálculo de probabilidades



El valor esperado del factor de ponderación, la multiplicación por el factor de retardo y la acumulación de los resultados de cada trayectoria se realizan con el mismo algoritmo. Primero se carga en una variable “Eg” el coeficiente de ponderación de la trayectoria j, utilizando los datos almacenados en “var” se evalúan únicamente los coeficientes de reflexión que hacen parte del factor de ponderación, en caso de existir una dependencia, se evalúa “Eg” en los 2 posibles estados y se pondera cada uno por su probabilidad, posteriormente se acumula el resultado, el algoritmo se muestra en la Figura 3-14.

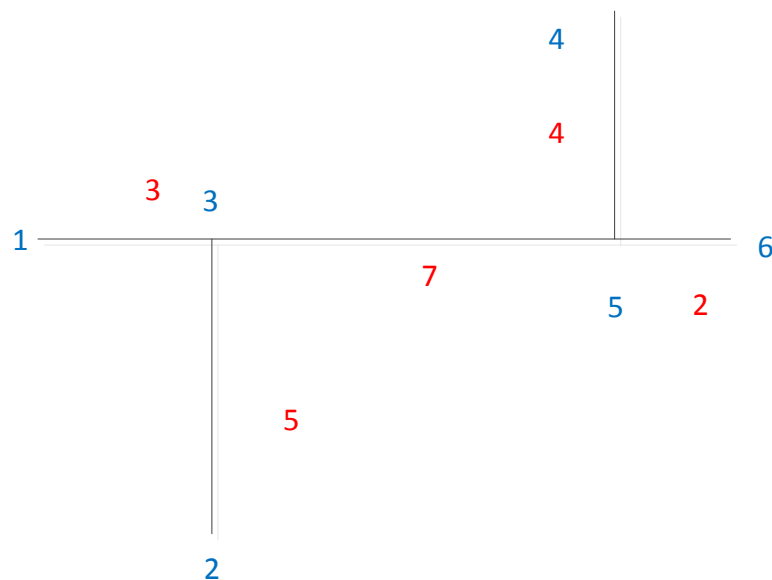
Finalmente se obtiene la expresión de la respuesta esperada del canal en función de la frecuencia y del tiempo.

**Figura 3-14:** Cálculo del valor esperado de la respuesta del canal.



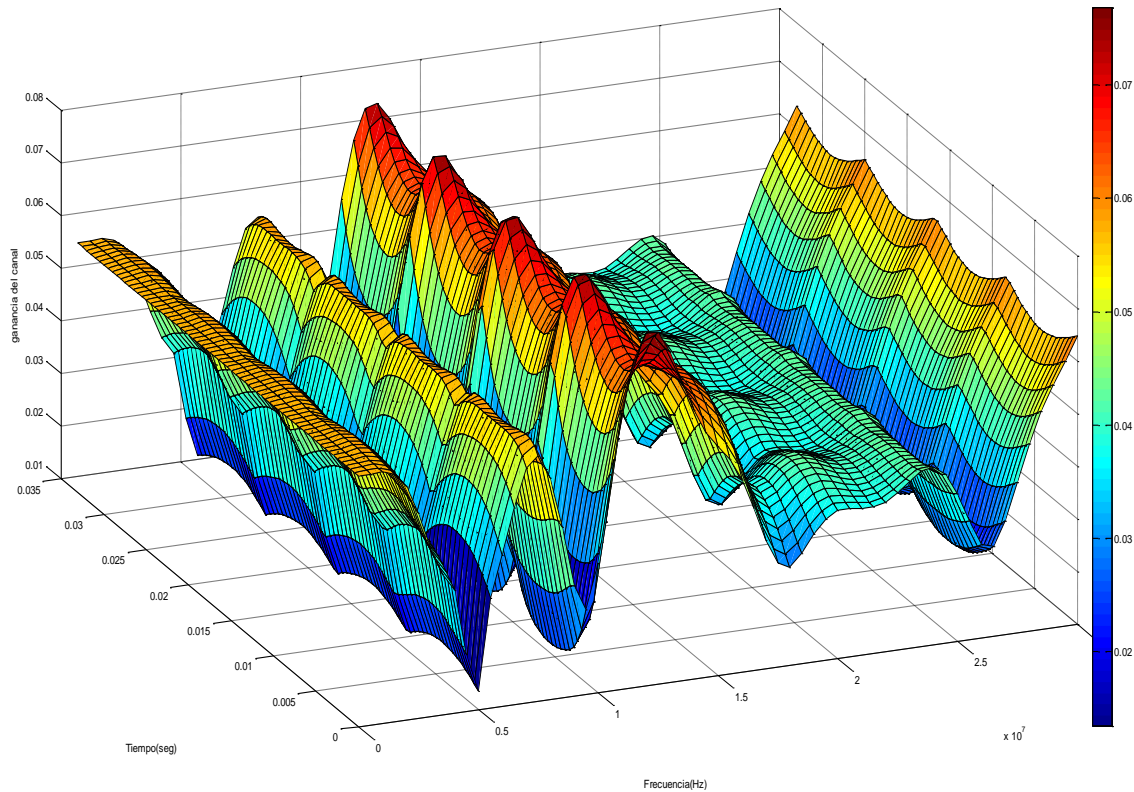
El proceso de evaluar la función resultante se realiza por medio de las funciones disponibles en MATLAB para tal fin en la "Symbolic Toolbox". Aunque el algoritmo se puede realizar por medio de ciclos, es poco recomendable debido a que se sujeta el proceso a una programación lineal y se desaprovecha la presencia de varios núcleos de procesamiento.

**Figura 3-15:** Topología de ejemplo



Se realizó un ejemplo con una topología de 6 nodos con 2 cargas conectadas de tipo 2 y 4 en los nodos 2 y 6, la topología se muestra en la Figura 3-15, las distancias entre nodos están en rojo mientras el número del nodo en azul y se evaluó la respuesta entre los nodos 1 y 4, ver Figura 3-16. Sobre la recomendación mencionada anteriormente, usando ciclos se obtuvo un tiempo promedio de simulación de 10 minutos, evadiendo su uso se consiguió 30 segundos utilizando 4 núcleos a máxima prioridad.



**Figura 3-16:** Vista 3D de la respuesta esperada entre nodos 1 y 4.

### 3.3.5 Series de tiempo

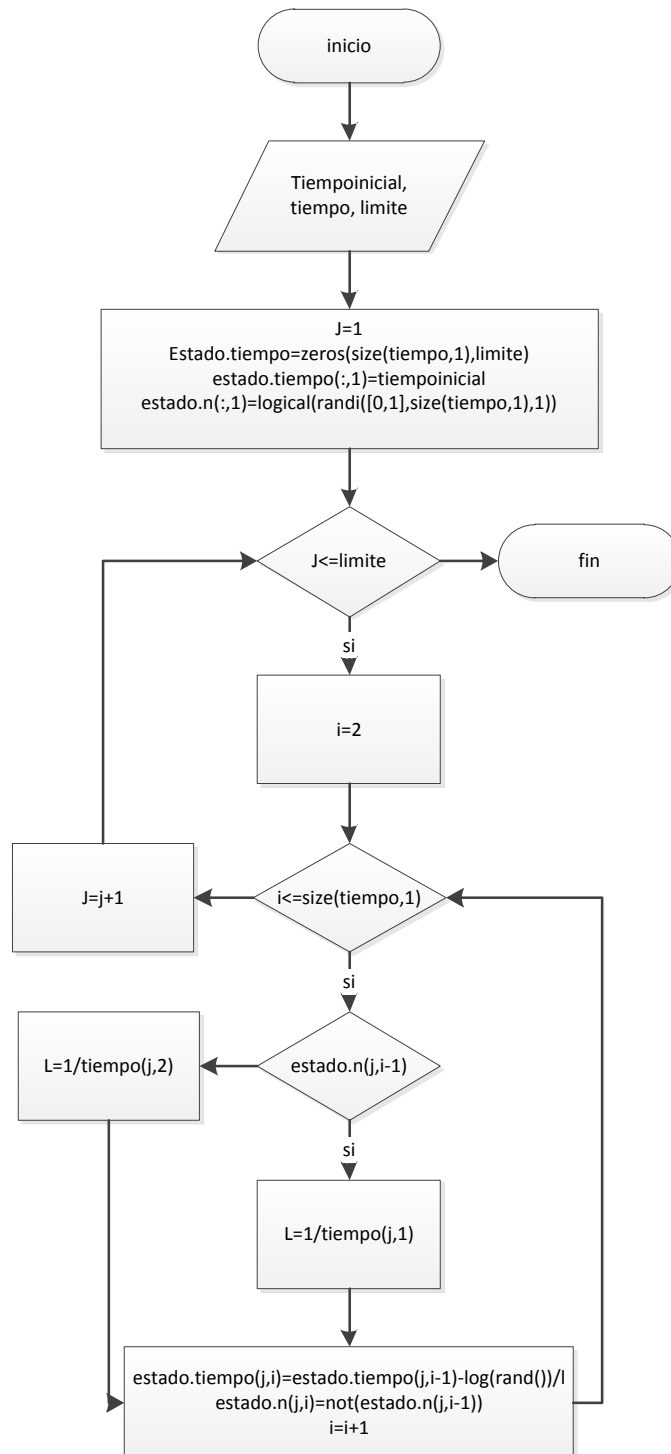
Esta sección se dedica a la realización del canal PLT por medio de las series de tiempos de las cargas tomando en cuenta el comportamiento descrito en la sección 2.5. Primero se presenta el algoritmo encargado de crear las series de tiempo para cada una de las cargas; segundo, se determinan los estados de las cargas dado un tiempo en el cual se piense obtener una simulación; tercero, se evalúa la respuesta del canal para ser graficada posteriormente.

$$t_i = t_{i-1} - \frac{1}{\lambda} \ln(U) \quad (3.1)$$

Para generar las series de tiempos de las cargas se utilizó la ecuación (3.1), donde conociendo el tiempo pasado  $t_{i-1}$  y la tasa de cambio del sistema  $\lambda$  se puede calcular el tiempo donde ocurrirá el siguiente cambio utilizando una variable con distribución uniforme entre cero y uno  $U$  [55]. En lo que respecta a la implementación en software se creó una función denominada "sgt" la cual retorna los tiempos en los que ocurren cambios y el estado en el cual queda la carga, 0 para apagado y 1 para encendido, se

debe tener en cuenta que las tasas de cambio entre los estados son distintas, para esto basta cambiar el  $\lambda$  de acuerdo al estado de la carga en  $t_{i-1}$ , la representación gráfica se muestra en la Figura 3-17.

