



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

**Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids.**

AUTOR:

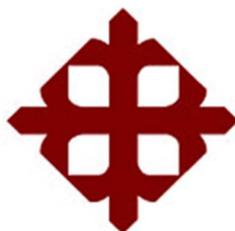
**Lenin Ricardo Bravo Rey**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de  
MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil 17 de agosto de 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Ing. **Lenin Ricardo Bravo Rey** como requerimiento para la obtención del título de **MASTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

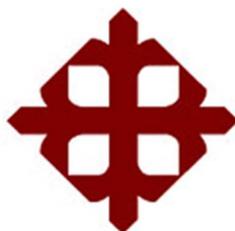
MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

---

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil 17 de agosto de 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Lenin Ricardo Bravo Rey**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación “**Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids**”. Previo a la obtención del Título de **Magister en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

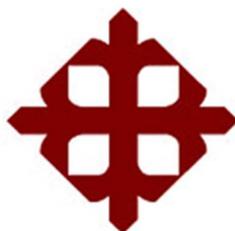
En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil 17 de agosto de 2018

EL AUTOR

---

LENIN RICARDO BRAVO REY



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Lenin Ricardo Bravo Rey**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación “**Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil 17 de agosto de 2018

EL AUTOR

---

LENIN RICARDO BRAVO REY

# REPORTE DE URKUND

The screenshot displays the URKUND web interface. The main content area shows the following details for a document:

- Documento:** Tesis Lenin Bravo 3er avance.docx (D35619465)
- Presentado:** 2018-02-14 11:29 (-05:00)
- Presentado por:** orlandophilco\_7@hotmail.com
- Recibido:** orlando.philco.ucsg@analysis.orkund.com
- Mensaje:** TT LENIN BRAVO [Mostrar el mensaje completo](#)

A yellow highlight indicates that 4% of the 24 pages consist of text present in 2 sources. To the right, a 'Lista de fuentes' (List of sources) panel is open, showing a table with columns for 'Categoria' and 'Enlace/nombre de archivo'. The sources listed are:

Categoria	Enlace/nombre de archivo
	<a href="https://repository.iceai.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/5654/5/Smart...">https://repository.iceai.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/5654/5/Smart...</a>
	<a href="http://docplayer.es/5103703-Arquitectura-de-una-red-han-home-area-network-or...">http://docplayer.es/5103703-Arquitectura-de-una-red-han-home-area-network-or...</a>
	<a href="#">Final Caso de Estudio Ing. Su--rez Diego.docx</a>
	<a href="#">Tesis Maestria UCSG Paola Santos.docx</a>

Below the document details, the following text is displayed:

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids.

AUTOR: Lenin Ricardo Bravo Rey

Trabajo de titulación previo

a la obtención del grado de MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

Guayaquil, Ecuador

01 de febrero del 2017

The bottom of the screenshot shows a taskbar with several open PDF files: 'Urkund Report - T...pdf', 'Urkund Report - T...pdf', 'Tesis JAIME BRA...docx', and 'Urkund Report - T...pdf'. A 'Mostrar todo' button is also visible.

Reporte Urkund del Trabajo de Titulación denominado: **Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids**. Del ing. Lenin Bravo Rey, con 4 % de coincidencias.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos primero a Dios que sin él no existe nada y agradecer a mis padres Jaime Bravo y Gemny Rey, quienes han sido el pilar fundamental para mi desarrollo personal y académico, es a ellos que les debo todo lo que soy, gracias a su apoyo incondicional y amor que toda la vida me han demostrado he logrado conseguir mis metas, gracias a sus consejos, al ejemplo de humildad, al amor y al esfuerzo que demuestran cada día he logrado ser una persona de bien, un buen ciudadano y un buen profesional, a ellos les debo toda mi vida por lo que les doy las gracias por todo.

**EL AUTOR**

**LENIN RICARDO BRAVO REY**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis principalmente a mi esposa Andrea Torres y a mi hijo Julián Bravo, ellos son mi motor de vida, es por ellos que día a día hago mi mayor esfuerzo para ser el mejor padre, el mejor esposo, el mejor amigo, para que tengan en mí alguien con quien contar incondicionalmente, el esfuerzo y la constancia traen frutos maravillosos y en esta vida hay que luchar por lo que deseamos sin olvidar lo más importante que es el amor y tener con quien compartirlo.

Una vez escuche que cada ser humano es la consecuencia de los actos y decisiones que toma durante el trayecto de la vida, pero también interactúan las personas que conocemos en ese trayecto es por esa razón que les dedico esta tesis a todos mis amigos, a mis familiares, a mis compañeros de trabajo y en especial a todos mis docentes quienes han aportado sus conocimiento para mi formación académica y personal.

**EL AUTOR**

**LENIN RICARDO BRAVO REY**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

Ing. Manuel Romero Paz, MSc.

TUTOR

f. \_\_\_\_\_

Ing. Orlando Philco Asqui, MSc.

REVISOR

f. \_\_\_\_\_

Ing. Celso Bohorquez Escobar, MSc.

REVISOR

f. \_\_\_\_\_

Ing. Manuel Romero Paz, MSc.

DIRECTOR DEL PROGRAMA

## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tablas .....	XIII
RESUMEN .....	XIV
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
1.1. Introducción. ....	16
1.2. Antecedentes.....	17
1.3. Justificación del Problema. ....	19
1.4. Definición del Problema.....	19
1.5. Objetivos del Problema de Investigación. ....	20
1.5.1. Objetivo General.....	20
1.5.2. Objetivos Específicos.....	20
1.6. Hipótesis.....	20
1.7. Metodología de Investigación. ....	21
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>22</b>
2.1. Sistemas Dinámicos.....	22
2.2. Sistemas Lineales .....	22
2.3. Sistemas Lineales Invariantes LTI .....	23
2.4. Sistemas Lineales variantes en el tiempo LTV.....	23
2.5. Análisis de sistemas lineales variantes en el tiempo en líneas de transmisión o PLC.....	23
2.6. Variables de una línea de transmisión.....	25
2.7. Comunicación por la red Eléctrica PLC.....	25
2.8. Clasificación de la red PLC.....	26
2.9. Red inteligente de distribución de energía eléctrica Smart Grid. ....	27
2.10. Estructura de comunicación de las redes inteligentes .....	27
2.11. Introducción al modelado y simulación en redes energéticas inteligentes .....	29
2.12. Modelos de Simulación.....	32
2.13. Modelo Conceptual y la Interoperabilidad.....	34
2.14. Representación de modelos de simulación .....	36
2.14.1. Representación estructural.....	36
2.14.2. La representación del comportamiento. ....	36

2.15.	Propiedades de los modelos de Simulación .....	37
2.15.1.	Variables.....	37
2.15.2.	Parámetros.....	37
2.15.3.	Escenarios. ....	37
2.16.	Agentes, modelos y simulación del sistema.....	38
2.17.	Modelamiento de sistemas de energía eléctrica .....	38
2.18.	Modelos de Sistemas Energéticos Basado en Agentes .....	39
2.19.	El enfoque del modelado .....	40
2.20.	Herramientas de simulación y modelización más utilizadas. ....	41
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA UTILIZADA Y PROPUESTA DE ESTUDIO ..</b>		<b>43</b>
3.1.	Análisis del funcionamiento de las redes PLC.....	43
3.2.	Estructura , Modelos y simulación de canales LTV para PLC .....	44
3.3.	Modelo multitrayectoria para la comunicación por línea Eléctrica PLC con cargas conectadas a la red eléctrica de Manfred Zimmermann y Klaus Doster .....	47
3.4.	Modelo de Holger Philipps (ECO).....	49
3.5.	Modelo Circuito Resonante Serie.....	52
3.6.	Análisis de Simulación de los modelos Multitrayectoria de Manfred Zimmermann y Klaus Doster y Modelo de línea con N elementos de cascada Circuito Resonante Serie de Holger Philipps. ....	55
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>59</b>
<b>Bibliografía .....</b>		<b>61</b>
<b>GLOSARIO.....</b>		<b>64</b>

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

FIGURA 2. 1 : Completo modelo de canal variante en el tiempo.....	24
FIGURA 2. 2 : Red inteligente infraestructura de comunicación.....	28
FIGURA 2. 3: Modelo basado en agentes siendo entidades autónomas e independientes, interactúan entre sí y tienen una visión limitada de su entorno.....	30
FIGURA 2. 4: Arquitectura del Núcleo del Sistemas.....	31
FIGURA 2. 5: El modelado y simulación proceso en el marco de su sistema del mundo y observó un experimento adaptado de Zeigeler (1984); Vangheluwe et al (2002). .....	32
FIGURA 2. 6: El Modelado y Simulación proceso como un proceso iterativo. Adaptado por Refsgaard & Henriksen, (2014). .....	33
FIGURA 2. 7: Interaction of actors in different Smart Grid Domains through Secure Communication Flows (NIST, 2010a, p.33). .....	35
FIGURA 2. 8: Número de publicaciones de determinadas palabras clave encontradas en el ISI Web of Knowledge para el período 1990-2012. A la izquierda, por agente general sistemas; a la derecha, de los sistemas relacionados con el agente. ....	39

### Capítulo 3

FIGURA 3. 1: Elementos principales que integran una estructura del sistema para representar un canal PLC en hogares.....	454
FIGURA 3. 2 Modelo de dispositivo como bipolo activo .....	465
FIGURA 3. 3 Diagrama funcional del modelado estructural de canal.....	476
FIGURA 3. 4: Modelo Eco .....	510
FIGURA 3. 5: Respuesta de impulso de medición y modelo de eco.....	510
FIGURA 3. 6: Función de transferencia y características de fase de medición del modelo de eco.....	521
FIGURA 3. 7: Modelo Circuito Resonante Serie.....	532
FIGURA 3. 8: Características en amplitud y fase de un circuito resonante serie .....	543
FIGURA 3. 9: Modelo del circuito resonante serie .....	543
FIGURA 3. 10: Gráfico de la función de transferencia del modelo Multitrayectoria con 4 cargas .....	565
FIGURA 3. 11: Circuito resonante RLC .....	576
FIGURA 3. 12: Salida de la impedancia de entrada del circuito de la serie RLC.....	587

## Índice de Tablas

### Capítulo 3

<b>TABLA 3. 1 : Tipos de Modulación.....</b>	<b>44</b>
--	-----------

## RESUMEN

El trabajo de titulación Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids, se origina por el desconocimiento y poca información que pueden proporcionar las empresas del sector eléctrico en este campo, vista desde el punto de suministrar el servicio de entrega de datos e internet a los hogares desde sus infraestructuras ya que como tal no lo ofrecen al mercado y solo lo realizan como apoyo para recolectar información interna en algunos sectores dependiendo de la infraestructura montada, la finalidad de este tema de tesis fue analizar el comportamiento de la transmisión de datos a través de canales variables con el tiempo en redes energéticas inteligentes o Smart Grids de forma simulada a través de estudios realizados por autores diferentes que determinan sus propios modelos, entre los principales enfoques teóricos en los que se sustenta el abordaje del problema o tema de investigación están los diferentes sistemas de modelación existentes, como se transfieren y que elementos conforman una comunicación por una red eléctrica PLC, clasificación de las redes PLC, estructura de comunicación de las redes inteligentes y diferentes modelos de simulación escogidos, se utilizó una metodología investigativa explicativa ya que se determinó las causas del fenómeno como ocurre, por que ocurre y bajo qué condiciones lo hace analizando casos explicativos encontrados, como conclusiones se encuentra que cada modelo estudiado muestran diferentes efectos y alteraciones producidos sobre el comportamiento del canal y la estructura de la red, así mismo que cada uno proponen modelos matemáticos diferentes basados en la estructura física.

Palabras claves

Modelación, simulación, transmisión, redes energética.

## ABSTRACT

The work of titling Modeling and simulation of variable transmission media with time for PLC in smart energy networks or Smart Grids, originates from the lack of knowledge and little information that companies in the electricity sector can provide in this field, as seen from the point of view. provide the service of data delivery and internet to homes from their infrastructures and as such do not offer it to the market and only perform it as a support to collect internal information in some sectors depending on the infrastructure assembled, the purpose of this thesis topic was to analyze the behavior of the transmission of data through variable channels over time in smart energy networks or Smart Grids in a simulated way through studies carried out by different authors that determine their own models, among the main theoretical approaches in which supports the approach of the problem or research topic are the different existing modeling systems, how they are transferred and what elements make up a communication by a PLC electrical network, classification of PLC networks, communication structure of smart networks and different simulation models chosen, an explanatory investigative methodology was used since the causes of the phenomenon were determined as it happens, why it occurs and under what conditions it does so by analyzing explanatory cases found, as conclusions are found that each model studied shows different effects and alterations produced on the behavior of the channel and the structure of the network, as well same that each one proposes different mathematical models based on the physical structure.

### Keywords

Modeling, simulation, transmission, energy networks..

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Introducción.**

De acuerdo a lo manifestado por Electric (Institute Electric Power Research, 2000), desde principios del siglo 21, se denota grandes expectativas para lograr las mejoras en la tecnología de la comunicación electrónica con el fin de resolver las grandes limitaciones y costos en redes eléctricas esto se han hecho cada vez más evidente. La restricción o barreras tecnológicas en la medición ya no fuerzan los precios de energía pico para ser promediados a cabo y se transmite a todos los consumidores por igual.

De la misma manera hay gran incertidumbre e intranquilidad por el daño ambiental de las centrales eléctricas que usan combustible como el diésel, lo que ha estimulado el deseo de utilizar grandes cantidades de energía renovable, como la energía eólica y la energía solar, por lo tanto, por lo que para este tipo de sistemas se necesita sistemas de control más complejos y modernos, para facilitar así la conexión de las fuentes a una red altamente controlable.

