



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Evaluación de los diferentes tipos de modulaciones para sistemas
PLC empleados en las redes energéticas inteligentes (Smart
Grids).**

AUTOR:

Ing. Moisés Isaías Montoya Tomala

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de
Magister en Telecomunicaciones**

TUTOR:

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, 16 de Junio de 2017



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el ingeniero Moisés Isaías Montoya Tomalá como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones.

Guayaquil, 16 de Junio de 2017

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

YO, MOISES ISAIAS MONTOYA TOMALÁ

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “Evaluación de los diferentes tipos de modulaciones para sistemas PLC empleados en las redes energéticas inteligentes (Smart Grids).”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de Titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 16 de Junio de 2017

EL AUTOR

Ing. Moisés Isaías Montoya Tomalá



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

AUTORIZACIÓN

YO, Moisés Isaías Montoya Tomalá

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulado: “Evaluación de los diferentes tipos de modulaciones para sistemas PLC empleados en las redes energéticas inteligentes (Smart Grids).”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 16 de Junio de 2017

EL AUTOR

Ing. Moisés Isaías Montoya Tomalá

REPORTE URKUND

URKUND

Documento: [TESIS MOISES MONTOYA Final.docx](#) (D28410027)

Presentado: 2017-05-18 19:45 (-05:00)

Presentado por: orlandophilco_7@hotmail.com

Recibido: orlando.philco.ucsg@analysis.urkund.com

Mensaje: Fwd: Montoya [Mostrar el mensaje completo](#)

3% de esta aprox. 31 páginas de documentos largos se componen de texto presente en 5 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

- <http://www.zivbrasil.com.br/docs/smartgrids/FCTI1010B.pdf>
- <http://doczz.es/doc/3007027/haciendo-realidad-la-red-del-fut...>
- <http://www.utp.ac.pa/documentos/2015/pdf/08-ACTUALIDAD...>
- <http://www.ece.ubc.ca/~diegop/papers/OfdmGmskOverPLC.pdf>
- [Torres Gary MET2017.docx](#)
- <http://www.biblioteca.uma.es/bbl/doc/tesisuma/16762204.pdf>
- http://archive-es.com/es/z/ziv/es/2013-04-28_1956691_28/raq...

0 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Evaluación de los diferentes tipos de modulaciones para sistemas PLC empleados en las redes energéticas inteligentes (Smart Grids).

AUTOR: Ing. Moisés Isaias Montoya Tomala

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de Magister en Telecomunicaciones

TUTOR: MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, a los 20 días del mes marzo del año 2017

SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el ingeniero Moisés Isaias Montoya Tomalà como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico

de Magister en Telecomunicaciones.

Guayaquil, a los 20 días del mes marzo del año 2017

TUTOR

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a Dios, a mis padres y hermanos, por el sacrificio y esfuerzo por verme cumplir mi anhelado objetivo de ser un profesional.

Moisés Isaías.

Agradecimiento

A Dios que sin él no hay motivación, a mi familia por todo su apoyo y comprensión, que ha permitido culminar con éxitos, el objetivo de ser un profesional.

A mis profesores de la FETD por la enseñanza y su amistad, a sus autoridades y en especial a mi Director de tesis, Ing. Manuel Romero Paz. Por guiarme en la culminación del trabajo de investigación.

Moisés Isaías.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**MSc. Manuel Romero Paz
TUTOR**

**MSc. Manuel Romero Paz
DIRECTOR DEL PROGRAMA**

**MSc. Orlando Philco Asqui
REVISOR**

**MSc. Luis Córdova Rivadeneira
REVISOR**

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Metodología de investigación	3
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA PLC	4
2.1 Funcionamiento de PLC.....	5
2.2.1 Red de Acceso PLC.....	9
2.2.2 Red en el Hogar (In Home)	11
2.3 Arquitectura de interconexión.....	12
2.3.1 Estándares desarrollados para PLC	13
2.4 Evolución de las técnicas de modulación para PLC	14
2.4.1 Técnicas de modulaciones para PLC.....	17
2.4.2 Características de OFDM	18
2.4.3 Modelo de comunicación básico de OFDM.....	19
2.5 El Ruido en línea de transmisión eléctrica.....	20
2.5.1 Características del ruido en PLC	21
2.6 Estado de la Investigación sobre el canal PLC interior para banda ancha. 22	
2.7 Caracterización del Modelo de canal PLC interior	22
2.7.1 Modelo Multitrayecto	25
2.8 La convergencia de PLC a redes energéticas inteligentes.....	26