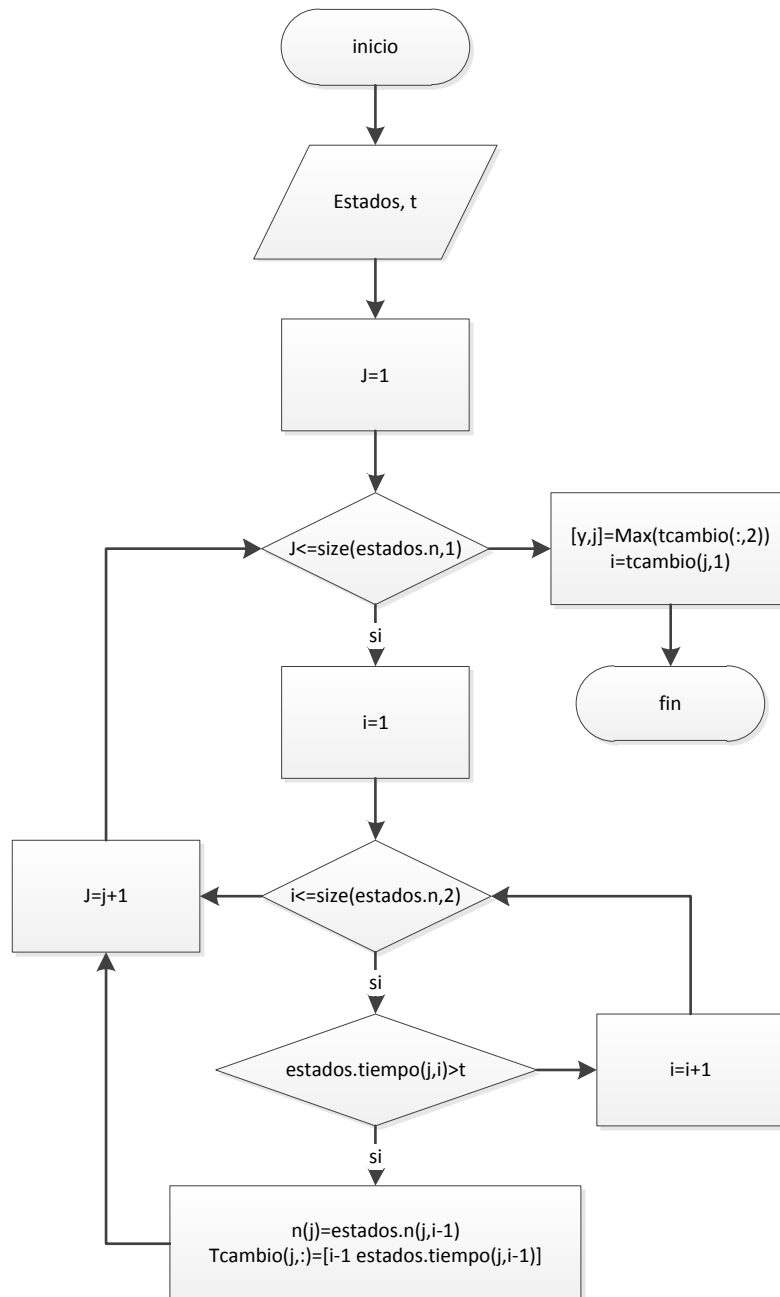
Figura 3-17: Función gst



Posteriormente, se especifica un tiempo en el cual se quiere evaluar el canal PLT y se revisan los resultados de la serie de tiempos para ello, los datos de interés son: en qué estado se encuentran las cargas y cuál es el tiempo donde ocurrió el último cambio por si

se requiere una simulación en la cual hay una transición. Primero se deben encontrar los tiempos más cercanos al cual se quiere evaluar, luego se toman los estados almacenados y estos se retornan, este procedimiento se muestra en la Figura 3-18.

**Figura 3-18:** Evaluación de los estados de las cargas en el tiempo t



Con la información anteriormente obtenida se procede a generar la respuesta del canal, función que es muy similar a la utilizada para encontrar el valor esperado del canal.

Básicamente se eliminan las probabilidades y se utiliza a  $n$  para determinar si el factor de reflexión está en función de la carga o si tiene un valor de 1, ver ecuación (2.5).



## **4. Validación de la simulación**

Validación es el proceso de determinar si una simulación de un modelo es una representación adecuada del sistema de acuerdo a los objetivos del estudio, esto incluye el modelo utilizado y a la simulación en sí. Es necesario diferenciar validación de verificación, donde la última se refiere a determinar si el modelo conceptual (suposiciones realizadas) ha sido traducido correctamente a un programa de computador, también se requiere distinguir entre validación y credibilidad, la cual significa que se acepta la simulación como correcta. Es importante realizar la validación por que le proporciona credibilidad a la simulación.

Este capítulo muestra la validación de la simulación del canal PLT in-home tomando en cuenta efectos estocásticos debidos a las cargas del sistema, se inicia explicando algunos tipos de validaciones que pueden llevarse a cabo, posteriormente la selección de los métodos es mostrada y finaliza con la aplicación de los mismos. Mientras en el caso de la verificación se realizará utilizando la técnica de desarrollo de subprogramas y corrigiendo los errores paso a paso. La información presentada en este capítulo sobre las técnicas de validación se encuentra en el capítulo 5 de [55].

### **4.1 Técnicas de validación**

Conceptualmente una simulación es válida si permite tomar las mismas decisiones que se tomarían si se tuvieran todos los datos del sistema o se pudiera experimentar con el mismo. Por esta razón existen una variedad de técnicas para validar que no se limitan únicamente a comparar los resultados del simulador con medidas realizadas.

#### **4.1.1 Recolectar información y datos del sistema de alta calidad**

En el desarrollo de una simulación, el analista de hacer uso de toda la información existente la cual se puede clasificar según su fuente en: conversaciones con expertos en

la materia, una simulación no se desarrolla de forma aislada, comúnmente es el resultado del trabajo de múltiples expertos y por lo tanto la información que estos suministran debe ser valorada ya sea por medio de artículos o conversaciones; observaciones del sistema, si existe un sistema similar entonces los datos pueden ser obtenidos de registros históricos o pueden ser recolectados durante el desarrollo del proyecto; teoría existente, dependiendo del sistema existe una teoría o varias que se ajustan a la necesidad de la simulación y ya tiene una aceptación previa; resultados relevantes de simulaciones similares; y por último la experiencia de los desarrolladores de la simulación, esta puede ser usada para intuir o realizar hipótesis sobre el funcionamiento del sistema.

#### **4.1.2 Mantener un documento con suposiciones y realizar una revisión estructurada**

Las suposiciones tomadas en cuenta para realizar la simulación deben estar documentadas de forma que puedan ser entendidas por múltiples disciplinas, debe llevar: un resumen de las metas de la simulación, los problemas específicos a solucionar y las medidas que se pueden usar para evaluar la simulación en sí; descripciones detalladas de cada uno de los subsistemas en un formato fácil de entender y revisar; que simplificaciones fueron realizadas y porque, se debe recordar que la simulación de un sistema está basada en un modelo que es una simplificación del sistema real; resumen de datos como la media esperada o el histograma de del conjunto de datos, distribuciones de probabilidad que se ajusten al sistema o cualquier material técnico que sea de utilidad; fuentes de información controversial o importante.

Posteriormente se requiere realizar una revisión estructurada de este documento con las personas consideradas como los “clientes” del estudio para que las suposiciones sean aceptadas y reconocidas, aumentando la validez y credibilidad de la simulación.



### **4.1.3 Validar los componentes de la simulación por medio de técnicas cuantitativas**

Las técnicas cuantitativas permiten probar la validez de los subsistemas necesarios para realizar la simulación, por ejemplo si se utilizó una distribución de probabilidad se puede comprobar que los datos obtenidos tengan este comportamiento por medio de gráficas. En caso de tener varios conjuntos de datos del mismo evento se puede utilizar el test de Kruskal-Wallis para determinar la homogeneidad de las poblaciones, si el resultado es positivo se puede fusionar los conjuntos para algún fin de la simulación.

Otra técnica útil es realizar un análisis de sensibilidad, el cual sirve para determinar como un factor que se considera importante afecta la simulación, se modifica el valor del factor y se comparan los resultados, si no se encuentra diferencia significativa se declara que la simulación no es sensible al factor en específico en el rango en que se modificó. Los datos que se pueden obtener son: el valor del parámetro, la elección de la distribución, una entidad que se mueve a través del modelo, el nivel de detalle y que datos son más importantes para el modelo. Es importante tener en cuenta que estos cambios se deban a cambios en el sistema y no a fluctuaciones en el experimento para evitar confusiones, se puede utilizar el método de números aleatorios comunes aunque su utilidad es discutible. Es recomendable utilizar el diseño de experimentos estadísticos en caso de necesitar variar más de un factor, además permite detectar posibles relaciones entre los factores.

### **4.1.4 Validar el producto de la simulación completa**

El test definitivo para validar una simulación es establecer si los datos producidos son muy cercanos o parecidos a aquellos esperados del sistema real (propuesto) y se pueden dar 3 casos.

Si existe un sistema real similar al propuesto (el cual se está simulando), se puede realizar una comparación entre los resultados de la simulación y aquellos obtenidos a partir de medidas del sistema en el mundo real, en caso de obtener una similitud cercana entre los datos “virtuales” y “reales” se dice que la simulación es válida, si por el contrario se encuentran discrepancias notorias entre los 2 valores se procede a realizar ajustes a la simulación. Este es el tipo más aceptado para validar simulaciones y se le denomina

“results validation”, sin embargo se debe aceptar que el modelo el sistema usado en la simulación solo es una aproximación del sistema real, por lo tanto no se debe esperar obtener exactamente los mismos resultados.

Por otro lado, exista o no un sistema similar se puede evaluar si los datos obtenidos son razonables, en caso que los resultados sean consistentes con el comportamiento esperado se dice que la simulación tiene “face validation”.

Los 2 casos anteriores se refieren a realizar comparaciones con respecto al pasado o el presente del sistema, sin embargo también determinar si la simulación puede predecir el comportamiento futuro del sistema (este puede ser más importante) ya que los modelos evolucionan con el tiempo por lo tanto existe la oportunidad de realizar una validación prospectiva. Por ejemplo una vez construido el sistema, se puede almacenar suficientes datos para realizar una comparación entre la simulación y el modelo, si se encuentra que los datos son similares entonces se dice que incremento la validez del modelo, caso contrario se pueden usar los datos para actualizar.

## **4.2 Selección de las técnicas de validación a realizar**

En esta sección se va a evaluar que técnicas son aplicables a la simulación realizada en esta tesis. Primero es importante recalcar que algunas de las técnicas anteriormente expuestas, 4.1.1 y 4.1.2, fueron utilizadas durante el desarrollo de los capítulos 1 y 2, de hecho este documento permite la revisión estructurada de las suposiciones realizadas y la información recolectada. Sin embargo se realizará una explicación por medio de la teoría existente para aumentar la validez.

Las técnicas utilizables se pueden determinar de acuerdo a los subsistemas usados en la simulación de acuerdo a si son apropiados para evaluarlos, los cuales son: distribución de probabilidad, cálculo de trayectorias, distancias, coeficientes de reflexión y ponderación; por ejemplo: ya que se utiliza una distribución de probabilidad poisson truncada, es necesario comprobar esto por medio de técnicas cuantitativas, en resumen solo es necesario comprobar que la función de probabilidad se comporte como se espera y los demás cálculos sean acertados. Por otro lado el test de sensibilidad permite mostrar

la influencia del nivel de detalle del modelo sobre la simulación, el cual está dado por la cantidad de trayectorias tomadas en cuenta.

Acerca de la validación del producto de la simulación, actualmente no se tiene acceso al equipo necesario para realizar las medidas del sistema real sin embargo se presentara el método a seguir para realizar las medidas, sobre los datos recolectados en trabajos anteriores, se desconoce la topología y las cargas utilizadas lo cual no permite el correcto uso del simulador, ver sección 2.5. Por lo tanto realizar la “face validation” basados en la teoría existente y algunas referencias que ya han sido presentadas a lo largo de este documento es la única opción, mientras la validación prospectiva será tema de estudios posteriores.

### **4.3 Aplicación de las técnicas de validación**

Obtener información de calidad ha sido uno de los pilares en la realización de este trabajo, como se mencionó en 4.2 se ha basado en investigaciones realizadas por el IEEE y otros investigadores sobre el comportamiento de la respuesta del canal y la selección del modelo de canal que mejor se ajusta a los requerimientos de una tecnología emergente.