Otro aspecto muy importante que se considera hoy en día, para la construcción de redes eléctricas inteligentes menos dependientes de las centrales eléctricas, es el progresivo crecimiento de organizaciones terroristas que toman como objetivos de ataque las centrales eléctricas de los países.

Las redes energéticas inteligentes o Smart Grids se definen según (Sevilla & Fernández, 2013) como la integración dinámica de los desarrollos de Ingeniería Eléctrica, (es el campo de la ingeniería que se ocupa del estudio y la aplicación de la electricidad, la electrónica y el electromagnetismo), almacenamiento energético y los avances de la tecnología de la información y comunicación dentro del negocio de la energía eléctrica y que además utiliza diferentes medios guiados y no guiados para transmitir la electricidad y datos hacia los hogares.

La red inteligente se define así porque son redes eléctricas donde la electricidad no solo va hacia un sentido, sino que es bidireccional. Ahora, las viviendas y distintos negocios pueden en un momento dado convertirse también en pequeños productores de electricidad y no solo consumidores.

El término red inteligente se asocia a menudo con el concepto de medidores inteligentes capaces de ofrecer una facturación detallada por franjas horarias, lo que permitiría a los consumidores no solo el elegir las mejores tarifas de entre las diferentes empresas eléctricas, sino también discernir entre las horas de consumo, lo que a su vez permitiría un mejor uso de la red. Este sistema también permitiría mapear con más precisión el consumo y anticipar mejor las necesidades futuras a nivel más local. (Educa, 2014)

El objetivo de esta investigación es analizar a través de la simulación el comportamiento de la transmisión a través de canales variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids, para lo cual primero se debe comprender el funcionamiento de las redes energéticas inteligentes o Smart Grids en la industria eléctrica e informática, analizar los diferentes tipos de medios de transmisión variable con el tiempo que funcionan en las líneas eléctricas de comunicación PLC, en redes inteligentes internas en hogares u oficinas y presentar la simulación y análisis de las variaciones de los diferentes medios de transmisión variables con el tiempo en las líneas eléctricas de comunicación PLC, en redes inteligentes o Smart grid internas en hogares u oficinas, con la finalidad de describir las conclusiones finales. (Pedraza, 2012)

## **1.2. Antecedentes.**

Los medios de transmisión variables con el tiempo para la comunicación en las redes energéticas inteligente o Smart Grid, pueden ser guiados y no guiados, los guiados son cables de líneas energéticas, cable de par trenzado y fibra óptica, estos pueden combinarse en una red LAN interior en un domicilio o para una oficina, en los antecedentes investigados se pudo hallar un trabajo doctoral realizado por Francisco Javier Cañete Corripio, llamado

Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha (Corripio F. J., Caracterización y modelado de redes eléctricas interiores como medio de transmisión de Banda Ancha, 2004) , donde el objetivo que busca esta tesis doctoral es el construir un simulador de canal que genera los parámetros de comportamiento a partir de datos sobre los elementos físicos que componen una red eléctrica, como metodología primero realiza el abordaje de la aplicación de sistemas de transmisión en interiores de viviendas o pequeñas oficinas como medio de transmisión de banda ancha, para esto lleva a cabo la caracterización de sus diferentes propiedades mediante medidas y se debate diferentes modelos de canal, finalmente se puntualiza correctamente el comportamiento observado, los resultados del simulador permitieron estudiar las prestaciones esperables en estos canales y sus variaciones a lo largo del tiempo, además concluye que es una herramienta útil para probar técnicas de transmisión y recepción que saquen partido a las posibilidades del medio.

El grupo nuevas tecnologías en telecomunicaciones (GNTT) de la facultad de ingeniería electrónica y telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, Colombia integrada por Dora Juliana Martínez Cerón, Edwin Humberto Muñoz Ramírez, Giovanni López Perafán y Diego Enrique Perea, escriben un artículo científico llamado modelado de sistemas de transmisión OFDM y GMSK (Martínez, Muñoz, López, & Perea, 2004), para comunicación de datos por líneas eléctricas PLC (powerline communication), con el objetivo principal de presentar un diseño de un sistema de comunicación utilizando dos esquemas de modulación que son ampliamente utilizados en la actualidad en los equipos PLC como el OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation) y GMSK (Gaussian Mean Shift Keying), la metodología usada es primeramente la descripción de las etapas de la simulación de los transmisores y receptores implementados en matlab y se presenta a reglón seguido un análisis de los resultados los cuales fueron que al comparar los dos esquemas de modulación OFDM y GMSK sobre el canal PLC los resultados de probabilidad de error por bit vs relación señal ruido muestra que usando la técnica GMSK es ligeramente mejor que OFDM en algunos casos, en estas pruebas no se consideró en la simulación el ruido impulsivo donde el esquema de modulación OFDM puede

presentar ventajas debido a su posibilidad de adaptar la potencia y tipo modulación por portadora de acuerdo con las características espectrales del canal y el ruido, adicionalmente se encontró que OFDM presenta ventajas sobre GMSK en los aspectos como, reducción de interferencia íntersimbólica y entre canales, menor potencia de transmisión, y ahorro de ancho de banda por sus características de ortogonalidad y superposición (eficiencia espectral).

### **1.3. Justificación del Problema.**

Las redes de transmisión por líneas eléctricas son muy utilizadas por las empresas eléctricas en el Ecuador como medio de transmisión de datos de banda ancha, utilizando medidores inteligentes con tecnología AMI que significa infraestructura avanzada de medición, el cual los medidores se interconectan entre sí, recibiendo información que luego es enviada a un colector, y este a su vez la envía a las redes de la empresa eléctrica, además tienen el sistema de corte y reconexión que se lo maneja desde la empresa directamente, también se puede consultar el consumo eléctrico, el cual se puede ver desde un teléfono celular descargando una aplicación desde la web o desde una computadora ingresando al internet y dirigiéndose a la página web de la institución introduciendo el código de la factura, sin embargo La empresa del estado Corporación Nacional de Electricidad CNEL en la provincia del Guayas no ofrece los servicio de última milla para transmitir datos o internet hacia los hogares, ni tampoco es muy utilizable equipos o dispositivos para redes PLC, lo que hace importante modelar y simular los medios de transmisión en redes PLC internas para hogares, exponer sus características, propiedades, funcionamiento, ventajas y desventajas que estas tienen con respecto a las redes que utilizan el modem y cable trenzado o medio inalámbrico para transmitir datos internamente en una oficina u hogar.

### **1.4. Definición del Problema.**

Poco conocimiento y gran incertidumbre en la población en la existencia de otros medios para transmitir datos dentro del hogar u oficinas utilizando y

combinando de forma híbrida las redes eléctricas con el cable par trenzado y fibra óptica.

## **1.5. Objetivos del Problema de Investigación.**

### **1.5.1. Objetivo General.**

Analizar a través de la simulación el comportamiento de la transmisión a través de canales variables con el tiempo en redes energéticas inteligentes o Smart Grids.

### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

- Caracterizar el funcionamiento de las redes energéticas inteligentes o Smart Grids en hogares u oficinas.
- Analizar los diferentes tipos de medios de transmisión variable con el tiempo que funcionan en las líneas eléctricas de comunicación PLC, en redes inteligentes internas en hogares u oficinas.
- Simular un entorno de las variaciones de los diferentes medios de transmisión variables con el tiempo en las líneas eléctricas de comunicación PLC, en redes inteligentes o Smart grids internas en hogares u oficinas

## **1.6. Hipótesis.**

El dominio de los aspectos teóricos, y de modelación de los canales variables con el tiempo en PLC permitiría la simulación de sistemas PLC con fines de investigación y desarrollo.

## **1.7. Metodología de Investigación.**

Este trabajo de titulación utiliza el método investigativo explicativo, ya que se debe determinar la causa del fenómeno, por que ocurre, bajo qué condiciones se presenta, analiza casos explicativos y usa simulaciones, experimentos o cuasi-experimentos, pero también análisis de casos explicativos.

Adicionalmente es descriptiva porque se explican parámetros y conceptos relacionados y se han realizado estudios predictivos mediante simulaciones que permitirán determinar la mejor opción para el desarrollo del proyecto.

## **CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1. Sistemas Dinámicos**

El análisis de sistemas de control conlleva a modelar sistemas dinámicos y sus características, un modelo matemático de un sistema dinámico se describe (Ogata, 2003) como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión, considerando que un modelo matemático no es el único para un sistema determinado y que se puede representar de muchas formas diferentes dependiendo de cada caso.

Los diferentes tipos de sistemas sean estos, térmicos, económicos, biológicos o mecánicos se definen en términos de ecuaciones diferenciales y estas se obtienen de las leyes físicas como la de Kirchhoff en sistemas eléctricos o la de Newton en sistemas mecánicos como para citar un ejemplo.

### **2.2. Sistemas Lineales**

Un sistema se denomina lineal según (Ogata, 2003), cuando se aplica el principio de superposición, lo que quiere indicar que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de entrada diferentes es la suma de las dos respuestas individuales, por lo que para el sistema lineal, la respuesta a varias entradas se calcula tratando una entrada cada vez y sumando los resultados, por lo que permite desarrollar soluciones difíciles para la ecuación diferencial lineal a partir de soluciones fáciles o simples.

Un sistema se considera lineal cuando en la investigación experimental de un sistema dinámico son proporcionales de causalidad o sea la causa y el efecto lo cual se evidencia el principio de superposición.

### **2.3. Sistemas Lineales Invariantes LTI**

Los sistemas lineales invariantes se describen a través de ecuaciones diferenciales lineales siempre y cuando sus coeficientes son constantes o son funciones sólo de la variable independiente, estos sistemas se denominan sistemas lineales invariantes en el tiempo (de coeficientes constantes). (Ogata, 2003).

### **2.4. Sistemas Lineales variantes en el tiempo LTV**

Estos son sistemas que se representan mediante ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son funciones del tiempo, un ejemplo claro sobre estos sistemas de control variante en el tiempo son los sistemas de control de naves espaciales. (Ogata, 2003).

### **2.5. Análisis de sistemas lineales variantes en el tiempo en líneas de transmisión o PLC.**

El canal de una red típica PLC interna se caracteriza por una topología de bus (o troncal) con una distribución de ramas entre cada enlace de los extremos transmisor y receptor. Esta estructura implica que el ancho de banda de que dispone la red esta compartido por todos los puntos conectados a ella.

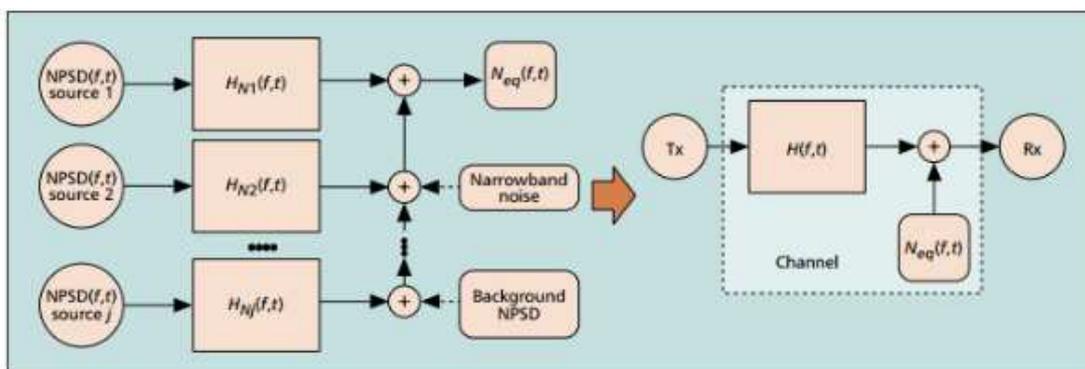
Un canal PLC se puede analizar por medio del modelo de una línea de transmisión. En todo medio de comunicación cableado se cuenta con un extremo transmisor y un extremo receptor, cada uno caracterizado por una fuente generadora, su impedancia fuente y por una impedancia de carga respectivamente. (Velásquez, Zambrano, & Medina, 2014)

Una línea de transmisión es cualquier sistema de conductores o semiconductores, o la combinación de ambos, que puede utilizarse para transmitir entre dos puntos, en forma de energía electromagnética por lo que un análisis completo de cualquier problema que utiliza señales que varían con

el tiempo, se puede hacer solamente usando la teoría electromagnética expresada por las ecuaciones de Maxwell, con el reconocimiento explícito de que los campos eléctrico y magnético del problema en sí, son las variables físicas primarias. (Caltenco J.H., 2014).

Las líneas de transmisión reales emplea el concepto idealizado de resistencias, de inductancias y de capacitancias de dos terminales para representar las funciones localizadas de disipación y de almacenamiento de energía en campos eléctricos y magnéticos según (Caltenco J.H., 2014). Los voltajes y las corrientes que están relacionados a los campos eléctrico y magnético por medio de expresiones integrales o diferenciales, son las variables eléctricas primarias.