2.8.1 Ejemplo de proyecto de red inteligente	29
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE SIMULACIONES DEL CANAL DE PLC INTERIOR.....	36
3.1 Modelo de Canal Multitrayecto.....	36
3.2 Modelo de canal PLC para interiores con ruido.....	38
3.3 Modelado de canal PLC interior	39
3.3.1 Selección de técnicas de modulación OFDM.....	40
3.3.2 Subportadoras	42
3.4 Señales de Subportadoras OFDM transmitida	45
3.5 Resultados del modelado de canal PLC interior	46
3.5.1 Respuesta en frecuencia del canal PLC para interiores.....	47
3.5.2 Bit Error Rate.....	51
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Ruta de la tecnología de acceso PLC	6
Figura 2. 2 Rango de frecuencias para PLC Banda Estrecha	7
Figura 2. 3. Esquema general de red PLC	8
Figura 2. 4. Esquema de Red de Acceso PLC	9
Figura 2. 5 Opciones de red en el hogar PLC	11
Figura 2. 6 Pila de protocolos típico para un equipo PLC	12
Figura 2. 7. El modelo básico de la comunicación PLC con el sistema OFDM..	19
Figura 2. 8 Modelo Bottom-Up o Simplificado ascendente (de abajo hacia arriba)	23
Figura 2. 9. Esquema de red inteligente.....	26
Figura 2. 10 tecnologías e interconectividad en redes inteligentes.....	28
Figura 2. 11 Telecontrol en subestaciones eléctricas.....	29
Figura 2. 12. Esquema de conexión general de centro de transformadores inteligentes	30
Figura 2. 13 Telesupervisión a centros de transformadores de MT y BT.....	32
Figura 2. 14. Telesupervisión de centros de transformadores y su arquitectura..	33
Figura 2. 15 Esquema de la telemedición	33
Figura 2. 16. Esquema de conexión para la telemedición masiva	34
Figura 2. 17. Representación del Hogar Inteligente	34
Figura 2. 18. Escenario de cobertura Wifi en una residencia	35
Figura 2. 19 Velocidad en Mbps para PLC.....	35
Figura 3. 1 Topología típica de la línea de transmisión de la red eléctrica para la última milla	36
Figura 3. 2. Propagación Multitrayecto de la señal de D a C	36

Figura 3. 3 Esquema del modelo general del Multitrayecto	38
Figura 3. 4. Modelo de canal PLC interior adicionando ruido	39
Figura 3. 5 Modelado para canal PLC interior	40
Figura 3. 6 Constelación de Símbolos BPSK	41
Figura 3. 7 Constelación de Símbolos en QPSK	41
Figura 3. 8 Constelación de Símbolos 16 QAM.....	42
Figura 3. 9 Constelación de Símbolos para 64 QAM.....	42
Figura 3. 10 Generación de subportadoras para BPSK.....	43
Figura 3. 11 Generación de subportadoras para QPSK	43
Figura 3. 12 Generación de subportadoras para 16QAM	44
Figura 3. 13 Generación de subportadoras para 64QAM	44
Figura 3. 14 Señal subportadoras OFDM en BPSK transmitido	45
Figura 3. 15 Señal subportadoras OFDM en QPSK transmitido	45
Figura 3. 16 Señal subportadoras OFDM en 16QAM transmitido.....	46
Figura 3. 17 Señal subportadoras OFDM en 64QAM transmitido.....	46
Figura 3. 18 Modelado de canal PLC adicionando ruido según propuesta del grupo Málaga.....	46
Figura 3. 19 Respuesta del canal PLC	47
Figura 3. 20 El Ruido Impulsivo dado por generador PLC	47
Figura 3. 21 Respuesta de frecuencia al Ruido Impulsivo dado por generador PLC	48
Figura 3. 22 Ruido de fondo vs Densidad espectral de potencia	48
Figura 3. 23 Señal de información transmitida (bits) por BPSK	49
Figura 3. 24 Señal de información transmitida (bits) por QPSK.....	49
Figura 3. 25 Señal de información transmitida (bits) por 16QAM.....	50
Figura 3. 26 Señal de información transmitida (bits) por 64QAM.....	50