#### **4.3.1 Validación por teoría utilizada**

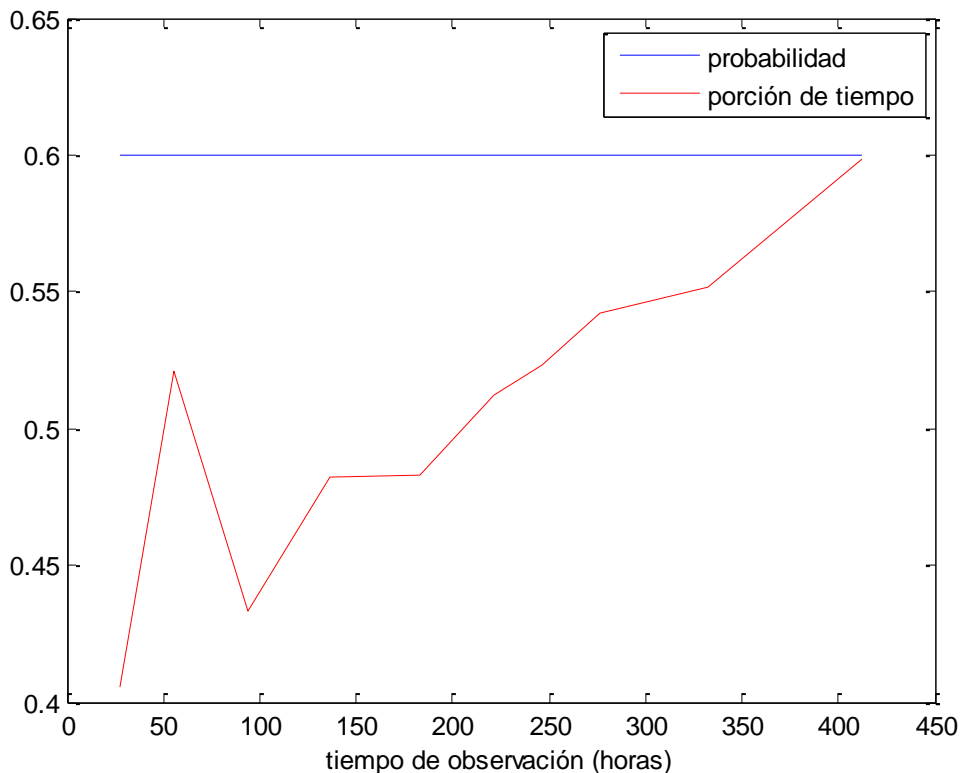
La adición estocástica al modelo se puede observar como una combinación de varios campos del conocimiento, a saber: la teoría de líneas de transmisión que se aplica por medio de una simplificación parametrizada a la respuesta de la red eléctrica, la estadística fue usada para modelar los cambios en periodos largos de las cargas suministrando las herramientas para obtener el comportamiento esperado del sistema aun siendo un valor variante en tiempo y frecuencia, por último la teoría de circuitos (apoyada en la electrónica de potencia) se utiliza para modelar las impedancias que son observadas por la red eléctrica las cuales generan los cambios a corto plazo. Estas teorías han sido validadas previamente, razón por la cual son aceptadas ampliamente, por ende la combinación de las 3 permite concluir que el resultado también es válido.

### 4.3.2 Comprobación de la función de probabilidad

En 4.1.3 se menciona que para el caso de comprobar funciones de probabilidad el uso de graficas es el método indicado, ya que se trata de una poisson truncada con 2 estados se tomó en consideración que la probabilidad del estado n se traduce en la porción de tiempo que el sistema se encuentra en dicho estado [63], por lo tanto basta con comparar la probabilidad calculada de forma teórica para una carga con los datos obtenidos del simulador sobre la porción de tiempo que la carga se encuentra en un estado determinado.

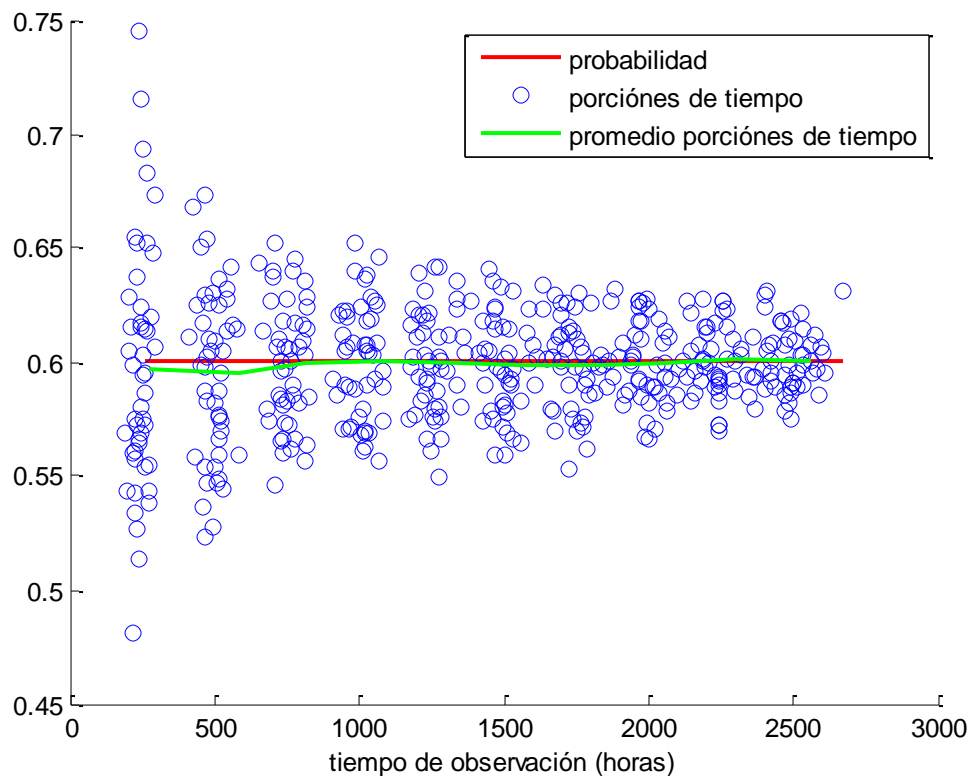
Para realizar este procedimiento se utilizó una carga con tiempos promedio de 2 y 3 horas para encendido y apagado respectivamente, lo cual genera una probabilidad de 0.4 para el estado de encendido y 0.6 para apagado. Se usaron diferentes tiempos de observación donde se espera teóricamente ver que al incrementar la longitud del tiempo las porciones de tiempo se acercan más al valor calculado teóricamente.

**Figura 4-1:** Comparación entre porción de tiempo y probabilidad para el estado apagado



Esta comparación a su vez permitió la validación del generador de series de tiempo, uno de los subsistemas que utiliza el simulador. En la Figura 4-1 se puede observar cómo se comporta la porción de tiempo que el sistema permanece en el estado apagado con respecto al tiempo de observación, es evidente que sigue el comportamiento esperado acercándose al valor de la probabilidad al aumentar el tiempo. Se utilizó este tipo de representación ya que facilita la validación de la función de probabilidad, un histograma también podría haber sido utilizado pero no permitiría observar la evolución respecto al tiempo con la misma facilidad. Posteriormente se realizaron 100 ejecuciones de las series de tiempo para comparar la media de estas medidas con la probabilidad del sistema, el resultado obtenido se muestra en la Figura 4-2, como se puede observar la tendencia se mantiene.

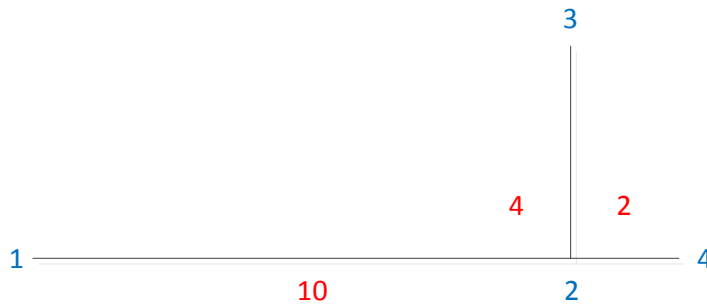
**Figura 4-2:** Comparación realizada con múltiples series de tiempo para el estado apagado.



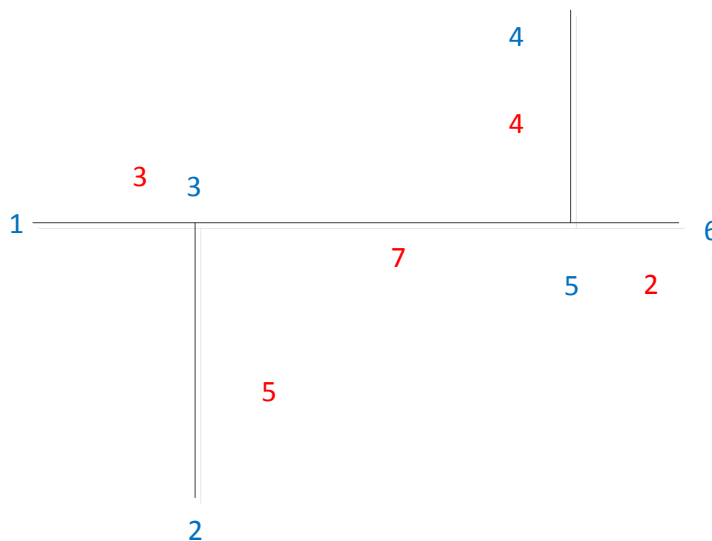
### 4.3.3 Validación y verificación de los subsistemas del simulador

El diseño de los subsistemas necesarios para realizar la simulación del canal se encuentran en la sección 3.3, entre ellos cabe resaltar los siguientes: cálculo de trayectorias, distancias, coeficientes de reflexión y ponderación, ya que son las partes necesarias para obtener la respuesta completa del simulador, ya sea por series de tiempo o valor esperado. La validación de estos subsistemas a su vez permitió la verificación de los mismos, para realizar este objetivo se hizo uso de 2 topologías con máximo 6 nodos de forma que permitan realizar cálculos manuales, las cuales se muestran en Figura 4-3 y Figura 4-4, las cargas estarán ubicadas en el nodo 3 para la topología A y nodos 2 y 6 para B, los nodos se muestran en azul y las distancias en rojo.

**Figura 4-3:** Topología A



**Figura 4-4:** Topología B



Se empezó con el subsistema que busca las trayectorias, aunque una muestra ya había sido realizada en el capítulo 3, los resultados se encuentran en las siguientes cuatro figuras, tomando las 6 primeras trayectorias entre 1 y 4, otro ensayo fue realizado entre 2 y 3.

**Figura 4-5:** Trayectorias topología A, inicio 1 final 4

1	2	4	0	0	0	0
1	2	1	2	4	0	0
1	2	3	2	4	0	0
1	2	4	2	4	0	0
1	2	1	2	1	2	4
1	2	1	2	3	2	4

**Figura 4-6:** Trayectorias topología A, inicio 2 final 3

2	3	0	0	0	0
2	1	2	3	0	0
2	3	2	3	0	0
2	4	2	3	0	0
2	1	2	1	2	3
2	1	2	3	2	3

**Figura 4-7:** Trayectorias topología B, inicio 1 final 4

1	3	5	4	0	0
1	3	1	3	5	4
1	3	2	3	5	4
1	3	5	3	5	4
1	3	5	4	5	4
1	3	5	6	5	4

**Figura 4-8:** Trayectorias topología B, inicio 2 final 3

2	3	0	0	0	0
2	3	1	3	0	0
2	3	2	3	0	0
2	3	5	3	0	0
2	3	1	3	1	3
2	3	1	3	2	3

Usando estos datos se puede verificar que la búsqueda de trayectorias funciona correctamente, ya que no se presentan trayectorias que incluyan conexiones no existentes; en caso de usar nodos vecinos, determina las posibles rutas que puede seguir la señal al reflejarse en otras conexiones y por último, todas las trayectorias empiezan con el nodo inicio y terminan con final.

**Figura 4-9:** Distancias totales de las 6 primeras trayectorias

```
>> d(1:6)

ans =

    14    20    24    28    22    18
```

La validación el subsistema que calcula las distancias de cada trayectoria, se realizó usando las trayectorias de la Figura 4-7 cuyos resultados se muestran en la Figura 4-9, el cálculo manual de estas se presenta en la Tabla 4-1. La comparación entre ambos datos permite concluir que el subsistema es válido, ya que no existe discrepancia entre los cálculos teóricos y aquellos obtenidos por medio del simulador.

**Tabla 4-1:** Comparación entre cálculos teóricos y datos del simulador

Trayectoria #	Calculo de distancias	Resultado teórico	Resultado simulador
1	3+7+4	14	14
2	3+3+3+7+4	20	20
3	3+5+5+7+4	24	24
4	3+7+7+7+4	28	28
5	3+7+4+4+4	22	22
6	3+7+2+2+4	18	18

En el caso del coeficiente de reflexión se debe tomar en cuenta que es el reemplazo de variables en una ecuación, siendo sencillo verificar su funcionamiento, para tal fin se utilizó una carga constante y se comprobó el resultado, en el caso de los demás tipos de carga el efecto se puede probar observando su comportamiento en frecuencia y tiempo, por ejemplo si la carga es resonante e invariante una respuesta similar debe



observarse en la reflexión, ya que cada uno de los puntos obtenidos son equivalentes a realizar el caso constante una vez.