Las redes eléctricas como canal de comunicación se caracterizan normalmente por ser sistemas lineales pero variables en el tiempo (Corripio F. C . Arrabal del Río L. D, 2006), esta propiedad de variación en el tiempo es producto de los equipos conectados en la línea de transmisión. Muchos equipos están compuestos por elementos no lineales; y otros, que pueden no contener no-linealidades, presentan cambios continuos cuando se encuentran operando a elevados niveles de frecuencia. La variación en el tiempo conlleva a su vez a una variación en la impedancia de carga, lo que implica que el canal sea LTV



**FIGURA 2. 1** : Completo modelo de canal variante en el tiempo

**Fuente:** (Cañete Francisco Javier, 2003)

## 2.6. Variables de una línea de transmisión.

Las variables de una línea de transmisión son la inductancia, capacitancia, resistencia y conductancia se pueden calcular para cada caso especial en la línea si se sabe sus dimensiones y la frecuencia de operación, el proceso matemático está dado por las siguientes formulas

Baja frecuencia

$$L = \frac{\mu}{\pi} \left[ \frac{1}{4} + \cosh^{-1}(d/2a) \right] \quad R = \frac{2}{\sigma_c \pi a^2}$$
$$C = \frac{\pi \epsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)} \quad G = \frac{\pi \sigma_d}{\cosh^{-1}(d/2a)}$$

Alta frecuencia

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1}(d/2a) \approx \frac{\mu}{\pi} \ln(d/a) \quad (a \ll d)$$
$$C = \frac{\pi \epsilon}{\cosh^{-1}(d/2a)} \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln(d/a)}, \quad (a \ll d)$$
$$R = \frac{1}{\pi a k \sigma_c} \quad G = \frac{\pi \sigma_d}{\cosh^{-1}(d/2a)}$$

## 2.7. Comunicación por la red Eléctrica PLC

La comunicación por la red eléctrica (PLC) utiliza la línea de alimentación eléctrica existente como medio para transmitir y recibir datos. La tecnología PLC a inicios fue utilizada para el control y el mando del aparato eléctrico en el campo industrial con una tarifa de datos muy baja. En los últimos años ha habido un gran interés en PLC como una de las tecnologías candidatas para la comunicación de datos y la distribución multimedia en el hogar o en el entorno de la pequeña oficina. (Lee, 2011)

Varios grupos han lanzado el estándar industrial para la conmutación de la línea eléctrica de alta velocidad. Home Plug Powerline alliance en su página web <http://www.homeplug.org>. Indica que se estableció en el año 2000 y la versión Homeplug 1.0 estándar proporcionó 14 Mbps velocidad de datos sin procesar para la comunicación de datos. El estándar HomePlug AV, que es el

estándar más reciente para soportar aplicaciones multimedia, ofrece una velocidad de datos sin procesar de 200 Mbps. La Universal Power Line Association (UPS) lanzó la Especificación de Casa Digital (DHS) con el diseño de chips de DS2. La comunicación de línea de alta definición (HD-PLC) fue propuesta por Panasonic. El DHS y HD-PLC soportan 200Mbps de velocidad de datos sin procesar.

Lo más interesante de la comunicación de línea eléctrica es el uso de la red eléctrica existente para las comunicaciones. Así que el usuario puede comunicarse con sólo conectar el módem PLC en tomas de corriente en casa u oficina sin ningún trabajo adicional para la instalación de cable. Aunque la comunicación de línea de energía utiliza alambre para la comunicación tiene características similares con la comunicación inalámbrica, como LAN inalámbrica y Bluetooth en el punto de vista de la seguridad. (Lee, 2011)

## **2.8. Clasificación de la red PLC**

La clasificación de la red PLC se determina según donde esté ubicada y donde se despliegue, estas pueden ser de acuerdo a (Palancar, 2005):

Red PLC de Media tensión, esta tecnología se aplica a las líneas de media tensión como un sistema de transporte de datos que van desde los transformadores de alta y media tensión hasta los transformadores de media y baja tensión, sirve como una alternativa para otros medios de transporte de datos más onerosos como la fibra óptica entre otros.

Red PLC de Acceso, este es un sistema full dúplex punto a multipunto que se distribuye entre el transformador de media a baja tensión y la casa del abonado.

Red PLC Doméstica, esta se encuentra dentro de cada casa o edificio ya que cada uno cuenta interiormente con conexión a la red eléctrica, lo que supone un ahorro en infraestructura tanto en rapidez de instalación como en dinero, convirtiéndose cada toma eléctrica de la casa o edificio en un punto de

conexión para comunicación de datos, como una excelente alternativa a las redes LAN.

## **2.9. Red inteligente de distribución de energía eléctrica Smart Grid.**

La red inteligente es una nueva generación de red de distribución de energía eléctrica estándar. La infraestructura de comunicación es fundamental para el funcionamiento exitoso de las modernas redes inteligentes. El uso de las tecnologías de comunicación garantiza la reducción del consumo de energía, el funcionamiento óptimo de una red inteligente y coordinación entre todos los componentes de las redes inteligentes desde la generación hasta los usuarios finales. (Dmitry Baimel, 2016).

## **2.10. Estructura de comunicación de las redes inteligentes**

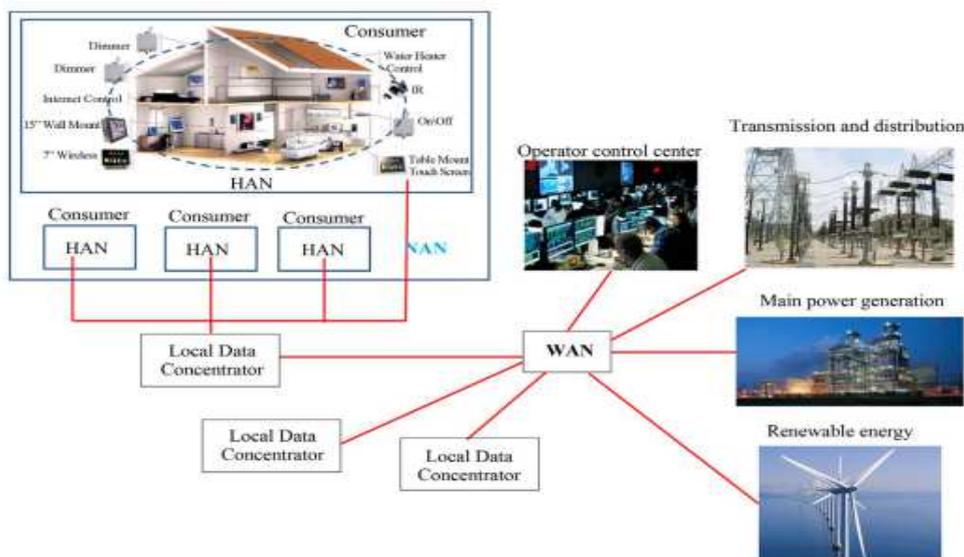
La infraestructura de comunicación de la red inteligente puede basarse en tres tipos de redes: Red de área local (LAN), Red de Área de Vecindad (NAN) y Red de Área Amplia (WAN). El diagrama esquemático de la infraestructura de comunicación de red inteligente basada en estas redes se muestra en la Figura 2.2, esta se compone por una estructura LAN que se despliega y opera dentro de una pequeña área (decenas de metros), generalmente una casa o una pequeña oficina. Los LAN tiene relativamente baja tasa de transmisión de datos en comparación con otras dos redes, cientos de bits por segundo (Bps).

En una implementación típica, un LAN consiste en una conexión a Internet de banda ancha que se comparte entre múltiples dispositivos a través de un módem cableado o inalámbrico. Permite la comunicación y el intercambio de recursos entre ordenadores, dispositivos móviles y otros dispositivos a través de una conexión de red. En la implementación de la red inteligente, todos los dispositivos que consumen energía y los contadores inteligentes pueden conectarse a la LAN. Los datos de los dispositivos se transmiten a través de LAN a los contadores inteligentes. LAN permite una gestión más

eficiente de la energía doméstica. LAN puede ser implementada por las tecnologías ZigBee o Ethernet.

LAN es desplegado y operado dentro de la zona de cientos de metros, que es en realidad pocos edificios urbanos. Los LAN pueden conectarse a una LAN y transmitir datos de la energía consumida por cada casa a la LAN red. La red LAN entrega estos datos a los centros de datos locales para su almacenamiento. Este almacenamiento de datos es importante para cobrar a los consumidores y análisis de datos para el reconocimiento de patrones de generación y demanda de energía.

La LAN tiene una velocidad de transmisión de datos de hasta 2 Kbps. La LAN puede implementarse mediante tecnologías. PLC, Wi-Fi y la WAN se despliega y opera en vastas áreas de decenas de kilómetros y consta de varias LAN y PMA. Además, la comunicación de todos los componentes de la red inteligente, incluyendo el centro de control del operador, Generación, transmisión y distribución de energía renovable, se basa en la WAN. La WAN tiene una transmisión muy alta de velocidad de datos hasta pocos Gbps. La WAN puede ser implementada por redes Ethernet, WiMAX, 3G / LTE y Micro-onda de transmisión. (Dmitry Baimel, 2016).



**FIGURA 2.2 :** Red inteligente infraestructura de comunicación  
**Fuente:** (Dmitry Baimel, 2016).

## **2.11. Introducción al modelado y simulación en redes energéticas inteligentes**

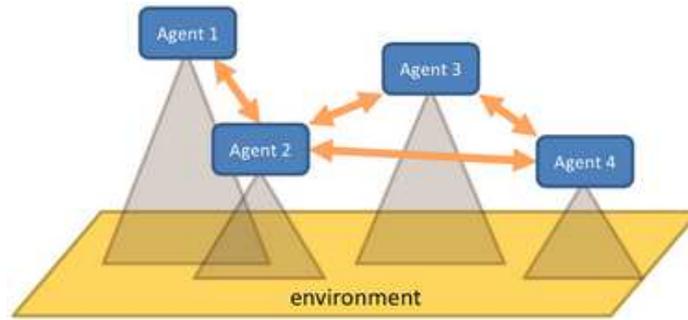
Los sistemas de energía eléctrica suelen ser de gran escala, estar interconectados, compuestos por redes a distintos niveles y con gran extensión geográfica. Además, en sistemas eléctricos muestra un comportamiento dinámico en el tiempo e integra muchos participantes con diferentes intereses y objetivos locales, que interactúan entre ellos y con el sistema.

Basándose en estas suposiciones, se puede concluir que se trata de un verdadero sistema complejo. Sistema complejo que a través de su modelación y simulación, se utiliza como una herramienta para recrear estos sistemas en un entorno virtual. Los avances actuales en potencia de cálculo computacional permiten la simulación de este tipo de sistemas dentro de márgenes de tiempo razonables. Una de las herramientas para la simulación de sistemas complejos son los modelos basados en agentes. Este tipo de modelo, centrado en los individuos del sistema, se basa en las entidades autónomas que pueden interactuar entre sí. (Kremers E. A., 2012)

Los modelos basados en agentes pueden ser acoplados a otros métodos de modelado, tales como los modelos continuos y eventos discretos, que se pueden empotrar en los agentes; o ejecutar en paralelo al sistema multi-agente. Para representar el sistema de energía eléctrica de forma sistémica y en varias capas, éste tiene que ser considerado como un verdadero sistema socio-técnico, en el que no sólo los modelos técnicos son tomados en cuenta.

Se han creado una serie de modelos diferentes de las partes de un sistema eléctrico, incluyendo la producción, la demanda y el almacenamiento.

Los modelos son desarrollados de la manera más simple posible, pero aun así cumpliendo sus objetivos definidos. Esto permite simular un sistema compuesto de gran número de modelos individuales en un marco integrado, que representa el sistema de manera integral.



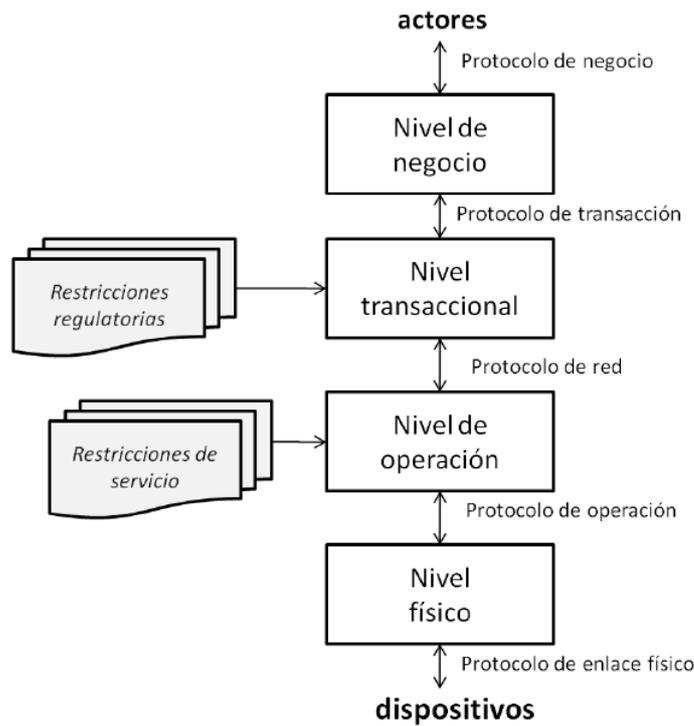
**FIGURA 2. 3:** Modelo basado en agentes siendo entidades autónomas e independientes, interactúan entre sí y tienen una visión limitada de su entorno.  
**FUENTE: (Kremers E. , 2012)**

Por otra parte, los modelos permiten incluir comportamientos sociales y otros aspectos no puramente técnicos, los cuales también influyen o interactúan con el sistema. Estos aspectos interdisciplinarios solo pueden ser considerados desde un punto de vista complejo, ya que trata con modelos de ámbitos muy distintos, pero aun así relacionados entre sí. Esto puede permitir la representación de efectos complejos emergentes en el sistema eléctrico tal y como sincronizaciones o efectos en cascada, que tienen mucho parecido con los fenómenos emergentes estudiados ya en la teoría de la complejidad aplicada a otros campos.

En general se puede decir que un enfoque desde los sistemas complejos puede ser muy útil para representar el sistema eléctrico desde un punto de vista integral, donde las interacciones entre diferentes escalas y niveles del sistema son fundamentales para la comprensión de causas y efectos.

Este tipo de interacciones serán de especial importancia en el caso de sistemas distribuidos y comunicantes, tal y como será el caso en la próxima generación de sistemas eléctricos, las Smart Grid o redes inteligentes. El uso de técnicas para simular sistemas complejos, como por ejemplo la modelización basada en agentes, permiten la simulación de efectos como los fenómenos emergentes, que pueden tener efectos importantes en los sistemas actuales y futuros. (Kremers E. A., 2012).

La red eléctrica es un sistema complejo que está en producción y, por tanto, resulta complicada la toma de decisiones estratégicas para una transición de una red actual. Se puede llevar a cabo una simulación experimental, a modo de laboratorio virtual para analizar el comportamiento y evolución en diversos escenarios futuros a partir de la situación actual.

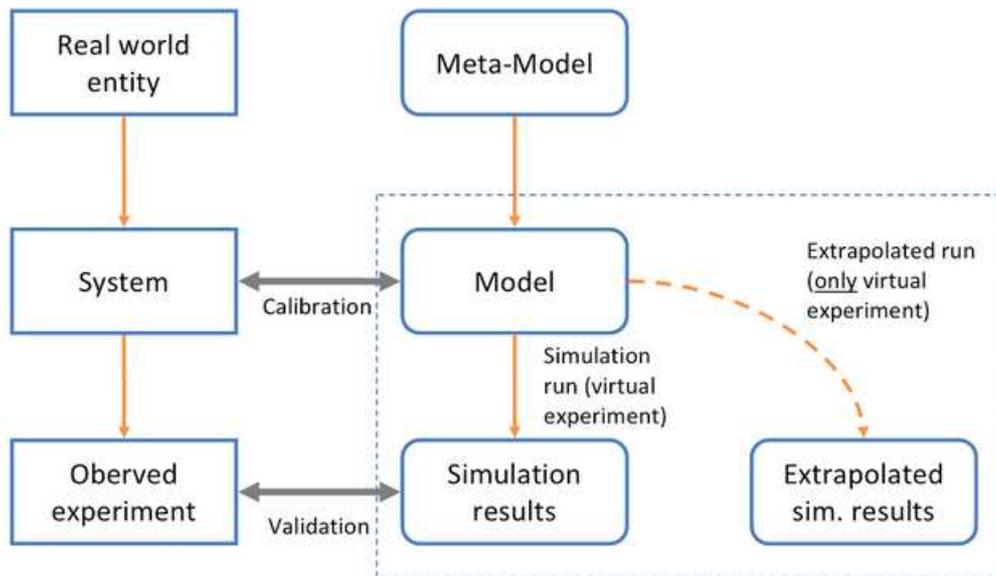


**FIGURA 2. 4:** Arquitectura del Núcleo del Sistemas  
**FUENTE:** (Kremers E. A., 2012).

Para el diseño de una red inteligente son importantes las herramientas de simulación, que permiten plantear y evaluar diferentes escenarios. En (Anderson, y otros, 2012) se plantea el diseño de subestaciones mediante el Programa GridSim® (Software de código abierto bajo la licencia GPL) que es un Toolkit (GridStat®) al programa TSAT™. En (Patel, Aparicio, Tas, Loiacono, & Rosca, 2011) se muestra la utilidad del programa OPNET® Modeler (Proporciona su software de forma gratuita a las universidades de todo el mundo para la investigación académica y la enseñanza), para realizar la simulación de redes de comunicaciones tanto inalámbricas como guiadas, para el diseño de la red de telecomunicaciones y la gestión de la energía eléctrica. Estas herramientas permiten realizar la simulación y optimización previa a la realización de una implementación o considerar una actualización tecnológica.

## 2.12. Modelos de Simulación

Los modelos computacionales pueden ser vistos como una metáfora de un modelo físico. Se suelen aplicar lo que se denomina un modelo conceptual, que no es una representación física concreta, sino una descripción abstracta de la realidad para ser representada. Mediante el uso de computadoras, los modelos pueden representar el objeto real en un entorno virtual, computacional, donde están implementadas usando diseños específicos (como los formalismos o lenguajes de programación). Esto permite que el rendimiento de los cálculos que sería demasiado difícil de cumplir de forma manual. (Kremers E. A., 2012)



**FIGURA 2. 5:** El modelado y simulación proceso en el marco de su sistema del mundo y observó un experimento adaptado de Zeigeler (1984); Vangheluwe et al (2002).

**FUENTE: (Kremers E. , 2012)**

Un modelo de simulación es un tipo especial de modelo, que es capaz de evolucionar con el tiempo. En contexto, haciendo que el modelo cambie sus miembros a lo largo del tiempo, o simplemente ejecutar, se llama simulación. No todos los modelos están preparados para estas tareas. En algunos casos, se tiene el objetivo de representar un sistema real como modelo, con el fin de llevar a cabo simulaciones sobre ella. Hay mucha literatura sobre modelización y simulación disponibles. El proceso de modelización y simulación está representado en la Figura 2.4, que muestra el aspecto de una simulación como

un experimento virtual. Después de haber creado un modelo para representar el sistema a ser analizado, experimentos virtuales se ejecutan en él. Esto permite que los experimentos se ejecuten, en lugar de un sistema real. Esto puede tener muchas ventajas, como experimentos reales pueden ser costosos, peligrosos o incluso imposibles de realizar en el sistema real. Hay una diferencia entre el resultado de simulación, que puede ser verificado contra un verdadero experimento sobre el sistema (y permite el modelo), y una extrapolación de simulación que se basa en un escenario que no puede ser validada en la realidad. La extrapolación permite el soporte de la toma de decisiones, al explorar las trayectorias futuras del sistema. La extrapolación es cualquier manipulación genérica de la situación, o incluso el modelo en sí, por la que se modifica, por lo que se ve en el mundo real. La extrapolación pueden ser estructurales, espaciales, temporales, etc., entre otros.

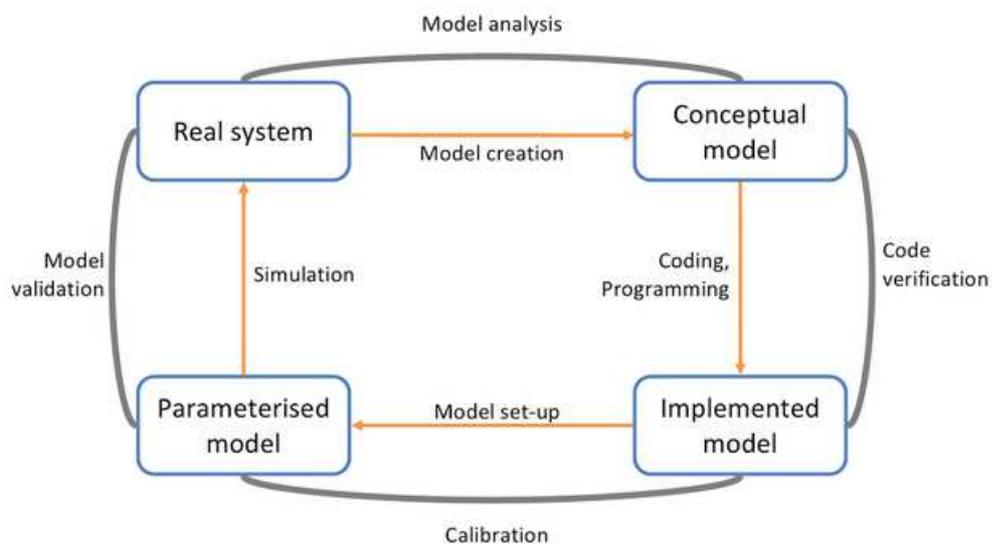


FIGURA 2. 6: El Modelado y Simulación proceso como un proceso iterativo. Adaptado por Refsgaard & Henriksen, (2004).

FUENTE: (Kremers E. , 2012)

Según Refsgaard & Henriksen, (2004). Dar una visión general del proceso de modelización y simulación que puede ser visto en Figura 2.4 los pasos principales son: la creación del modelo (o modelos), su aplicación en un formato computacional, la configuración (o hipótesis definición) y la simulación de carreras. En paralelo a estos pasos, la retroalimentación está indicada para garantizar la coherencia de cada paso del proceso. En particular, el paso de verificación asegura que el modelo es una aplicación correcta de las bases

conceptuales, o mental, la representación. La validación final paso compara y evalúa los resultados de la simulación en contra del sistema real. En este paso se verifica el grado en que el modelo es una representación adecuada de este sistema real.

### **2.13. Modelo Conceptual y la Interoperabilidad**

El Acta de Independencia Energética y Seguridad (EISA) de 2007 designa al National Institute of Standards and Technology (NIST) como eje para la coordinación y desarrollo de un marco y un modelo para Smart Grid. La hoja de ruta del NIST (2010a) constituye un plan de trabajo para la interoperabilidad de estándares para Smart Grid. Define un marco conceptual para examinar las necesidades en este ámbito, proporciona una lista de los estándares existentes, orienta la elaboración de las normas que guían las deliberaciones de la industria y establece un conjunto de medidas prioritarias para avanzar en los planes de estandarización del sector y mejorar la interoperabilidad de redes inteligentes.

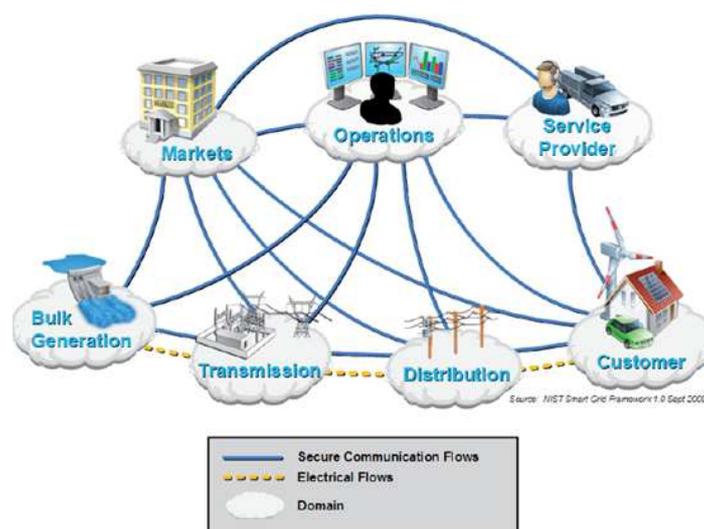
El modelo conceptual de Smart Grid del NIST es un conjunto de diferentes puntos de vista (diagramas) y descripciones que son la base fundamental para la discusión de las características, usos, comportamientos, interfaces, requisitos y estándares del ámbito de Smart Grid. Cabe resaltar que el modelo no representa la arquitectura final sino que es marco conceptual, una herramienta para describir y discutir el desarrollo de dicha arquitectura.

El modelo conceptual de la Figura 2 (NIST, 2010a) permite identificar y debatir los problemas de interoperabilidad para avanzar en la integración. Resalta las áreas clave del problema de interoperabilidad y puede ayudar a resolver problemas de interdependencias en el sistema eléctrico y otras infraestructuras, y además refleja el papel cada vez más importante de la tecnología.

El modelo conceptual se compone de varios *dominios*, cada uno de los cuales contiene muchas aplicaciones y los *actores*, que están conectados por las *asociaciones*, las mismas que tienen *interfaces* en cada extremo.

En el modelo los dominios se conectan o interactúan a través de interfaces de carácter eléctrico o conexiones de comunicaciones. En la Figura 2.5, las interfaces eléctricas se muestran con líneas discontinuas amarillas y las interfaces de comunicación con líneas continuas azules. Cada una de estas interfaces puede ser bidireccional. Las interfaces de comunicación no representan necesariamente conexiones físicas sino conexiones lógicas de información entre distintos dominios.

En la parte inferior del modelo se identifican las cuatro áreas funcionales en la que tradicionalmente se ha subdividido la red eléctrica: generación, transporte, distribución y consumo, entre las que la energía fluye en un solo sentido, desde el punto de generación hacia el usuario. Sin embargo, gracias a la implantación de los aspectos claves de Smart Grid (paradigma bidireccional, interactividad, la ya importante proliferación de las energías renovables y la prevista de los vehículos eléctricos) el modelo de red se alterará irremediabilmente.



**FIGURA 2. 7:** Interaction of actors in different Smart Grid Domains through Secure Communication Flows (NIST, 2010a, p.33).

**FUENTE: (Díaz & Hernández, 2011)**

El modelo conceptual descrito proporciona una perspectiva global de alto nivel. No es sólo una herramienta para la identificación de actores y posibles vías de comunicación en la red inteligente, sino también una forma útil para la identificación de las interacciones potenciales intradominio e interdominio, y las aplicaciones potenciales y capacidades habilitadas por estas interacciones.

## **2.14. Representación de modelos de simulación**

Según Burian, (2010). Hay dos tipos de relaciones sobre sistemas complejos.

**Relaciones estructurales:** Define qué partes están conectadas entre sí.

**Relaciones Funcionales:** Define el comportamiento o dinámica del sistema, cómo el cambio de estado de una parte influye en el estado de otras partes conectadas.

La separación de estos dos conceptos: estructurales y funcionales, desempeña un papel importante en una etapa inicial de análisis y comprensión de los sistemas complejos. Además esa diferenciación es ventajosa cuando la modelización y simulación de sistemas complejos.

Para describir un modelo de simulación, tiene sentido distinguir entre una representación estructural y del comportamiento.

### **2.14.1. Representación estructural.**

La descripción estructural del modelo muestra sólo el nombre y el tipo de atributos (parámetros, variables) y funciones (o métodos) del modelo puede ser visto como una caja negra, ya que define las interfaces internas y atributos, pero no el modo de operación del modelo.