Para el ejemplo con carga constante, se utilizaron 2 cargas, de 150 y 1000 ohmios, la impedancia característica será de 270  $\Omega$ , los cálculos y sus resultados teóricos se muestran en las ecuaciones (4.1) y (4.2), al compararlos con los obtenidos por medio del simulador, ver Figura 4-10, se observa que no existe diferencia alguna.

$$\Gamma_1 = \frac{150-270}{150+270} = -\frac{2}{7} \quad (4.1)$$

$$\Gamma_2 = \frac{1000-270}{1000+270} = \frac{73}{127} \quad (4.2)$$

**Figura 4-10:** Vector de coeficientes de reflexión debidos a las impedancias z.

```

z =
[ 150, 1000]

>> r

r =
[ -2/7, 73/127]

```

Para comprobar los casos invariantes y variantes en el tiempo se usaron 2 cargas resonantes con los datos establecidos en la Tabla 4-2 con la misma impedancia característica, luego se muestran graficas de su comportamiento en magnitud respecto a la frecuencia y tiempo de las impedancias y sus coeficientes de reflexión.

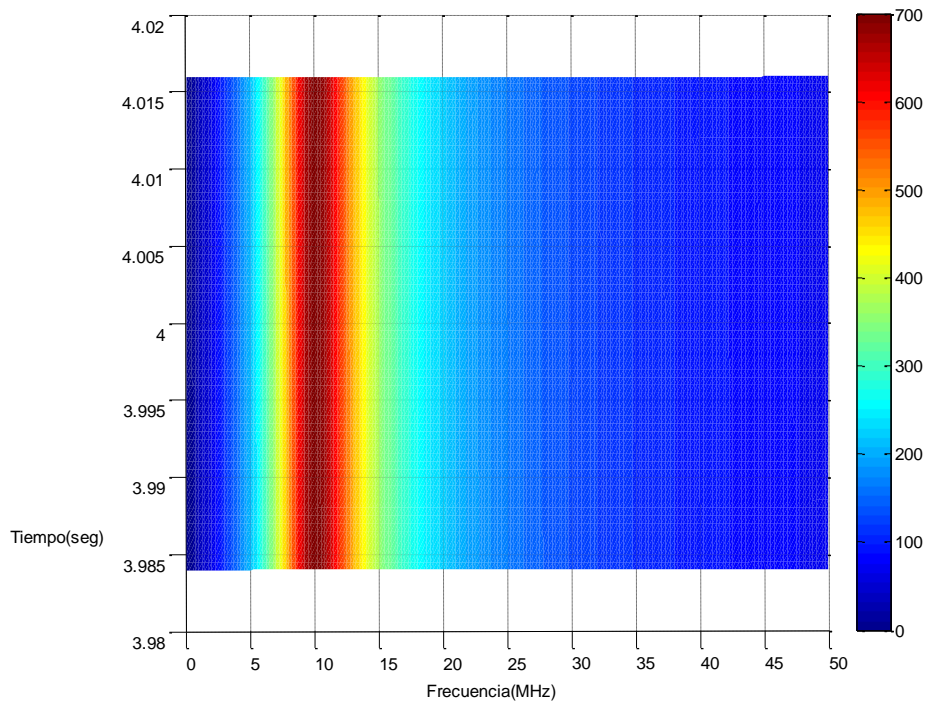
**Tabla 4-2:** Ejemplos de cargas variantes e invariantes en el tiempo

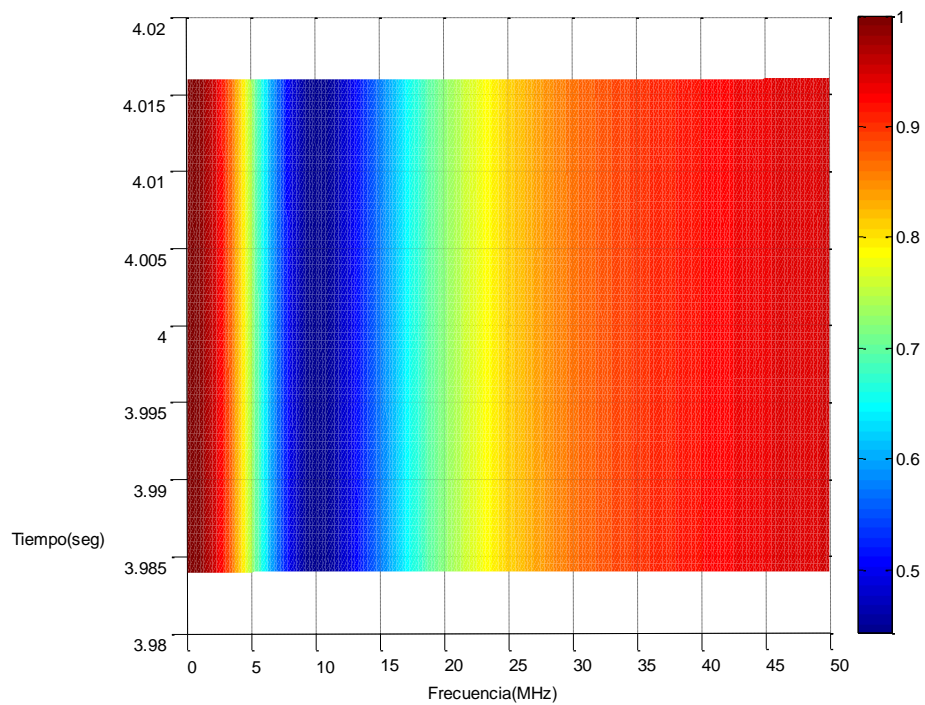
Carga	Tipo	Resistencia ( $\Omega$ )	Factor de calidad	Frecuencia natural	Valor constante
1	2	700	2	10MHz*2*pi	0
2	4	1000	5	30MHz*2*pi	100

Para la carga 1, se esperaba un comportamiento invariante para el tiempo y selectivo en frecuencia con un valor máximo en magnitud de 700  $\Omega$ , en la Figura 4-11 se puede comprobar que el simulador representa de manera correcta el comportamiento. En el caso del coeficiente de reflexión se presenta un comportamiento similar el cual está representado en la Figura 4-12, se observa que los resultados son correctos tanto en

comportamiento como en valores, por ejemplo para el coeficiente de reflexión su valor en magnitud máximo es 1 producido en aquellas frecuencias donde la impedancia es 0.

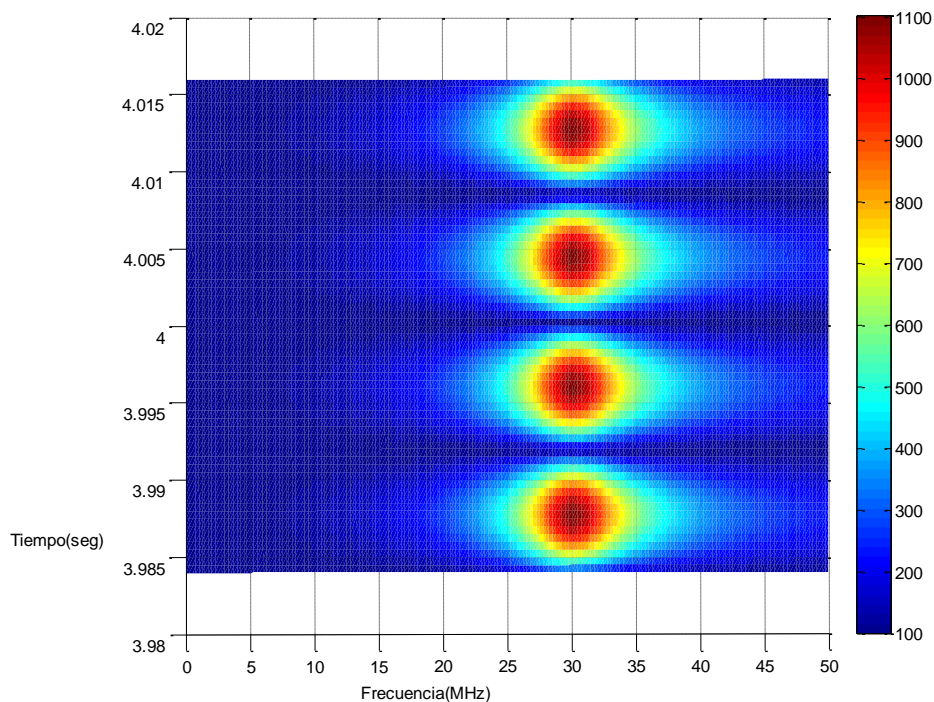
**Figura 4-11:** Magnitud de la impedancia de la carga 1



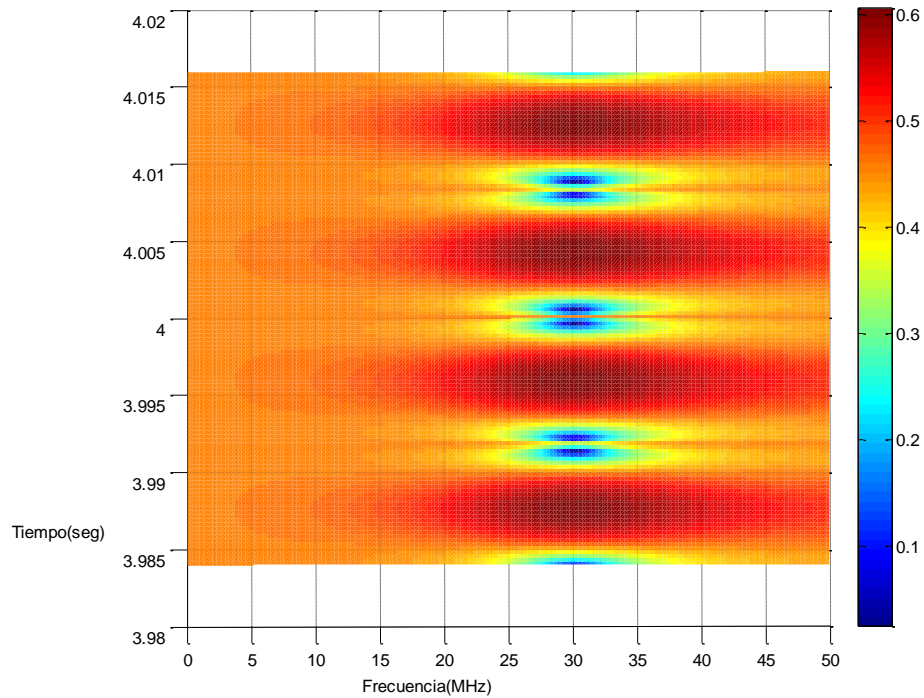
**Figura 4-12:** Magnitud del coeficiente de reflexión debido a la carga 1

En el caso de la carga 2, el comportamiento es variante en tiempo y frecuencia con valor máximo de  $1100 \Omega$  para la impedancia (1000 en resonancia más el valor constante de 100), la variación temporal es notoria para ambas variables.

**Figura 4-13:** Magnitud de la impedancia de la carga 2



En la Figura 4-12 se observa el comportamiento variante en el tiempo sincronizado con el periodo del valor absoluto de la señal de energía eléctrica, también los valores son consecuentes con lo esperado. En el caso del coeficiente de reflexión se deben observar zonas cercanas a 0, donde la impedancia tiene valores que se aproximan a  $270 \Omega$  y por lo tanto parece acoplada, ya que el mínimo es 100 deben existir líneas entre las zonas de acople, lo cual está representado en la Figura 4-14.

**Figura 4-14:** Magnitud del coeficiente de reflexión debido a la carga 2

El cálculo del factor de ponderación se validó utilizando la topología A, debido a su simplicidad, continuando con una impedancia característica de  $270 \Omega$  e impedancias de  $50 \Omega$  para los equipos PLT, 1 sola carga será considerada en el nodo 3 como una variable de nombre gamma1 y se calculó los factores de ponderación para las 3 primeras trayectorias entre los nodos 1 y 4. Los resultados del simulador se muestran en la Figura 4-15, mientras los cálculos teóricos se muestran en las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.5), ya que los resultados son iguales se dice que el cálculo del factor de ponderación está validado y verificado.