### **2.14.2. La representación del comportamiento.**

Este describe cómo un modelo matemático evoluciona con el tiempo, es decir, cómo las variables definidas anteriormente cambian según

reglas dadas como expresiones matemáticas, algoritmos, o cualquier otro tipo de relaciones. La descripción del comportamiento siempre se basa en una descripción estructural ya que utiliza sus elementos como entradas y salidas (por ejemplo, el valor de una variable se actualiza según los valores de ciertos parámetros de evaluación de una ecuación).

## **2.15. Propiedades de los modelos de Simulación**

Los modelos de simulación tienen diferentes tipos de propiedades para caracterizar el modelo. Incluso si se describen ambos un valor del modelo en un momento dado, se diferencia entre variables y parámetros.

### **2.15.1. Variables.**

Como su nombre lo indica, son capaces de variar su valor a lo largo de la simulación. Normalmente se usan para las salidas o resultados intermedios o estados. Sus valores pueden ser leídos o evaluados, pero no suelen cambiar desde fuera del modelo.

### **2.15.2. Parámetros.**

En el otro lado, los valores de los parámetros son fijos para toda una simulación. Un parámetro es usado para describir un determinado estado que es intencionalmente fijado antes de ejecutar la simulación. Normalmente es constante. Sin embargo, el valor puede variar por ejemplo mediante diferentes instancias del mismo modelo.

### **2.15.3. Escenarios.**

De un conjunto de parámetros que describe las características de un proceso de simulación, Un escenario es una específica de la configuración inicial del modelo. Se puede ampliar un escenario en el que se describirán las acciones específicas. Un escenario puede describir eventos que pudieran afectar el modelo a ejecutar en un momento dado. Puede que estos sucesos discretos, como un repentino cambio de valor o estado inducido deliberadamente (que no son un resultado del modelo de comportamiento en sí mismo). Una variación

continua de un valor pueden ser parte de la descripción de escenarios, tales como la evolución de una temperatura o una población a lo largo del tiempo.

## **2.16. Agentes, modelos y simulación del sistema**

Los sistemas de agente han sido un campo emergente de investigación a lo largo de los últimos decenios. Los sistemas de agente estrechamente relacionadas con el estudio de los sistemas complejos. Se han aplicado en varias disciplinas, algunos de los cuales ya están bien establecidas (por ejemplo, la sociología o la biología, en relación con los estudios de comportamiento). Es difícil encontrar una definición común de estos sistemas, por lo tanto, este capítulo presentará los diferentes términos y definiciones que se encontraron, y se ponen de relieve las diferencias entre ellos.

Es generalmente aceptado que los sistemas de agente bien adecuado como herramienta para modelar y simular diferentes tipos de sistemas complejos. Ello permite representar muchas de las dinámicas que surgen en los sistemas a través de la simulación, y a estudiar sus efectos en un entorno virtual.

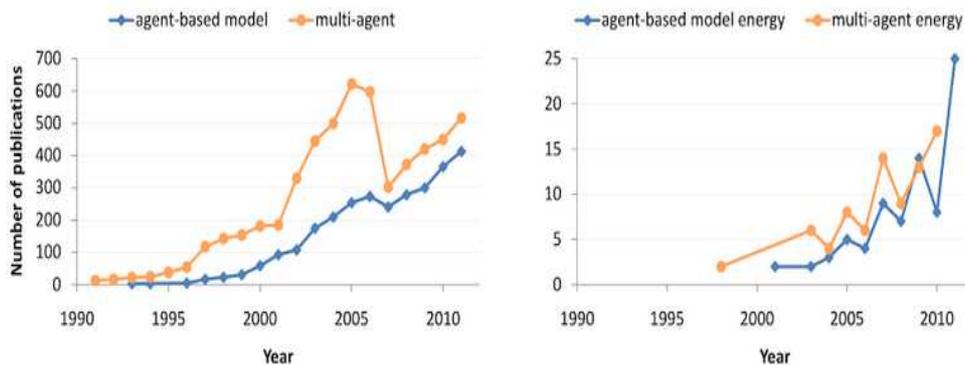
## **2.17. Modelamiento de sistemas de energía eléctrica**

Con el fin de representar a un sistema de energía como un sistema complejo a través de un enfoque basado en agentes, son necesario individualmente los componentes del modelo. Por lo tanto, se pone un especial énfasis en la modelización de los órganos o entidades del sistema, como se comportan en lugar de adoptar un enfoque macro-sistema de utilizar modelos estadísticos o media, representaciones de alto nivel. Las entidades del sistema eléctrico deben ser modeladas teniendo en cuenta sus estados individuales y modos de funcionamiento. Esto también puede ser llamado micro-modelado, como por ejemplo, el objetivo no es un modelado de consumidor por medios estadísticos, representando un promedio acumulado y comportamiento típico.

Más bien, cada hogar debe ser modelado, parametrizado por información que puede tomarse a partir de conjuntos de datos estadísticos.

## 2.18. Modelos de Sistemas Energéticos Basado en Agentes

Una búsqueda general en los términos del modelo basado en agentes y multi-agente muestra fuertemente un aumento del número de publicaciones que coinciden con esas palabras clave. Apenas se pueden encontrar publicaciones que datan de antes de 1990. Al agregar el término de energía a la búsqueda, un bajo número de publicaciones es encontrado, el cual denota el carácter innovador del uso de este enfoque en el sector de la energía.



**FIGURA 2. 8:** Número de publicaciones de determinadas palabras clave encontradas en el ISI Web of Knowledge para el período 1990-2012. A la izquierda, por agente general sistemas; a la derecha, de los sistemas relacionados con el agente.

**FUENTE: (Kremers E. , 2012)**

Modelos utilizando el paradigma basado en agentes están actualmente del estado-de-arte en algunos ámbitos del sector de la energía. En la mayoría de los casos, los agentes son representaciones de los actores del mercado para tratar el problema de la liberalización del mercado durante varios años se ha intentado mejorar los modelos económicos por la introducción de la heterogeneidad de los comportamientos en la más estática y homogénea, técnicas de modelado tradicionales. (Ríos & Rull, 1995).

Al igual que los modelos basados en agentes Sugarscape por (Epstein & Axtell, 1996) y en (Epstein, 2006) muestra la aparición de contra-intuitivo comportamientos relacionados con la toma de decisiones de agentes

heterogéneos. Estos enfoques muestran que cuanto más distribuidos espacialmente es un sistema, lo más importante es cuidar de las interacciones y las diferencias entre los agentes. En sistemas de energía el componente espacial es fundamental, especialmente si se tiene en cuenta medidas distribuidas, que son aplicadas localmente, como es el caso de la red inteligente.

Enfoques basados en agentes también han sido realizados en técnica y diseño e ingeniería de control eléctrico. En particular, los modelos relacionados con el control de pequeñas redes autónomas, llamado mini- o microgrids. Primeras aproximaciones sobre la aplicación MAS para el control de mini- o microgrids remota. (Tolbert et al, 2001) son aplicadas para el control centralizado y descentralizado de microgrids. (Dimeas & Hatziargyriou, 2005), el objetivo principal es presentar un sistema capaz de integrar varias funciones y proponer un plan general para el control de estos sistemas.

## **2.19. El enfoque del modelado**

Las herramientas de modelado basado en agentes son capaces de capturar el comportamiento de sistemas complejos, tales como la conducta emergente deseada y no deseada en estos sistemas, los eventos internos y externos, las comunicaciones dentro del sistema, etc., en particular, efectos locales de las unidades individuales que integran el sistema pueden ser modeladas y sus efectos pueden ser analizadas a nivel del sistema. Por otro lado, modelos técnicos de los agentes individuales son necesarias. Por lo tanto, los sistemas dinámicos tienen que estar representados en forma de modelos matemáticos y físicos de los dispositivos.

El enfoque basado en agentes fue elegido porque es capaz de representar a entidades autónomas, que interactúan con su medio ambiente. Mientras conserva una amplia definición de lo que puede ser un agente, se puede imaginar que representa incluso entidades muy simple del sistema energético a través de agentes. Así, por ejemplo, un calefactor eléctrico tiene una potencia de funcionamiento constante, que puede ser encendido y

apagado. Interactúa con el medio ambiente a través de la disipación de calor y consumo de energía. Su comportamiento se define simplemente por un consumo constante. El modelo de las entidades del sistema de esta manera, también permite un encapsulado y representación jerárquicamente estructurado, como se supone que un agente (como una extensión de los objetos en la programación orientada a objetos, y heredar sus propiedades) puede tener uno o varios otros agentes anidado dentro de sí mismo. Lo que es importante remarcar es que, incluso si los agentes están modelados en una forma simple permite la mejora del comportamiento de las entidades en cualquier momento. Esto permite la adición de características adicionales, tales como un control inteligente, como un sistema de calefacción para nombrar un componente de ejemplo. El grado de inteligencia no es limitada, por lo que un agente puede incluir cualquier tipo de algoritmo decisional, desde los más sencillos a los más complejos. La ventaja es que el sistema de modelización proporciona el potencial para esto desde el principio. Esto es debido a que ha sido concebido con estas características en mente.

## **2.20. Herramientas de simulación y modelización más utilizadas.**

Matlab es probablemente el más ampliamente utilizado para el programa de simulación de los sistemas de control en el plano académico, aunque hay muchos otros programas como Maple, Mathematica, Octave, Scilab, etc., que también son muy comunes. Con Matlab, las simulaciones son posibles en sentido matemático, es decir, aplicando métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales que representan al sistema. Sin embargo, como se ha diseñado utilizando tecnologías de la década de los 50's-60's, carece de las ventajas de las más modernas de software orientado a objetos.

Estas ventajas son evidentes si el sistema en el modelo es de tipo de evento discreto y más aún si se trata de un híbrido o un sistema basado en agentes.

Este planteamiento, examinará el problema desde una nueva perspectiva, tratando de ofrecer nuevas soluciones con un enfoque innovador

basado en multi-método de modelado. Este trabajo presenta las oportunidades y posibilidades de un sistema complejo en el enfoque de los sistemas energéticos, así como un ejemplo de cómo la modelación y la simulación puede ayudar a examinar y analizar las posibles arquitecturas de red inteligente, configuraciones y estrategias antes de la implementación.

Otras herramientas basadas en agentes son:

- Enjambre
- Repast
- Netlogo

Anylogic es un programa muy bien considerado en la comunidad de simulador multi-criterio, pero poco conocidos en las arcas de la automatización e ingeniería de control. Anylogic está basado en los últimos avances en el campo de Modelado orientado a objetos aplicado a sistemas complejos. (Borshchev & Filippov, 2004). Se admite actualmente tres enfoques o paradigmas de modelado:

- System Dynamics (SD)
- Discrete Events (DE)
- Agent Based Models (ABM)

## **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA UTILIZADA Y PROPUESTA DE ESTUDIO**

### **3.1. Análisis del funcionamiento de las redes PLC**

En la actualidad se dan progresivamente cambios en la tecnología especialmente en el campo de las telecomunicaciones, cada vez aparecen nuevas tecnologías con el fin de brindar fiabilidad, seguridad, velocidad de transferencia entre otros servicios.

En los hogares la red local más requerida es la red inalámbrica Wi-Fi por la comodidad de poder conectarse desde distintos puntos dentro de un rango suficientemente amplio de espacio, además, no se necesita de la instalación de cables. Sin embargo, la tecnología Wi-Fi al tener ventajas también tiene una gran desventaja que es la inestabilidad de señal debido a las interferencias en el espectro radioeléctrico, sin contar que tiene menor velocidad en comparación a una conexión con cable, es por esto que se opta por utilizar un cable Ethernet, el cual brinda un sistema más fiable y una velocidad mucho más rápida, con la desventaja de tener un lugar lleno de cables y a un costo muy elevado, como solución a una red Wi-Fi y una red de medio guiado se tiene como alternativa la red PLC.

En la actualidad existen tres tipos de PLC.

- PLC de control
- PLC de acceso y
- PLC para LAN

La tecnología conocida como PLC (Power Line Communications, o Power Line Carrier) permite la transmisión de voz y datos sobre cables de la red, es una tecnología todavía en fase de desarrollo que opera digitalmente, usa una memoria para el almacenamiento interno de instrucciones con el fin de efectuar funciones específicas (registro y control de tiempo, conteo y operaciones aritméticas, entre otras).

Las velocidades de transmisión difieren con cada tecnología, pero las certificaciones más comunes utilizan velocidades de 14 Mbps y 45 Mbps. La señal PLC depende del sistema va modulada entre 1,6 y 40 MHz, debido a que no hay un único estándar hasta ahora, sino un grupo de sistemas diferentes e incompatibles entre sí. Se utilizan 3 tipos de modulación:

**TABLA 3. 1 : Tipos de Modulación**

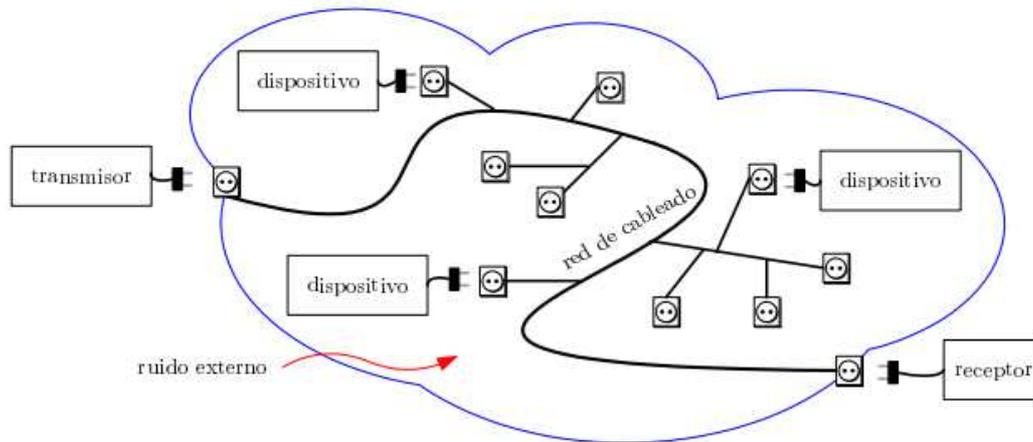
<b>MODULACION</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>
<b>DSSSM (Direct Sequence Spread Spectrum Modulation)</b>	Puede operar con baja densidad de potencia espectral (PSD).
<b>OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)</b>	Usa un gran número de portadoras con anchos de banda muy estrechos.
<b>GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)</b>	Es una forma especial de modulación en banda estrecha.

Fuente: Propia

### **3.2. Estructura , Modelos y simulación de canales LTV para PLC**

En la actualidad el modelo que se ajusta a la realidad de las líneas de transmisión en redes PLC para hogares es el modelo lineal variante en el tiempo que es más aproximado y se acopla más a la realidad de los canales sobre red eléctrica.

(Corripio F. J., 2015), explica que la estructura del sistema para representar un canal PLC en hogares contiene cinco elementos: red de cableado, dispositivos, trasmisor, receptor y ruido externo, donde la descripción de los dispositivos conectados a la red y el ruido externo en la red van cambiando con el tiempo siendo estos dispositivos con cargas lineales pero variantes.

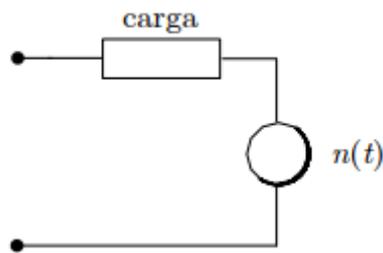


**FIGURA 3. 1:** Elementos principales que integran una estructura del sistema para representar un canal PLC en hogares.  
**FUENTE:** (Corripio F. J., 2015)

La Red de cableado. Está compuesta por todo el conjunto de cables de los circuitos, con las derivaciones y hasta los extremos terminales, que serían los puntos de conexión (enchufes y tomas de alumbrado) y que finalmente terminan en cargas diversas. Se usa una transmisión a dos hilos pues, en cada punto, la conexión se hace entre los cables eléctricos llamados de fase y neutro. El primero porta una de las tres posibles señales que distribuyen energía que puede ser de 110v o 230V eficaces a 60Hz y 50Hz respectivamente, y el segundo tiene 0V. La red de cableado se caracteriza por una topología que lleva la disposición relativa y longitud de los distintos tramos de cable, con lo que se puede obtener un modelo circuital como un bipuerto al que calcular su función de transferencia, para relacionar la señal en el puerto de salida con la del puerto de entrada. Este modelado permite la flexibilidad en la estructura de la red, ya que se puede añadir o eliminar líneas de transmisión o cambiar diferentes variables de las mismas. Adicionalmente se obtiene amplia movilidad de las cargas entre cualquier enchufe o nodo de acceso, y del generador y receptor de señal, en consonancia con los sistemas.

Dispositivos. Son los equipos o aparatos eléctricos, cada uno se suele integrar a la red por medio de un punto de conexión o toma corriente, se caracterizan como bipolos activos constituidos en este caso por un generador de tensión de ruido  $n(t)$  y una carga. El ruido es modelable como una señal aleatoria, queda descrito por sus parámetros estadísticos. Mientras que la carga se describe mediante una relación constitutiva que liga la tensión con la

corriente aplicada mediante una función de impedancia genérica:  $v(t) = fz [i(t)]$ , que puede ser no lineal en muchos casos.



**FIGURA 3. 2** Modelo de dispositivo como bipolo activo  
**FUENTE:** (Corripio F. J., 2015)

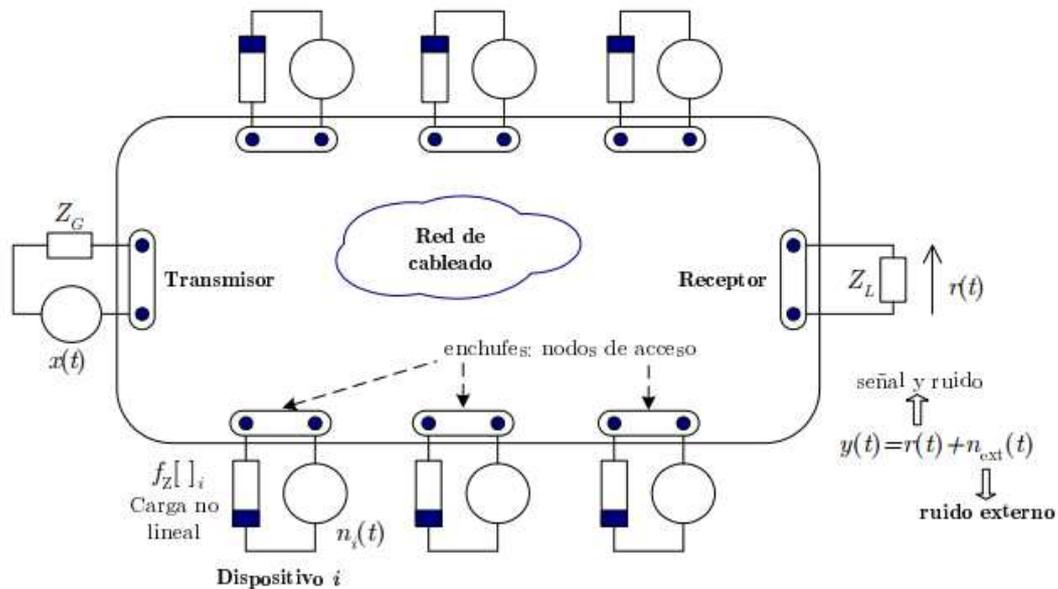
Los dispositivos por lo general son dinámicos de variación, pues los parámetros del bipolo van a cambiar con el tiempo, en función de que en un momento dado el dispositivo esté funcionando o no, de esta forma se pueden establecer dos estados posibles de funcionamiento con carácter general: activo, inactivo (pero enchufado). Los cambios de estado, como van asociados a cambios de las impedancias y el ruido en la red, darán lugar a variaciones en la respuesta completa del canal donde los instantes de transición entre estados de conexión de los dispositivos se van a modelar como secuencias aleatorias, cuyos estadísticos dependen del tipo de dispositivo.

**Transmisor.** Es el equipo o subsistema de transmisión, también conectado a un punto de conexión o toma corriente que sirve como nodo de acceso al medio, este se incorpora al modelo como un bipolo que consiste en el equivalente de Thevenin de un generador de señal, la excitación  $x(t)$ , con una carga lineal constante  $ZG$ .

**Receptor.** Es el equipo o subsistema de recepción, igualmente conectado a un punto de conexión o toma corriente, este se modela como un bipolo pasivo representado por una carga lineal constante  $ZL$ .

**Ruido externo.** Es cualquier perturbación que llega al receptor causada por elementos externos a la red de cableado propia y sus dispositivos, por lo que en general contiene ruido impulsivo y ruido de fondo, esta se la representa como un ruido  $n_{ext}(t)$ , que se superpone a la señal de entrada en el receptor.

La propuesta del modelo estructural se puede sintetizar gráficamente mediante el esquema que aparece en la siguiente figura 3.3.



**FIGURA 3. 3** Diagrama funcional del modelado estructural de canal  
**FUENTE:** (Corripio F. J., 2015)

### 3.3. Modelo multitrayectoria para la comunicación por línea Eléctrica PLC con cargas conectadas a la red eléctrica de Manfred Zimmermann y Klaus Doster

Como es de conocimiento abordado anteriormente la tecnología PLC aprovecha la red eléctrica para convertirla en una línea para transmitir datos a alta velocidad, esta es muy diferente en topología, estructura y propiedades físicas respecto a las redes de datos tradicionales.

En este trabajo se aborda el modelo multitrayectoria para comunicaciones por línea eléctrica PLC en redes inteligentes Smart grid para en hogares y oficinas en edificios con conexión de carga, los cuales están estructurados adicionalmente por una gran cantidad de tomas corrientes o conectores

internos que generan gran reflexión, principalmente en los empalmes o uniones del circuito eléctrico o canal, en forma simple esta se la representa;  $|g_i| \leq 1$  también produce desvanecimiento selectivo de frecuencia, (Camelo, 2009) que

$$\tau_l = \frac{(d_l \sqrt{\epsilon_r})}{c_0} = \frac{d_l}{v_p}$$

puede ser calculado con la ecuación ; donde  $t_1$  es el retardo,  $d_l$  distancia,  $\epsilon_r$  permitividad del medio y  $C_0$

Velocidad de la luz; adicionalmente presentan perdidas en los cables y dependen de la distancia y frecuencia, (Camelo, 2009) que se calcula con el

modelo matemático  $\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$  analizado. La respuesta en frecuencia  $H(f)$  de una línea de transmisión de longitud  $l$  puede ser expresada a través de la constante de propagación que depende directamente de las constantes primarias  $R'$ ,  $G'$ ,  $C'$  y  $L'$ , La constante de propagación se puede determinar a través de la aplicación de la siguiente expresión simplificada, que contiene las constantes  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , resumiendo los parámetros geométricos y de los materiales en los cuales fue elaborado el

$$\gamma = \underbrace{K_1 \sqrt{f} + K_2 f}_{Re(\gamma)=\alpha} + \underbrace{jK_3 f}_{Im(\gamma)=\beta}$$

cable se obtiene , (Camelo, 2009) La parte real de la constante de propagación, es decir, el factor de atenuación  $\alpha$ , incrementa con la frecuencia. Sin embargo, la relación exacta entre  $\alpha$  y  $f$  para un determinado tipo de cable, puede ser proporcional a  $\sqrt{f}$ , a  $f$  ó a una mezcla de los dos anteriores, dependiendo del factor que este siendo dominante entre  $K_1$  y  $K_2$ .

Combinando la propagación de multitrayectoria descrita anteriormente con la frecuencia y longitud, que dependen de la atenuación, finalmente lleva a esta ecuación:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Factor de ponderación}} \underbrace{e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_l}}_{\text{término de atenuación}} \underbrace{e^{-j2\pi f \frac{d_l}{v_p}}}_{\text{término de retardo}}$$

(Camelo, 2009), describe la propagación de la señal a lo largo de una trayectoria teniendo en cuenta el retardo y las características de acoplamiento

propias de la impedancia. Aquí se puede observar que la atenuación en un trayecto de la red se incrementa con la distancia y la frecuencia. El factor de acoplamiento  $g_i$  resume el comportamiento de los factores de reflexión y transmisión a lo largo de una trayectoria de propagación.

Dónde:  $i$  = Numero de trayectoria, la trayectoria con el retraso más corto tiene el índice  $i = 1$ ;  $a_0, a_1$  = Parámetros de atenuación;  $k$  = exponente del factor de atenuación (sus valores usuales están entre 0.2 y 1);  $g_i$  = Factor de peso para la trayectoria  $i$ ;  $d_i$  = longitud de la trayectoria  $i$ ;  $\tau_i$  = retraso de la trayectoria  $i$

### **3.4. Modelo de Holger Philipps (ECO)**

En este modelo descrito y analizado por H. Philipps examina las características de transmisión en la gama de frecuencias de hasta 30 MHz. El desarrollo de este modelo se basa en las características del canal de la línea eléctrica que muestra un comportamiento donde la impedancia varía mucho con la frecuencia, en la mayoría de los rangos de frecuencia la impedancia muestra un comportamiento inductivo o capacitivo, la impedancia en cables de línea eléctrica está en el rango de los 90 ohm esta suele estar influenciada por la topología de la red y cargas conectadas, adicionalmente otro factor característico en este canal es el espectro de ruido que suele ser muy variable en frecuencia y tiempo. El ruido en la línea eléctrica está influenciada por un gran número de diferentes fuentes de ruido con características diferentes, como perturbaciones de banda ancha, Motores universales, perturbaciones de banda estrecha, señales HF y otras suministradas por aparatos y equipos conectados en la red eléctrica.

Las trayectorias múltiples existentes en un canal de línea eléctrica causan ecos en una señal transmitida. Por lo tanto, el canal de línea eléctrica puede ser considerado como un entorno multitrayecto. Cada señal transmitida alcanza al receptor no sólo en una trayectoria directa sino que además retrasado y en la mayoría de los casos atenuado. Debido a esto, se ha desarrollado un modelo de eco, que está en cumplimiento con los parámetros físicos de la red. El

receptor recibe señales a través de N caminos. En la trayectoria v la señal es retardada por el tiempo  $\tau_v$ , y atenuada por el factor complejo  $\rho_v$ , la atenuación compleja de cada trayectoria es:

$$\rho_v = |\rho_v| \cdot e^{j\phi_v} \quad \phi_v = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{\rho_v\}}{\text{Re}\{\rho_v\}}\right)$$

La respuesta de impulso  $h(t)$  se puede escribir como la suma de los N pulsos que se multiplican por  $\rho_v$  y por retardo  $\tau_v$ .