**Figura 4-15:** Factores de ponderación
$$g =$$

$$\frac{25/384}{275/18432} = (25 \cdot \text{gamma1}) / 576$$

$$g_1 = \left(1 - \left|\frac{50 - 270}{50 + 270}\right|\right) * \left(1 - \left|\frac{\frac{270}{2} - 270}{\frac{270}{2} + 270}\right|\right) * \left(1 - \left|\frac{270 - 50}{270 + 50}\right|\right) = \frac{25}{384} \quad (4.3)$$

$$g_2 = \left(1 - \left| \frac{50 - 270}{50 + 270} \right| \right) * \frac{\frac{270}{2} - 270}{\frac{270}{2} + 270} * \frac{50 - 270}{50 + 270} \left(1 - \left| \frac{\frac{270}{2} - 270}{\frac{270}{2} + 270} \right| \right) * \left(1 - \left| \frac{270 - 50}{270 + 50} \right| \right) = \frac{275}{18432} \quad (4.4)$$

$$g_3 = \left(1 - \left| \frac{50 - 270}{50 + 270} \right| \right) * \gamma_1 * \left(1 - \left| \frac{\frac{270}{2} - 270}{\frac{270}{2} + 270} \right| \right)^2 * \left(1 - \left| \frac{270 - 50}{270 + 50} \right| \right) = \frac{25 * \gamma_1}{576} \quad (4.5)$$

#### 4.3.4 Test de sensibilidad

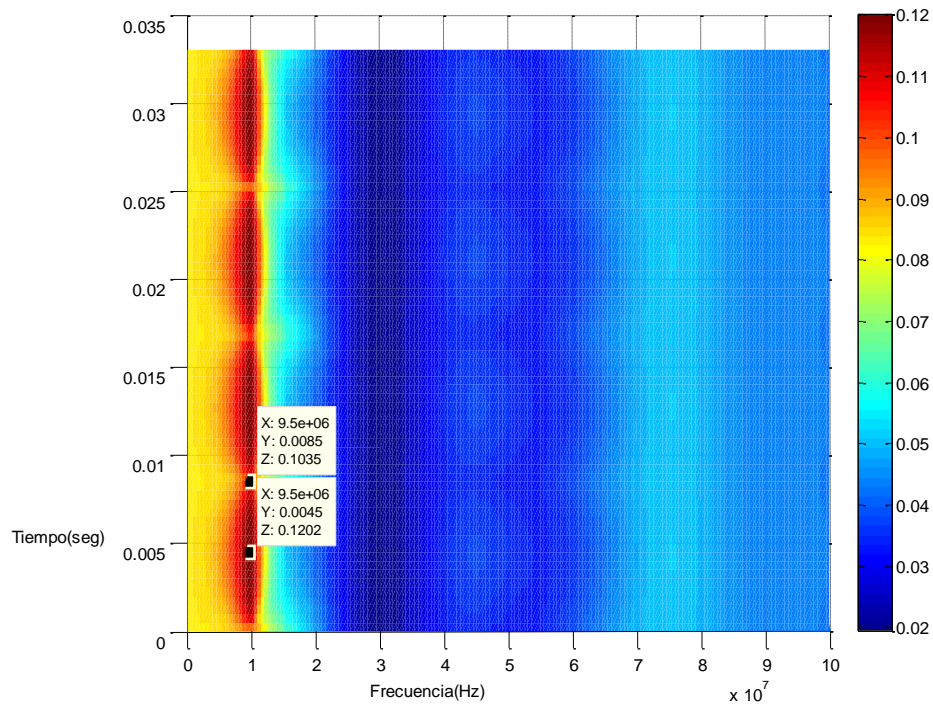
Uno de los factores que afecta el desempeño del modelo de Zimmermann es el nivel de detalle, el cual está representado por la cantidad de trayectorias que se toman en cuenta. Para este procedimiento se usó la topología B con cargas en los nodos 2 y 6 de la sección 4.3.3 y se realizó una comparación del valor esperado de la respuesta del canal en frecuencia aumentando el número de trayectorias tomadas en cuenta.

Se usaron 2 cargas de tipo 2 y 4 con parámetros iguales (referentes al comportamiento RLC) para facilitar la comparación, el nodo 2 tiene la carga tipo 4 mientras en 6 esta la tipo 2, los parámetros usados se muestran en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3:** Parámetros de las cargas

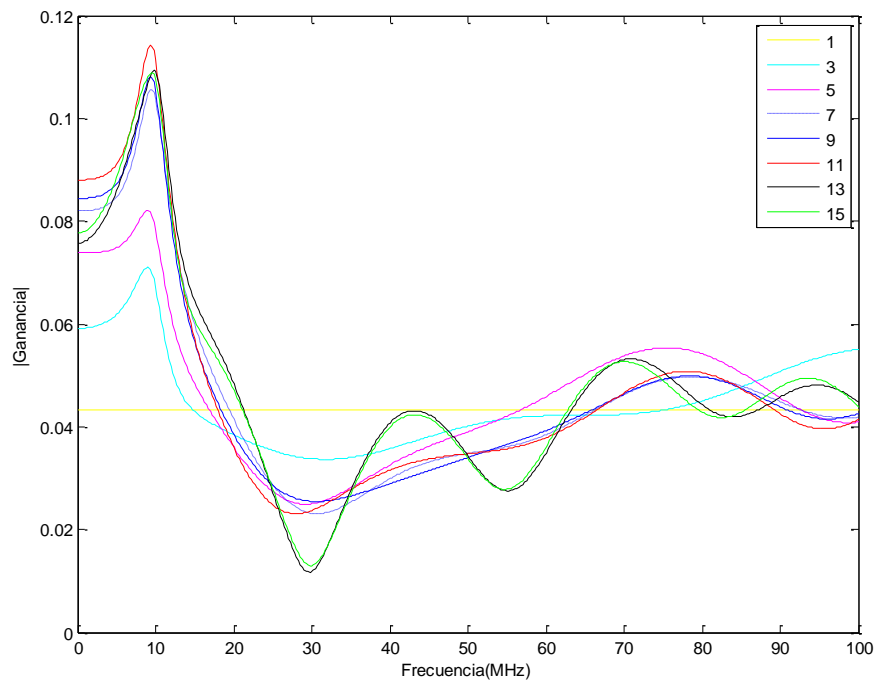
Carga	Tipo	Resistencia (Ω)	Factor de calidad	Frecuencia natural	Valor constante
1	4	1000	10	10MHz*2*pi	0
2	2	1000	10	10MHz*2*pi	0

Debido a que una comparación en un rango amplio de frecuencias y tiempos para múltiples respuestas no es ideal, se tomó en cuenta las respuestas para 2 instantes de tiempo donde se presentan los máximos y mínimos de la respuesta desde el punto de vista temporal para una frecuencia dada, al observar la Figura 4-16 se obtienen los valores de 0.0045 y 0.0085 para 9.5 MHz.

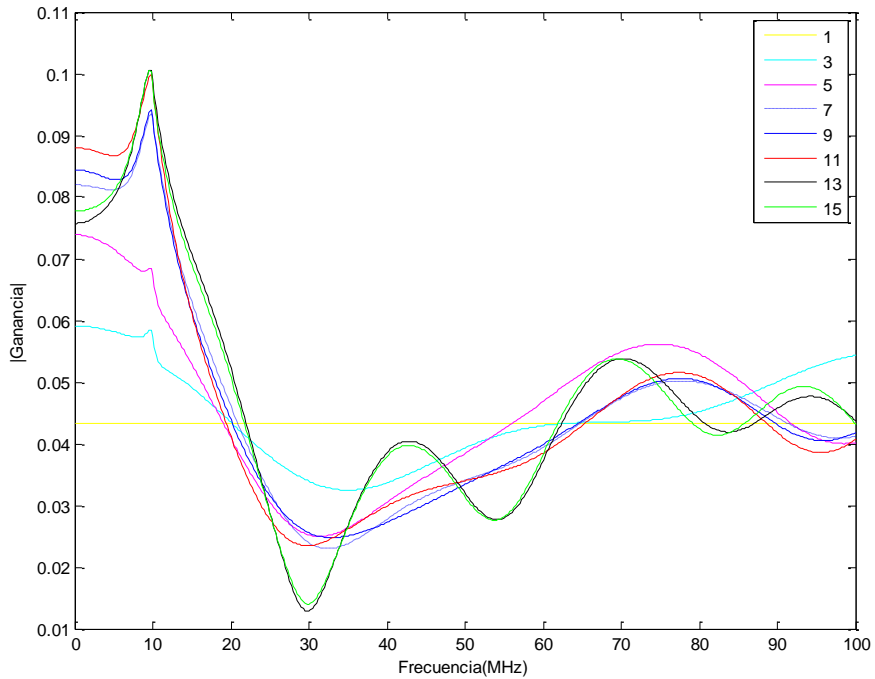
**Figura 4-16:** Respuesta esperada del canal con todas las trayectorias halladas

Se simuló la respuesta para 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 trayectorias en los instantes de tiempo antes mencionados, los resultados se muestran en la Figura 4-17 y Figura 4-18 donde se evidencia que la respuesta del sistema se ve afectada fuertemente por la cantidad de trayectorias que se toman en cuenta cuando esta cantidad es pequeña, por otro lado se observa una convergencia a medida que se aumenta el número de trayectorias permitiendo tener una buena aproximación de la respuesta sin necesidad de aumentar excesivamente el nivel de detalle del modelo. En conclusión para el caso simulado es prudente utilizar entre 9 y 15 trayectorias para obtener una respuesta aproximada y eficiente del ejemplo.

**Figura 4-17:** Respuesta en 0.0045 segundos





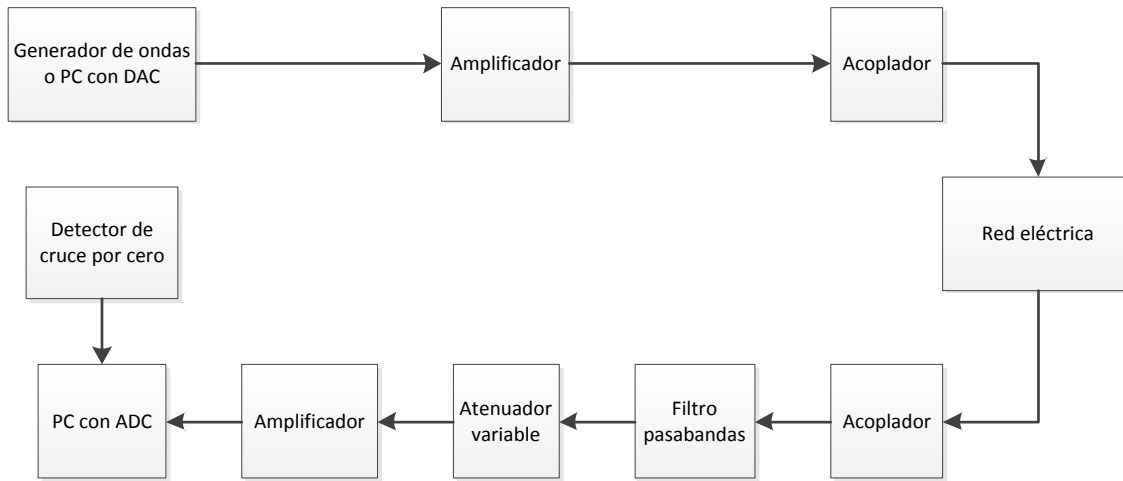
**Figura 4-18:** Respuesta en 0.0085 segundos

### 4.3.5 Metodología para validar los resultados por medio de medidas

Las medidas de la respuesta del canal se obtienen a partir de la respuesta impulso, para tal fin se utiliza un montaje como el presentado en la Figura 4-19, las condiciones necesarias para realizar las pruebas son:

- En transmisión
  - Producir una onda con un DAC de al menos 14
  - Amplificar la señal a un nivel suficiente para permitir una recepción adecuada en todos los caminos esperados
  - Acoplar la señal a la red eléctrica
- En recepción
  - Acoplar la señal de la red eléctrica
  - Pasar la señal a través de un filtro pasa bandas
  - Digitalizar la señal con un ADC de al menos 14 bits con 10.5 ENOB

**Figura 4-19:** Esquema de medida



Se puede observar en la Figura 4-19 se usa el atenuador variable para controlar la ganancia en la recepción, por lo tanto es necesario tomar el dato de la atenuación en cada medida que se realice, posteriormente en el procesamiento de los datos se utilizara para escalar correctamente la señal recibida.

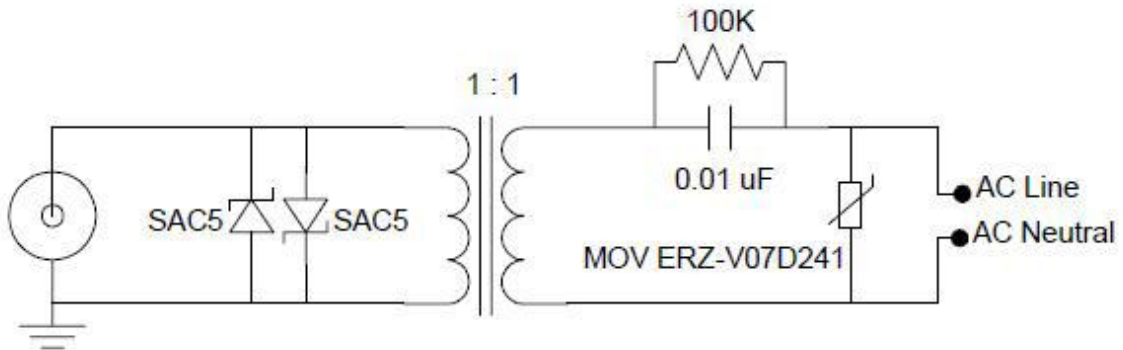
El IEEE utilizó la siguiente lista de equipos, ver Tabla 4-4, para las pruebas realizadas en [34]. Se utiliza una combinación entre el amplificador y la tarjeta DAC para lograr una sensibilidad de 1mVpp en los datos obtenidos. Adicionalmente se muestran ejemplos de acopladores, detectores de cruce y filtros pasa bandas.

**Tabla 4-4:** Lista de equipos

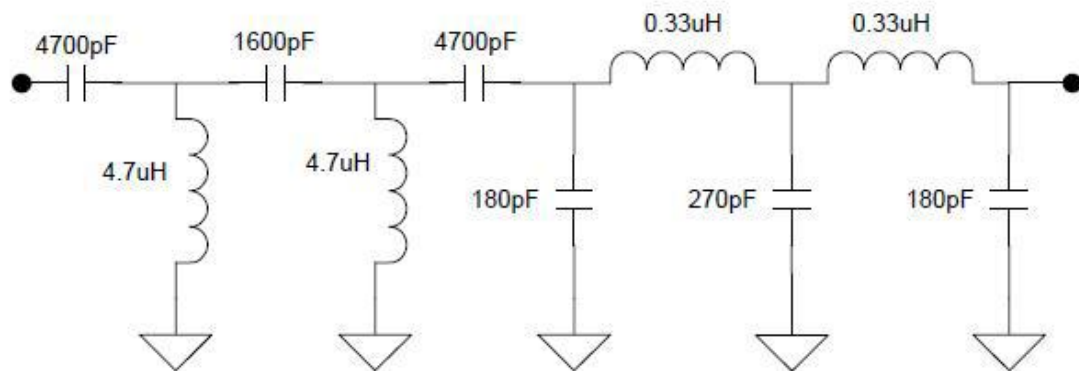
Ítem	Requisitos
Computador personal	
Tarjeta DAC "Gage CS14100"	Opción de reloj externo (opcional) Opción "Deep Memory", para capturar múltiples ciclos de 60 Hz Resolución de 14 bits, ENOB = 10.5 bits (o superior) Sensibilidad de 100mVp-p (o superior)
MATLAB	Signal processing toolbox
Generador arbitrario de ondas Sony / Tektronix AWG2021	
2 Amplificadores de potencia "Mini-Circuits ZHL-32A"	Impedancia: 50Ω entrada/salida
Atenuador variable, HP/Agilent 8496A	0-110dB, pasos de 10dB
Atenuador variable, HP/Agilent 8494A	0-11dB, pasos de 1 dB
Acopladores	Figura 4-20

Filtro pasa bandas	Figura 4-21
Detector para cruces por 0 de 60 Hz	Figura 4-22

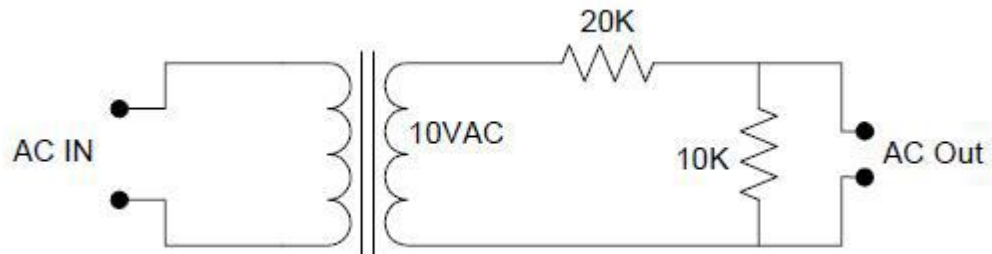
**Figura 4-20:** Ejemplo de acoplador [34]



**Figura 4-21:** Ejemplo de filtro pasa bandas [34]



**Figura 4-22:** Ejemplo de detector de cruces por cero [34]



Para caracterizar la respuesta impulso se usó un símbolo OFDM sin intervalo de guardia. Los símbolos consecutivos proveen una señal que varían en frecuencias (chirp) para calcular la respuesta impulso del canal en el receptor de forma repetitiva. El IEEE utilizó

un símbolo de 20.48  $\mu$ s de duración, de manera que este fuera más largo que la respuesta impulso, la definición de este símbolo se encuentra en la ecuación (4.6). La señal resultante se genera utilizando un DAC o un generador de señales en el cual se puedan cargar las características de la señal, luego se introduce en la red por medio de los acopladores a una frecuencia de muestreo de 75 MSPS.

$$S[n] = S(n * T_{sample}) = \sum_c \cos\left(\frac{2 * \pi * c * n}{1536} + \phi_c\right) : 0 \leq n \leq \infty \text{ y } 35 \leq c \leq 619 \quad (4.6)$$

Para realizar la medida primero se debe realizar la calibración de los equipos, para este fin se utilizará un multi-toma que permita conectar el transmisor y el receptor lo suficientemente cerca, luego se inicia la transmisión de los símbolos OFDM y se ajustan los atenuadores para que el DAC pueda capturar correctamente, se anotan o almacenan los datos referentes a la configuración del atenuador. Posteriormente se procede a conectar los equipos en las tomas deseadas, se inicia la transmisión de la señal (TxChirp) y se ajusta de nuevo el atenuador en caso de no recibir correctamente los datos en el DAC, se almacenan los datos obtenidos en el receptor (RxChirp) y cada 10 símbolos se realiza un promedio para obtener un símbolo con una alta SNR.

La respuesta impulso no escalada en se obtiene por medio de la ecuación (4.7), el cual se escala posteriormente.

$$A_r = Re\left\{ifft\left(\frac{fft(RxChirp)}{fft(TxChirp)}\right)\right\} \quad (4.7)$$

En lo que respecta a los datos necesarios para que el simulador funcione, comportamiento de las cargas y la impedancia característica se miden haciendo uso de una analizador de espectros vectorial. Para el caso de las cargas se mide la reflexión de la señal con una frecuencia de muestreo que dependerá del rango de frecuencias de interés [33], mientras para impedancia característica se pueden utilizar los métodos de corto circuito y circuito abierto, a partir de teoría o medidas [58].

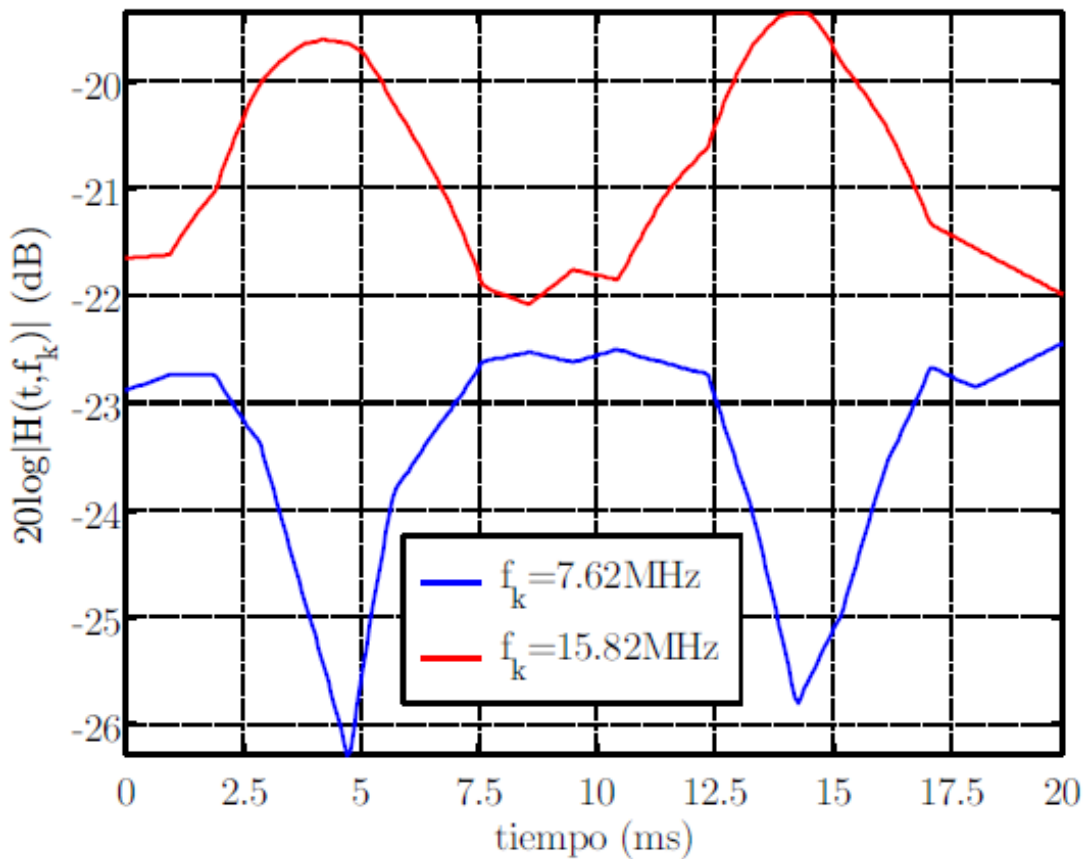
### 4.3.6 Validación del producto de la simulación

Para realizar esta validación se escogió usar la “face validation” que se explicó en la sección 4.1.4 por las razones explicadas en 4.2. Adicional a que en trabajos anteriores estudian el comportamiento variante en el tiempo, pero no especifican las características de la topología o las cargas, se debe tomar en cuenta que este es el primer trabajo que utiliza el modelo de Zimmermann con adiciones estocásticas debidas a las cargas, por lo tanto no existen trabajos similares en lo que respecta al modelo utilizado, normalmente se consideran los factores de ponderación únicamente como constantes para simplificar los cálculos [39,51,50,52]. Sin embargo el comportamiento de los resultados del simulador debe ser consecuente con las medidas realizadas en trabajos anteriores.

Por lo tanto los resultados del simulador son comparables en su comportamiento a las medidas realizadas en trabajos anteriores, entre los cuales se resaltan: el estudio realizado por el IEEE para la realización de la norma IEEE 1901 [34], las tesis, Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha [33], “Etude et Optimisation des Systèmes à Courants Porteurs” [28] y “Power Line Communication and Customer Equipment” [35] ya que consideran el efecto variante en el tiempo debido a las cargas en la respuesta del canal.