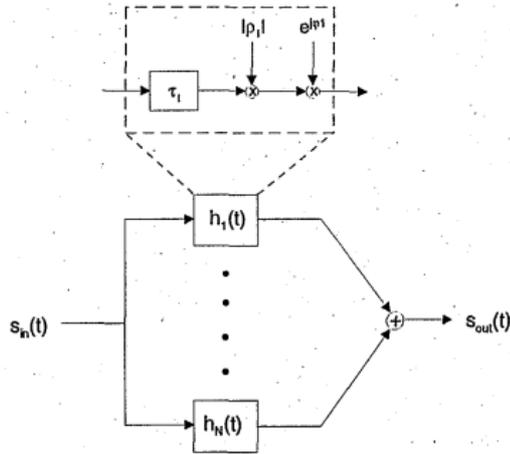
$$h(t) = \sum_{v=1}^N |\rho_v| \cdot e^{j\phi_v} \cdot \delta(t - \tau_v)$$

La función de transferencia  $H(f)$  puede derivarse mediante una transformación de Fourier de la respuesta de impulso:

$$H(f) = F\{h(t)\} \Rightarrow H(f) = \sum_{v=1}^N |\rho_v| \cdot e^{j\phi_v} \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau_v}$$

La función de transferencia se compone de una suma de oscilaciones complejas de onda senoidal (seno-coseno) que tienen un desplazamiento de fase dependiente de la frecuencia. En adición, Cada oscilación es atenuada y está sujeta a un cambio de fase constante.

En la figura 3.4 se representa el modelo ECO en el cual cada trayectoria se describe mediante la respuesta de impulso  $h_v(t)$  que causa un retardo  $\tau_v$ , una atenuación  $|\rho_v|$  y un desplazamiento de fase  $\phi_v$ , Para cada ruta se debe definir un conjunto de 3 parámetros, por lo tanto, todo el modelo con N rutas es completamente descrito por  $3 \cdot N$  parámetros. Con el fin de lograr una buena correlación entre lo medido y lo modelado de la función de transferencia.



**FIGURA 3. 4:** Modelo Eco  
**FUENTE:** (Philipps, 1993)

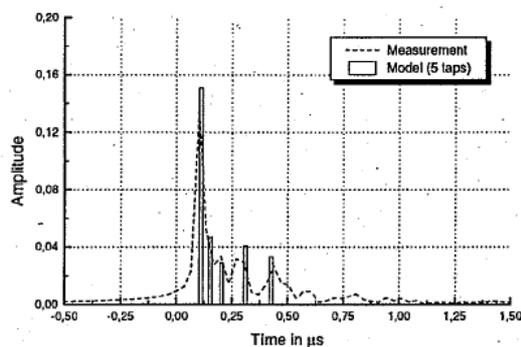
A continuación se indica el conjunto de parámetros del modelo con 5 trayectorias que está dado por:

$|\rho_i| = 0.151; 0.047; 0.029; 0.041; 0.033$

$\Phi$  in rad:  $0.691; -0.359; 0.591; 2.913; 1.012;$

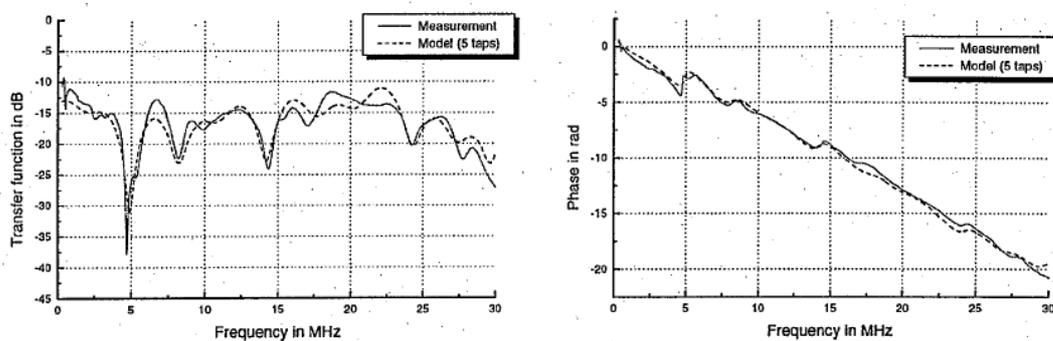
$\tau$  en us:  $0.110; 0.154; 0.205; 0.311; 0.427$

En la figura 3.5 se representan la respuesta de impulso medida y la respuesta discreta de impulsos del modelo. El primer pico  $\tau = 110$  us es el pico principal y está al menos 10 dB por encima de los picos sucesivos. Dentro de 1us casi la cantidad total de la energía del impulso transmitido llega al receptor.



**FIGURA 3. 5:** Respuesta de impulso de medición y modelo de eco  
**FUENTE:** (Philipps, 1993)

Las características de amplitud y fase del modelo y de la medición se representan en la figura 3.6. Los picos o muescas profundas en la función de transferencia medida se copian exactamente por el modelo. Las curvas de la función de transferencia muestran una buena Correlación con el factor  $r = 0,89$ . La correlación de las características de fase es aún mejor ( $r = 0,99$ ). La media de la raíz Cuadrado del factor de transferencia es de aproximadamente 1,8 dB, la de las características de fase es de aproximadamente 0,37 rad. Aunque sólo se han utilizado 5 trayectos el modelo está en buen cumplimiento con la medición.

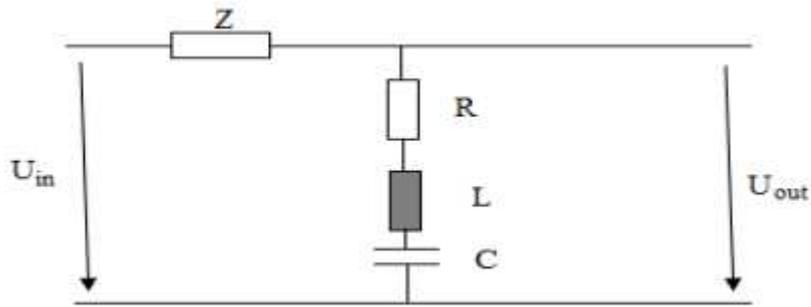


**FIGURA 3. 6:** Función de transferencia y características de fase de medición del modelo de eco.

**FUENTE:** (Philipps, 1993)

### 3.5. Modelo Circuito Resonante Serie

Este modelo también es analizado y descrito por H. (Philipps, 1993) donde indica que las mediciones de impedancia de las cargas eléctricas en un circuito PLC domiciliario o de oficina han demostrado que las cargas instaladas se las puede describir como circuitos resonantes en serie desacoplados que consisten en resistencia  $R$ , capacitancia  $C$  e inductancia  $L$ . Como muchos aparatos incorporan condensadores anti-interferencia en su entrada y poseen una línea de alimentación que tiene una resistencia y una Inductiva de la impedancia, este enfoque está en estrecha correspondencia con la realidad, en la siguiente figura 3.7 se observa un circuito resonante serie conectado a una línea con impedancia  $Z$



**FIGURA 3. 7:** Modelo Circuito Resonante Serie  
**FUENTE:** (Philipps, 1993)

La impedancia del circuito resonante  $Z_s$  es dependiente de la frecuencia y puede ser descrito por:

$$Z_s(f) = R + j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC}$$

La frecuencia de resonancia  $f_{res}$  :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

La impedancia es mínima con una parte imaginaria igual a 0 y una parte real igual a R, la función de transferencia  $H(f)$  es :

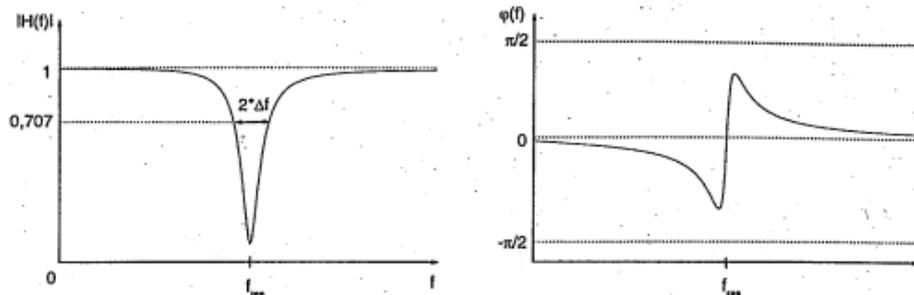
$$H(f) = \frac{1}{1 + \frac{Z}{Z_s(f)}}$$

La función de transferencia resultante se representa en la figura 3.8. Un pico en las características de amplitud se puede observar en la frecuencia de resonancia. A frecuencias más bajas y más altas la función de transferencia es casi 1. La profundidad del pico depende de la resistencia R y de la impedancia Z. La calidad Q del circuito resonante se define por el  $1/\sqrt{2}$  igual a  $2 * \Delta f$ , de la curva  $H(f)$  y esta es igual a:

$$Q = \frac{f_m}{2 \cdot \Delta f} \Rightarrow Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Q es una función de la anchura de la muesca o pico. Cuanto mayor es Q, más estrecha es la muesca. Las características de la fase indican que en

frecuencias más bajas la fase es capacitiva, a frecuencias más altas es inductiva.



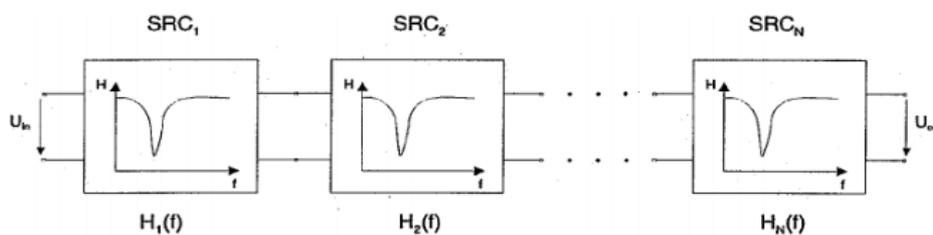
**FIGURA 3. 8:** Características en amplitud y fase de un circuito resonante serie  
**FUENTE:** (Philipps, 1993)

La función de transferencia del canal de línea eléctrica se modela como una cascada de N circuitos resonantes de serie desacoplada.

En la figura 3.9 se muestra un diagrama de bloques de este modelo.

Cada circuito resonante se describe mediante una función de transferencia  $H_i(f)$ . La función de transferencia global resultante  $H(f)$  es:

$$H(f) = \prod_{i=1}^N H_i(f)$$



**FIGURA 3. 9:** Modelo del circuito resonante serie  
**FUENTE:** (Philipps, 1993)

### 3.6. Análisis de Simulación de los modelos Multitrayectoria de Manfred Zimmermann y Klaus Doster y Modelo de línea con N elementos de cascada Circuito Resonante Serie de Holger Philipps.

A continuación se analizarán algunos de los modelos de Multitrayectoria de Manfred Zimmermann y Klaus Doster y Modelo de línea con N elementos de cascada Circuito Resonante Serie de Holger Philipps

#### Análisis de Simulación del modelo Multitrayectoria de Manfred Zimmermann y Klaus Doster.

Para la simulación de este modelo se considera la comunicación por una línea eléctrica PLC para interiores en hogares u oficinas con 4 trayectorias con una respuesta o función de transferencia con variaciones de rangos de frecuencia, distancias, coeficientes de acoplamiento de impedancias y con una distribución de líneas de transmisión uniformes, con lo que las variables están definida de la siguiente manera:

Cantidad de nodos o conexiones de cargas

$N_i=4$

Parámetros de Atenuación:

$K=1, a_0 = 0, a_1 = 7.8 \cdot 10^{-10} \text{ s/m}$

Parámetros de los nodos o conexiones de cargas

$G_i = 0.64; 0.38; -0.15; 0.05$

$D_i/m = 200; 222.4; 244.8; 267.5$

```
%%%%%%%% PLC multipath channel model %%%%%%%%%
```

```
N=4; k=1; a0=0; a1=7.8e-10;
```

```
%Path parameters g(1:N)=[0.64,0.38,-0.15,0.05];
```

```
d(1:N)=[200,222.4,244.8,267.5];
```

```
%Spread velocity
```

```
vp=1.5e8; ff=1:0.01:20; f=100:2000;
```

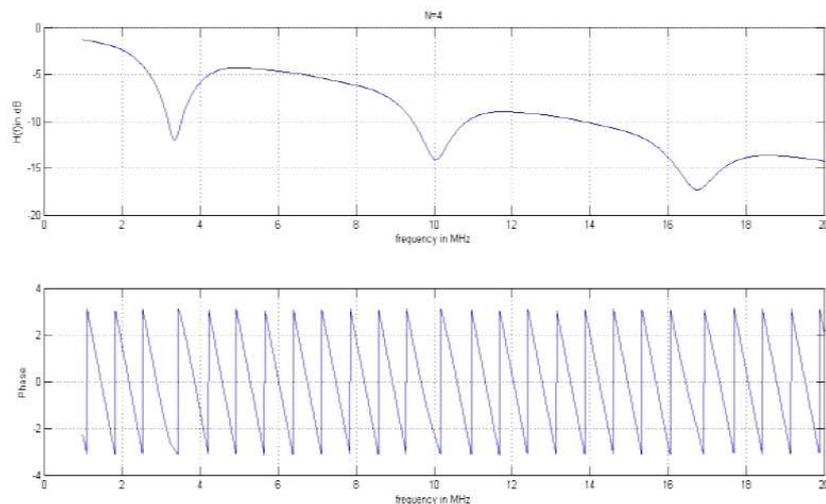
```
for m=1:N
```

```
%f=1:20000;
```

```

% f=transpose(f);
% f0=10*f
H(f,m)=g(m).*exp(-(a0+a1.*((ff.*1e6).^k)).*d(m)).*exp(-2i.*pi.*(ff.*1e6).*(d(m)./vp));
end
H0(f)=H(f,1)+H(f,2)+H(f,3)+H(f,4);
magH(f)=10*log10(abs(H0(f)));
angH(f)=angle(H(f,1)+H(f,2)+H(f,3)+H(f,4));
subplot(2,2,1),plot(ff,magH(f))
title('N=4');xlabel('frequency in MHz'); ylabel('H(f)in dB')
grid on
subplot(2,2,2), plot(ff,angH(f))
xlabel('frequency in MHz'); ylabel('Phase')
grid on