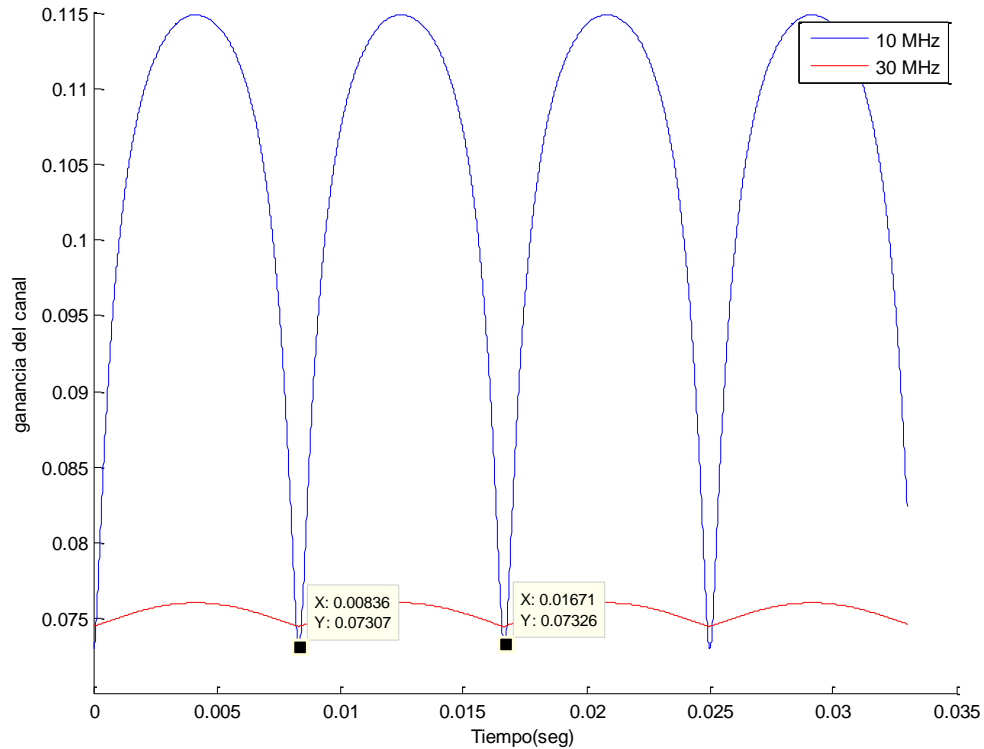
El comportamiento del canal se compone de una variación periódica en el tiempo y la existencias de frecuencias donde la ganancia es pequeña haciéndolo variante en el tiempo y selectivo en frecuencia, adicionalmente los factores de ponderación tienen valores comunes menores a 0.1 [34] por lo tanto no se espera respuestas de canal con ganancias mayores a 1, de hecho se espera atenuaciones mayores a los 15dB. Primero se observó el comportamiento temporal y luego en el dominio de la frecuencia, con respecto a los valores de los factores de ponderación o las ganancias se observaron en último lugar.

**Figura 4-23:** Evolución cíclica de la respuesta de amplitud del canal [33]



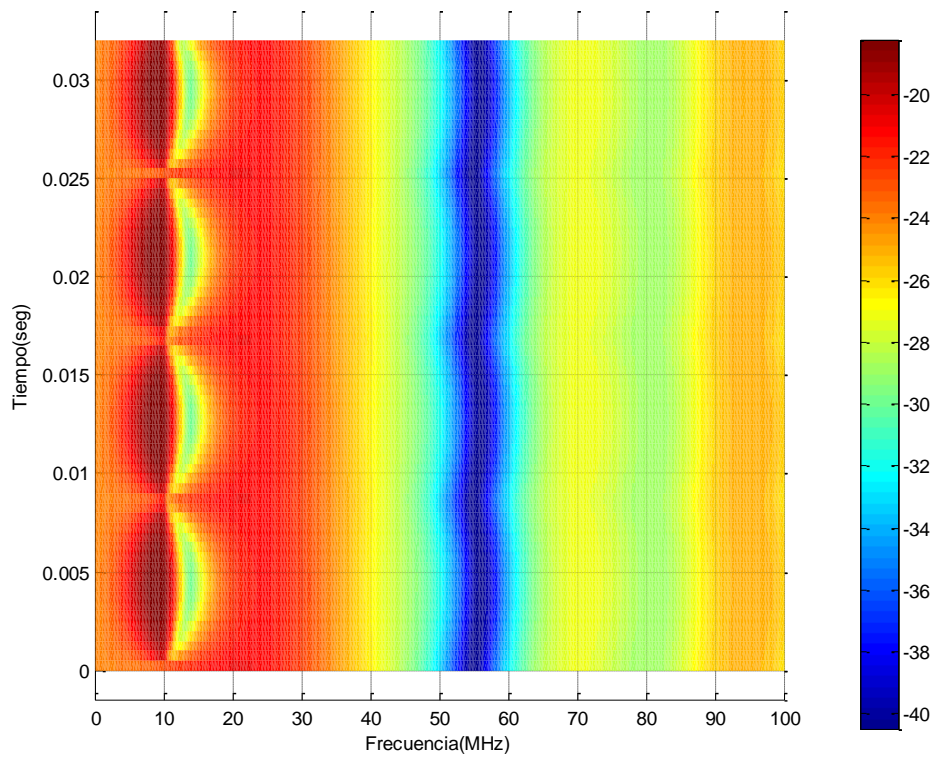
El IEEE menciona variaciones en el tiempo de la ganancia del canal en 8 decibeles con una frecuencia de 120 Hz [34], mientras en [33] se encuentra un comportamiento similar en lo que respecta a la frecuencia, ver Figura 4-23. Este comportamiento es fácilmente apreciable en el simulador al utilizar cargas variantes en el tiempo, ya sea tipo 3 o 4. No se espera obtener la misma variación en la respuesta del canal debido a que se desconocen las características de la carga, sin embargo la frecuencia en la que ocurre esta variación es de 120 Hz, ver ecuación (4.8), como se muestra en la Figura 4-24, la cual se obtiene utilizando el mismo ejemplo usado en el test de sensibilidad solo con la carga 1 funcionando para 2 frecuencias, por lo tanto el simulador es consecuente con los resultados obtenidos desde el punto de vista de la variabilidad del tiempo.

$$f = \frac{1}{x_{min1} - x_{min2}} = \frac{1}{16.71ms - 8.36ms} = \frac{1}{8.35ms} \approx 120Hz \quad (4.8)$$

**Figura 4-24:** Respuesta del canal, topología B

Para el caso del comportamiento en frecuencia se utilizó el ejemplo anterior, cuya respuesta completa se muestra en la Figura 4-25, se puede ver que el rango entre 50 y 60 MHz se tiene una atenuación mayor comparada con el resto de las frecuencias, por lo tanto se observa una selectividad en frecuencia como se esperaba. Adicionalmente los valores de atenuación están dentro del rango esperado, por lo tanto este simulador tiene resultados consecuentes con lo que la teoría dice y lo que se espera a partir de las medidas realizadas en trabajos anteriores, permitiendo afirmar que existe “face validation” en el simulador.

**Figura 4-25:** Respuesta del canal en dB









## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

El modelo de Zimmermann de la red eléctrica es completamente funcional para la evaluación de la respuesta de la red eléctrica en frecuencia, debido a que posee pocos parámetros y estos son fácilmente ajustables, de hecho en los ambientes in-home se puede suprimir el factor que controla la atenuación por distancia simplificando el tratamiento del modelo. Además, el hecho que el IEEE diera su visto bueno a este modelo incrementa la credibilidad del mismo para ser utilizado en trabajos posteriores, por ejemplo redes inteligentes sobre PLT.

La adición del comportamiento estocástico debido a las cargas del sistema al modelo Zimmermann no había sido realizado antes y requiere del conocimiento previo del comportamiento de las cargas de la red, tiempos promedios de encendido y apagado y datos de la topología como distancias e impedancia característica del cableado utilizado. Es plausible la adición del tercer estado de las cargas sin requerir mayores modificaciones al trabajo presentado, en caso de ser necesario.

No hay independencia estadística entre los coeficientes de reflexión y transmisión, por esta razón es necesario computar el valor esperado del canal en función del conjunto de variables aleatorias, el cual puede ser utilizado para fines de diseño.

Si la función de densidad de probabilidad de la respuesta del canal para una topología dada es requerida se puede usar la simulación para obtener la realización del canal y a partir de distribuciones conocidas o lambda generalizada ajustar los datos, también es posible determinarla a partir de transformaciones a partir del conjunto de variables aleatorias que representan los coeficientes de reflexión debidos a las cargas.

El uso de algoritmos de inteligencia artificial presenta resultados adecuados al determinar las posibles rutas que se pueden dar en una topología específica, no es recomendable usar algoritmos que encuentran la ruta más corta debido a que: primero se requieren más de una ruta; segundo, aunque el costo se asocie a la cantidad de nodos o la distancia, si se modifica el criterio de costo por el factor de ponderación estos dejan de funcionar.

Se debe evitar el uso de ciclos en MATLAB ya que generan pérdida en el rendimiento del simulador, en especial en el subsistema que evalúa la respuesta en frecuencia. Por lo tanto se deben buscar métodos alternos que permitan evadir el uso de ciclos.

El simulador provee flexibilidad en el manejo de los parámetros del modelo de Zimmermann en caso de requerir extender la simulación a otros ambientes como media tensión, además permite la inclusión de la topología de forma eficiente. Se requiere diseñar una interfaz gráfica o un programa que a partir de un plano eléctrico genere la matriz de topología.

La simulación fue validada utilizando cinco técnicas distintas, se encontró que son consecuentes con la teoría, los subsistemas fueron comprobados uno por uno permitiendo la corrección de algunos errores y se determinó que el simulador es válido y sus resultados son razonables. Además se encontró que entre 9 y 15 trayectorias se obtiene una aproximación notable a la respuesta del canal.

Los resultados de la simulación se pueden usar para seleccionar la banda de frecuencias en las cuales la transmisión es óptima y aquellas donde la transmisión es imposible o improbable. Adicionalmente se puede determinar en qué puntos de la red se requieren repetidores para aumentar el rendimiento de la comunicación.

## **5.2 Recomendaciones**

Se requiere una optimización del código eliminando ciclos, ya que se encontró que estos pueden disminuir el rendimiento del simulador aproximadamente 4 veces en términos de tiempo de ejecución. Adicionalmente, el desarrollo de una interfaz gráfica para introducir la topología de en forma de plano o un módulo de software que permita convertir

formatos de planos eléctricos en la representación deseada para usar el simulador es necesario.

Campañas de medidas o caracterizaciones de las cargas más comunes se requieren para generar un banco de datos para usar el simulador utilizando los métodos explicados en la sección 4.3.5.

La adición del tercer estado de las cargas al modelo de Zimmermann, conectado pero apagado, es un trabajo para ser realizado a futuro. Además, se debe realizar la debida modificación al simulador para trabajar con este cambio, como parte de este proceso se puede considerar que el conjunto de variables aleatorias en su estado cero son una impedancia que se encuentre entre la clasificación mencionada en el capítulo 2.

Una validación de los resultados del simulador por medio de medidas puede llevarse a cabo como una tesis de pregrado.

Adicionalmente, la emulación en hardware de este modelo es un proyecto que se debe tomar en consideración, debido a la eficiencia proporcionada, por ejemplo: realizar implementaciones del modelo en FPGA.

Se deben adicionar más criterios para que el algoritmo genético determine cuántas rutas se deben tomar en cuenta, se puede utilizar el análisis de sensibilidad para determinar el nivel de detalle para una simulación dada u otros criterios mencionados en el capítulo 3.