```



**FIGURA 3. 10:** Gráfico de la función de transferencia del modelo Multitrayectoria con 4 cargas  
**FUENTE:** Propia

### **Análisis de Simulación del Modelo Circuito Resonante Serie**

En este modelo de circuito se escribirá una función para variar, calcular y trazar la impedancia de entrada, la corriente y la tensión de salida de un circuito resonante serie RLC, el procedimiento que se va a seguir es escribir la función para calcular la impedancia de entrada total del circuito resonante.

```

*****
% Series RLC Resonant circuit
% Minh Anh Thi nguyen
% Colorado State University
% Electrical and Computer Engineering student
% *****

function [Zinput]=Zinput_seriesRLC1() %is the function declaration. Note:

%The word "function" must be the first (non-comment) word of the program.
%"Zinput " is the value that this function returns, or calculates, a.k.a. the output.
%"radius" is the name of the variable taken as input.
%"Zinput_seriesRLC1" should be both the name of the function and the name
%that you use to save the file.

disp('Starting the function of Zinput_seriesRLC1');
%define all the component values and units for Tank
                                %unit
Vm=1;                            %Volts
R=200;                            %ohms
C=40e-12;                          %Farads
L=1000e-6;                          %henrys

% define the input impedance
Zin_numb=[L*C R*C 1];
Zin_de=[0 C 0];
Zinput=tf(Zin_numb,Zin_de)
figure(1)
bode(Zinput)
title('Input impedance of series RLC tank circuit')

% calculating important parameters of the tank

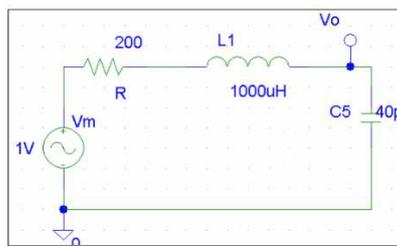
[z,p,k]=zpkdata(Zinput,'v');

wo=sqrt(1/L/C)
Beta=R/L
Q=wo/Beta

disp('finishedthe function of Zinput_seriesRLC1');

```

En la siguiente figura 3.11 se muestra el circuito resonante RLC con los diferentes valores de los dispositivos, donde  $V_m$  es a variable voltage. Set to 1 volts, L is a variable inductor. Set to  $1000\mu\text{H}$ , R is a variable ideal resistor. Set to  $200\Omega$ . Y C is a variable ideal capacitor. Set to  $40\text{pF}$ .



**FIGURA 3. 11:** Circuito resonante RLC  
**FUENTE:** Propia

A continuación se realizará la función de transferencia resultante de la impedancia de entrada:

```
Command Window
>> Zinput_seriesRLC1
Starting the function of Zinput_seriesRLC1

Transfer function:
4e-014 s^2 + 8e-009 s + 1
-----
4e-011 s

wo =

5000000

Beta =

200000

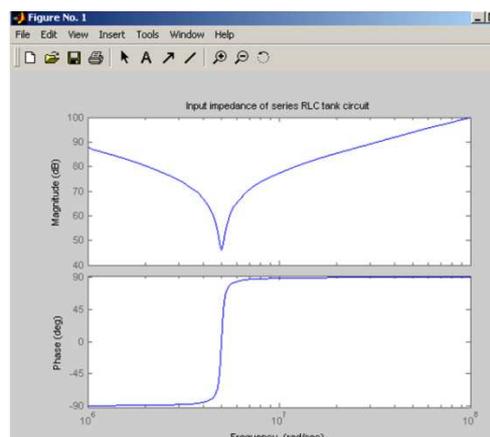
Q =

25

finishedthe function of Zinput_seriesRLC1

Transfer function:
4e-014 s^2 + 8e-009 s + 1
-----
4e-011 s
```

En la figura 3.12 se muestra las curvas de salida de la impedancia de entrada del circuito resonante RLC



**FIGURA 3. 12:** Salida de la impedancia de entrada del circuito de la serie RLC.  
**FUENTE:** Propia

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

En esta tesis se ha estudiado y analizado tres tipos de modelo de redes eléctricas interiores domesticas u oficinas como medios de transmisión de datos o como una alternativa de red de área local, para caracterizar el comportamiento de los modelos estudiados se ha fundamentado sobre una estructura real de una red eléctrica y sobre lo más aproximado en relación a la realidad física del medio.

Cada modelo estudiado y analizado muestra los diferentes efectos que producen sobre el comportamiento del canal las diferentes alteraciones de la estructura de la red en diferentes lugares.

En las simulaciones se proponen modelos matemáticos basados en la estructura física para la estimación de la función de transferencia  $H(f)$  que describe el comportamiento de un canal PLC de baja tensión.

El modelo multitrayectoria de Manfred Zimmermann y Klaus Doster propone un modelo determinístico que describe la respuesta al impulso del canal, donde considera solo el factor del producto de la transmisión y reflexión de cada trayecto, esto significa el factor de peso y el retardo de propagación y adicionalmente las variables como la frecuencia y distancia con la que trabaja la red, mientras que Holger Philipps propone un modelo de eco, donde además de los parámetros del modelo de Manfred Zimmermann y Klaus Doster, se considera un factor de atenuación, finalmente el modelo circuito resonante serie indica que las cargas instaladas se las puede considerar como circuitos resonantes en serie desacoplados que consisten en resistencia, capacitancia e inductancia, con lo que su función de transferencia se modela como una cascada de  $N$  circuitos resonantes en serie por todo el canal.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis experimental con equipos y dispositivos de medición en un área local, para de esta forma comparar con las simulaciones estudiadas.

En el caso de realizar un análisis experimental es recomendable revisar todos los acoples eléctricos o tomacorrientes que se encuentren en buen estado, ya que esto pudiera producir disminución de amplitud.

En las simulaciones principalmente en la estudiada del modelo Manfred Zimmermann y Klaus Dostert es recomendable trabajar sobre frecuencias de entre 20khz a 20Mhz, ya que los equipos que se distribuyen comercialmente en la actualidad trabajan en este rango.

En estas simulaciones siempre hay que considerar atenuación y variaciones en los rangos de frecuencia, con el objetivo de definir la normalización de este sistema.

Es recomendable que estos sistemas trabajen con acopladores y con distancias inferiores a 400 metros para que se realicen transmisiones estables sin pérdidas de la información.

## Bibliografía

- Caltenco J.H., E. I. (2014). Modelado de canal para sistemas de comunicación PLC domésticos. *SEPI-ESIME- IPN*.
- Camelo, G. E. (2009). MULTIPATH MODEL ANALYSIS IN POWER LINE CARRIER CHANNELS. *Gerenc. Tecnol. Inform.*, | Vol. 8 | N° 20 | Ene - Apr | pp 55 - 65.
- Cañete Francisco Javier, C. J. (2003). Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium. *IEEE Communications Magazine*, 1-8.
- Corripio F. C . Arrabal del Río L. D, a. M. (2006). Analysis of the cyclic short-term variation of indoor power line channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 4, no.7, pp. 1327-1338.
- Corripio, F. J. (2004). *Caracterización y modelado de redes eléctricas interiores como medio de transmisión de Banda Ancha*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Corripio, F. J. (2015). *Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores*. Malaga: Universidad de Málaga Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación.
- Diaz, C., & Hernández, J. (2011). Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica – Estado del Arte. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 61 - 62.
- Dmitry Baimel, S. T. (2016). Smart Grid Communication Technologies. *Journal of Power and Energy Engineering*, 4, 1-8.
- Educa, E. (2014). *Smart Grids*. Obtenido de [http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/smart-city/smart-grid](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/smart-grid)

- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergüt, S., & Buccella, C. (2011). Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards . *Communication Technologies and Standards* , 7 - 9.
- IEC, A. r. (2017). *International Electrotechnical Commission*. Obtenido de International Electrotechnical Commission: <http://www.iec.ch/smartgrid/standards/#top>
- Institute Electric Power Research. (2000). *APRI AC Transmission Line*.
- Kremers, E. (2012). Modelling and Simulation of Electrical Energy Systems through a Complex Systems Approach using Agent-Based Models. *KIT Scientific Publishing*, 7.
- Kremers, E. A. (2012). *Modelling and simulation of electrical energy systems through a complex systems approach using agent-based models*. Vitoria: KIT Scientific Publishing.
- Lee, S. (2011). Security Issues of Power Line Multi-Home Networks for Seamless Data Transmission. *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 37.
- Martínez Cerón Dora Juliana, M. R. (2003). *modelado de sistemas de transmisión OFDM y GMSK para comunicación de datos por líneas eléctricas PLC*. Bogota.
- Martínez, D., Muñoz, E., López, G., & Perea, D. (2004). *Modelado de sistemas de transmisión OFDM y GMSK para comunicación de datos por líneas eléctricas PLC (Powerline Communication)*. Cauca: Universidad del Cauca , Colombia.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson Educación.
- Palancar, F. M. (2005). Introducción a la Tecnología PLC. *Antena de Telecomunicación*, 19-23.

- Pedraza, G. A. (2012). *Estudio y Analisis de la Viabilidad de Implementacion de Tecnologia PLT (Power Line Telecommunications) en Colombia, en el Ambito de la Transmision de Datos sobre Redes de Baja Tension*. Bogota.
- Philipps, H. (1993). Modelling of Powerline Communication. *Institute for Communications Technology*, 1-8.
- Sevilla, A. G., & Fernández, F. A. (2013). Evolución de las redes eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina. . *Educación en Ingeniería*, 48-61.
- Velásquez, I., Zambrano, M., & Medina, C. (2014). Redes eléctricas de interiores como canal de comunicación. *Prisma Tecnológico | Vol. 5, n.º 1, edición 2014.*, 39-42.

## GLOSARIO

3G/LTE : Tercera generación del estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para móviles

### A

ABM: Modelos Basados en Agentes

### D

DE : Eventos Discretos

DHS: Especificación de casa digital

DSSSM: Modulación de espectro ensanchado de secuencia directa

### E

ECO: Modelo de Holger Philipps

EISA: Acta de independencia Energética y Seguridad

Ethernet: Estándar de redes de área local

### F

Fibra Óptica: Medio de transmisión de cable de vidrio

### G

GMSK

GMSK: Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano

GridStart: Software de código abierto

## **H**

HD: Alta definición

HomePlug: Familia de diversas especificaciones de comunicaciones por línea eléctrica

## **L**

LAN : Red de Área Local

LTI: Sistemas Lineales Invariantes

LTV: Sistemas Lineales variantes en el tiempo

## **N**

NAN: Red de área de vecindad

NIST: Instituto de tecnología y estándar nacional

## **O**

OFDM : Modulación de frecuencia por división ortogonal

## **P**

PLC : Comunicación por líneas eléctricas

## **S**

SD: Sistemas dinámicos

Smart Grids : Redes Energéticas Inteligentes

## **T**

Tecnología AMI : infraestructura avanzada de medición

## **U**

UPS: Asociación universal de líneas de transmisión

## **W**

WAN: Red de área amplia

WiFi: Fidelidad sin cables o inalámbrica

WiMax: Interoperabilidad Mundial de Acceso por Microondas



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT  
Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Lenin Ricardo Bravo Rey con C.C: # 1104298128 Autor del Trabajo de Titulación: Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids. Previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 17 de agosto de 2018

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Ing. Lenin Ricardo Bravo Rey

C.C: 1104298128



## **REPOSITARIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Lenin Ricardo Bravo Rey		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Orlando Philco Asqui, MSc.; Ing. Celso Bohórquez Escobar, MSc. /Ing. Manuel Romero Paz, MSc.		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>CARRERA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	17 de agosto de 2018	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	66
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Transmisión de datos en Smart Grids		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Modelación, simulación, transmisión, redes energéticas.		

**RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):**

La tesis Modelación y simulación de medios de transmisión variables con el tiempo para PLC en redes energéticas inteligentes o Smart Grids, se origina por el desconocimiento y poca información que pueden proporcionar las empresas del sector eléctrico en este campo, vista desde el punto de suministrar el servicio de entrega de datos e internet a los hogares desde sus infraestructuras ya que como tal no lo ofrecen al mercado y solo lo realizan como apoyo para recolectar información interna en algunos sectores dependiendo de la infraestructura montada, la finalidad de este tema de tesis fue analizar el comportamiento de la transmisión de datos a través de canales variables con el tiempo en redes energéticas inteligentes o Smart Grids de forma simulada a través de estudios realizados por autores diferentes que determinan sus propios modelos, entre los principales enfoques teóricos en los que se sustenta el abordaje del problema o tema de investigación están los diferentes sistemas de modelación existentes, como se transfieren y que elementos conforman una comunicación por una red eléctrica PLC, clasificación de las redes PLC, estructura de comunicación de las redes inteligentes y diferentes modelos de simulación escogidos, como conclusiones se encuentra que cada modelo estudiado muestran diferentes efectos y alteraciones producidos sobre el comportamiento del canal y la estructura de la red, así mismo que cada uno proponen modelos matemáticos diferentes basados en la estructura física.

<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0992861944	E-mail: lendohs@hotmail.com
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Ing. Manuel Romero Paz, MSc.	
	<b>Teléfono:</b> +593-994606932	
	<b>E-mail:</b> manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	

#### **SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA**

<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>	
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>	
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>	