## Bibliografía

- [1] Y.J. Yang and C.M. Arteaga, "Broadband over Powerline field trial for commercial in-building applications," *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*
- [2] M.P. Bernal, H.B. Mora, and G.I.A. Castillo, "PLT passive coupling for distribution of TV signals in a building," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 1-4, April 2007.
- [3] B. Sukhbaatar, "Introduction of new Information and Communication Technologies in Mongolia," *International Forum on*, pp. 24-27, 3-6 Oct. 2007.
- [4] ITU-T. Recommendation ITU-T G.9960.
- [5] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. IEEE.
- [6] A. Mittal and A. Proothi, "Broadband over power lines in India: Are we ready for it?," *Advanced in Power Line Communications and Its Applications, 2007 First International Symposium on*, pp. 1-2, Dec 2007.
- [7] A. Cunha, P. Biggs, and H. Quintella, "The challenges of integrating BPL into existing telecom business models," *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*, pp. 3-6, Oct. 2005.
- [8] Recomendación UIT-T Y.2001.
- [9] N. Papandreou and T. Antonakopoulos, "Resource Allocation Management for Indoor Power-Line Communications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 893-903, April 2007.
- [10] D. Gutierrez, L.M. Torres, F. Blasco, J. Carreras, and J.C. Riveiro, "In-home PLT ready for triple play services," *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*, pp. 366- 370, Oct. 2005.
- [11] Agencia nacional del espectro. (2011, Junio) [www.ane.gov.co. \[Cited: 2011, Junio\]](http://www.ane.gov.co/files/35383137643637613966333438336638/Documento_de_consulta_publica_para_definir_la_politica_nacional_de_servicios_de_radio_frecuencia.pdf)
- [12] Jorge C. Atton. (2009) [www.paisdigital.org. \[Online\]. \[http://www.paisdigital.org/documentos/mesas\\\_trabajo/mesas\\\_trabajo\\\_2009.pdf\]\(http://www.paisdigital.org/documentos/mesas\_trabajo/mesas\_trabajo\_2009.pdf\)](http://www.paisdigital.org/documentos/mesas_trabajo/mesas_trabajo_2009.pdf)
- [13] McKinsey & Company. (2009, Feb) <http://www.cicomra.org.ar/cicomra2/expocomm/imagenes09/Christian%20Martinez.pdf>
- [14] Yinghui Huang and Guanyu Li, "A Semantic Analysis for Internet of Things," in *Intelligent Computing and Applications*, pp. 1-6, 2009.

- vol. 1, 2010, pp. 336-339.
- [15] Lu Tan and Neng Wang, "Future internet: The Internet of Things," in *Advanced Computer Theory and Engineering Applications*, pp. 376-380.
- [16] J.J. Pujante, D. Martinez, A. Gomez, and I. Marin, "PLC QoS management and integration for IPv6 applications," in *Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*, pp. 131- 135, April 2005.
- [17] D. Dzung, I. Berganza, and A. Sendin, "Evolution of powerline communications for smart distribution: From theory to practice," in *Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 474-478, April 2011.
- [18] R.P. Joshi, S. Bhosale, and P.H. Patil, "Analysis and Simulation of Noise in Power Line Communications," in *Engineering and Technology, 2008. ICETET '08.*, 2008, pp. 1287-1292.
- [19] Catoira Fernando, Maidana Melisa, and Fullana Pablo, *POWER LINE COMMUNICATIONS, Descripción y Aplicaciones*, Bahía Blanca, Argentina, Feb 2010.
- [20] H.A. Latchman and L.W. Yonge, "Power line local area networking," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 12, pp. 166-174, december 2011.
- [21] K.Dostert M. Zimmermann, "A Multi-Path Model for the Power Line Channel," *IEEE Transactions on communications*, vol. 50, no. 4, pp. 559, april 2002.
- [22] F.J. and Corté ands, J.A. and Dí andez, L. and Entrambasaguas, J.T. Canete, "A channel model for power line communications," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 12, pp. 166 -174, december 2011.
- [23] D. Chariag, D. Guezgouz, Y. Raingeaud, and J.-C. Lebunetel, "Channel modeling and periodic impulsive noise in power line communications," in *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011*, pp. 277-282.
- [24] D. and Raingeaud, Y. and Lebunetel, J.-C. Guezgouz, "SPICE model for the PLC propagation channel in power line communications," in *Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on*, pp. 1-6, march 2010.
- [25] A. Bergaglio, U. Eula, M. Giunta, and A. Gnazzo, "Powerline effects over VDSL2 performances," in *Power Line Communications and Its Applications. ISPTL, 2008*, pp. 209-212.
- [26] K. Salehian, Yiyan Wu, S. Lafleche, G. Gagnon, and C. Einolf, "Field Measurements of EM Radiation from Power Line Telecommunications (PLT) Devices," *Broadcasting, IEEE Transactions*, vol. 57, no. 1, pp. 57-65, March 2007.
- [27] A. Zaballos, A. Vallejo, J.J. Jimenez, and J.M. Selga, "QoS Broker based architecture design for the power line communications," in *Communications and Its Applications, 2009*, pp. 205-210.
- [28] Avril G, *Etude et Optimisation des Systèmes à Courants Porteurs*, 2008, thesis of "Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, France".



- [29] S.-G. Yoon and S. Bahk, "Adaptive Rate Control and Contention Window-Size Adjustment for Power Line Communications," *IEEE Transactions*, vol. 26, no. 2, pp. 809-816, 2011.
- [30] J.A. Cortes, L. Diez and J.T. Entrambasaguas, F.J. Canete, "Analysis of the Cyclic Short-Time Variations in Power Line Communications," *Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, pp. 1327-1338, July 2006.
- [31] K.J. Jian Sun and Karimi, "Small-signal input impedance modeling of line-frequency rectifiers," *IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 4, pp. 1489 -1497, oct 2008.
- [32] K.J. and Jian Sun Zhonghui Bing and Karimi, "Input Impedance Modeling and Analysis of Line-Coupled Rectifiers," *IEEE International Conference on Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE, 2007*, pp. 1981 -1987.
- [33] F. J. Cañete, *Caracterización y modelado de redes eléctricas interiores*. Málaga, España, 2004, Ph.D.
- [34] IEEE 1901 working group. (2012, Sep) Electrical Network and Topology.
- [35] Sarah Rönnerberg, *Power Line Communication and Customer Equipment.*, 2011.
- [36] G.I. Tsiropoulos, A.M. Sarafi, and P.G. Cottis, "Wireless-broadband over power lines networks: A practical approach," in *PowerTech, 2009 IEEE*, Bucharest, 2009, pp. 1-6.
- [37] N. Behlilovic, M. Hadzialic, and P. Begovic, "An approach to techno-economical analysis for power line networks," in *ELMAR, 2007*, pp. 129-133.
- [38] G. Betta, D. Capriglione, L. Ferrigno, and M. Laracca, "Experimental Performance Analysis of Power Line Communications for Indoor Applications," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008*.
- [39] A. and Sittichivapak, S. and Hongesombut, K. Maneerung, "Application of power line communication for indoor networks," in *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2011 Eighth International Conference on*, 2011, pp. 1-6.
- [40] Min-Soo Kim, Dong-Min Son, Young-Bae Ko, and Young-Hyun Kim, "A simulation study of the power line communication simulator-2," in *Power Line Communications and Its Applications, 2008*, pp. 99-104.
- [41] A. Brkanic, M. Hadzialic, and D. Borovina, "Effects of choice of MAC protocol on QoS parameters in power line networks," in *Power Line Communications and Its Applications, 2008*, pp. 285-288.
- [42] Byung-Seok Park, Cheul-Shin Kang, and Young-Hoon Lee, "Performance Evaluation and Modeling of Power Line Communications for Generation Communication and Networking," *IEEE Transactions on*, vol. 2, 2008, pp. 95-98.
- [43] E. Secerbegovic, Z. Begic, and H. Hodzic, "Simulation of advanced bandwidth broker implementation for power line networks," in *Power Line Communications and Its Applications, 2008*, pp. 139-142.
- [44] S. Sancha, F.J. Canete, L. Diez, and J.T. Entrambasaguas, "A Channel Simulator for Indoor Power Line Communications," *IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 2, pp. 809-816, 2011.

- Communications and Its Applications*, 2007, pp. 104-109.
- [45] Tae-Eung Sung, "Innovative PLC network design for bit loading algorithm and bistatic channel capacity," in *'09. IEEE 13th International Symposium*, 2009, pp. 447-451.
- [46] J.C. Vesga and Acuña G.G., "PLC Network Wizard 1.0: Herramienta software para el diseño de Redes de Comunicaciones," in *cuarto congreso internacional de telecomunicaciones tecnologias de la informacion y comunicaciones*, 2007, pp. 104-109.
- [47] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program Reference Manual," in *Boneville Power Administration*, 1989, pp. 1-100.
- [48] T.A. Papadopoulos, G.C. Argyropoulos, B.D. Sarantinos, and G.K. Papagiannis, "Analysis of Indoor PLC Channel Simulation Results," in *Power Tech*, 2007, pp. 1935-1940.
- [49] P. Mabel. [Online]. [www.scielo.org.ve/pdf/uct/v10n39/art06.pdf](http://www.scielo.org.ve/pdf/uct/v10n39/art06.pdf)
- [50] H.B. and Guzelgoz, S. and Guzel, T. and Arslan, H. Celebi, "Noise and channel statistics of indoor power line communication channels," in *Telecommunications (ICT), 2011 18th International Conference on*, 2011, pp. 523 -527.
- [51] S.R. Ronghong Mo and Ser Wah Oh and Yonghong Zeng and Lie, "Channel estimation for power line communication noise exploiting real signal transmission," in *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*, 2009, pp. 149 -153.
- [52] and Qi Yinghao, and Huang Peiwei, and Cai Wenhao, Wang Bo, "Indoor powerline channel simulation for mobile and sensor networks," in *Mobile and Sensor Networks, 2007. (CCWMSN07). IET Conference on*, 2007, pp. 154 -157.
- [53] M. and Abe, J. Kitayama, "Channel model simulation technique for Power Line Communications," in *Power Line Communications and Its Applications, 2008. ISPLC 2008. IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 104-109.
- [54] D. and Guezgouz, D. and Le Bunetel, J.-C. and Raingeaud, Y. Chariag, "Modeling and Simulation of Temporal Variations in Indoor Power-Line Network," in *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2012, pp. 1800 -1808.
- [55] W. David Kelton Averill M. Law, *Simulation and Modeling Analisis*, tercera ed.: Mc Graw Hill.
- [56] T. and Galli, S. Banwell, "A novel approach to the modeling of the indoor power line channel part I: circuit model," in *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 2, pp. 655-663, april 2005.
- [57] S. and Banwell, T. Galli, "A novel approach to the modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function model," in *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 2, pp. 1869-1878, april 2005.
- [58] C. and Machmoum, M. and Diouris, J.F. Konate, "Multi path Model for Power Line Communication Channel up to 30MHz," in *EUROCON, 2007. The International Conference on #34;Computer as a Tool #34;*, 2007, pp. 98-101.
- [59] M. and Hosseinzadeh, N. and Vu, H.L. and Moazzeni, T. and Chuan Heng Foh Korke, "A channel model for indoor power line communication," in *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*, 2009, pp. 149 -153.

- smart grid," in *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES*, 2011, pp. 1 -7.
- [60] Vinay Kumar and Zahida, Mir Chandna, "Effect of varying topologies on the performance of broadband Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, april 2010, pp. 1-5.
- [61] Matthew N. O. Sadiku, *Elementos de electromagnetismo*, alfaomega, Ed.
- [62] F.J. and Diez, L. and Cortes, J.A. and Entrambasaguas, J.T. Canete, "Broadband modelling of Electronics, *IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 1, pp. 175 -183, feb 2002.
- [63] ITU-D, *TELETRAFFIC ENGINEERING HANDBOOK*. Denmark, 2001.
- [64] Pandu R. Tadikamalla, Edward J. Dudewicz, Edward F. Mykytka John S. Ramberg, "A Probability *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 201-214, May 1979.
- [65] Jorge Eduardo Ortiz Triviño. (2012, Agosto) INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE TELECOMUNICACIONES.  
<http://disi.unal.edu.co/profesores/jeortizt/EstadTel/Archivos/13.%20IntroduccionALaTeoriaDeTeletraf>
- [66] Yoan Pinzón. (2012) Universidad Nacional. [Online]. <http://disi.unal.edu.co/ypinzon/2016699/docs/20>
- [67] L.M. and Tennoe, M.T. and Henssonow, S.F. Surhone, *Spaghetti Stack.*: Betascript Publishing, 2011
- [68] The MathWorks, Inc. <http://www.mathworks.com/matlabcentral>.
- [69] Ministerio de TIC, Colombia. [Online]. <http://201.234.78.242/vivedigital/iniciativas.php>
- [70] (marzo, 2010) <http://ec.europa.eu>. [Online]. <http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20EN%20version.pdf>
- [71] D. Shaver, "Narrowband PLC solutions for AMI achieve long distance communications and flexible *Consumer Electronics (ICCE)*, 2011, pp. 603-604.
- [72] M.M. Rahman et al., "Medium access control for power line communications: an overview of the *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 6, pp. 183-191, June 2011.
- [73] (2011, nov) [https://www.homeplug.org/tech/ieee\\_1901](https://www.homeplug.org/tech/ieee_1901).