Figura 3. 27 Desempeño BER con BPSK..... 51

Figura 3. 28 Desempeño BER con QPSK 52

Figura 3. 29 Desempeño BER con 16QAM 52

Figura 3. 30 Desempeño BER con 64QAM 53

Figura 3. 31 Resultados de desempeño de diversas técnicas OFDM y su BER/SNR
..... 53

INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Resumen de algunas contribuciones basados en OFDM 15

Tabla 2. 2. Parámetros de control de entrada y salida del transformador de potencia
..... 31

RESUMEN

Este trabajo expone el estudio de la tecnología *Power Line Communication* (PLC) considerada como un procedimiento de comunicaciones diseñado para la propagación de voz, video y datos, a través de las líneas eléctricas. PLC presenta características especiales, ya que converge en dos entornos diferentes: las telecomunicaciones y la electricidad. Actualmente la transmisión de información utilizando PLC ha adquirido una importancia vital para su uso en las llamadas redes energéticas inteligentes. Debido a la fuerte presencia de ruido, interferencias y desfavorables características del medio de transmisión, la elección de métodos de modulación de elevados desempeños resulta de primordial importancia en el comportamiento de PLC. Mediante modelación y simulación de las diferentes variantes, la obtención de sus parámetros de desempeño tales como la tasa de error binario (*Bit Error Rate*, BER), los diagramas de dispersión y otros, permitirá determinar las mejores variantes. El énfasis estará en sistemas con modulación por Multiplexación de División de Frecuencias Ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) con elevados números de subportadoras y modulaciones de alta eficiencia espectral.

El alto nivel de atenuación (pérdida de señal o datos) en el acceso a los cables de alimentación de BPL (Broadband Power Line) tuvo dos efectos importantes: El ancho de banda limitado y la oposición de grupos de la comunidad de radioaficionados. BPL utiliza frecuencias del espectro radioeléctrico atribuido a los servicios inalámbricos de comunicación, por lo tanto, la prevención de interferencia a, y desde, estos servicios es un factor muy importante al diseñar sistemas BPL.

Palabras claves: *PLC, BPL, OFDM, SMART GRID, BER.*

ABSTRACT

This paper presents the study of technology Power Line Communication (PLC) used with little success by electric utilities. This technology was considered as a communications procedure designed for signal propagation (voice, video and data) through power lines. PLC has special characteristics, since converge in two different environments: telecommunications and electricity. Currently the transmission of information using PLC has acquired a vital importance for use in so-called smart energy networks. Due to the strong presence of noise, interference and unfavorable characteristics of the transmission medium, the choice of modulation methods of high performance is of primary importance in the behavior of PLC systems. Through modeling and simulation of different variants, obtaining performance parameters such as bit error rate (Bit Error Rate, BER), scatter plots and others, will determine the best variants. The emphasis will be on systems with modulation multiplexing Orthogonal Frequency Division (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) with high numbers of subcarriers and modulations high spectral efficiency.

The high level of attenuation (loss of signal or data) access to power cords BPL (Broadband Power Line) had two important effects: the limited bandwidth and opposition groups within the amateur radio community. BPL uses frequencies that are part attributable to wireless communication services spectrum, thus preventing interference to and from these services is a very important design factor of BPL systems.

Keywords: PLC, BPL, OFDM, SMART GRID, BER.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

A continuación se detallaran características importantes de la tecnología PLC que permitirán presentar la justificación de la investigación y la problemática presente en este trabajo.

1.1 Introducción

La tecnología *Power Line Communications* PLC, puede transmitir señales de comunicaciones de datos utilizando el cableado eléctrico, sus desafíos son encontrar soluciones para el nivel de impedancia, las pérdidas en la línea de transmisión y el ruido de la línea eléctrica que fluctúa mucho en función de sus condiciones de funcionamiento. La idea general de esta tecnología es modular una señal de radio con los datos (incluyendo además voz y video) y transmitirla a través de canales PLC en una banda de frecuencias diferentes que no se utilizan para el suministro de energía eléctrica.

Las frecuencias utilizadas y el esquema de modulación son dos factores principales que tienen una influencia significativa en la eficiencia del sistema y también la velocidad del servicio de PLC. La mejor técnica de modulación para esta tecnología es la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM), un esquema de modulación de múltiples operadores en los que un flujo de datos de alta velocidad se divide en bajas tasas múltiples de corrientes de datos. También es modulada por el uso de subportadoras que son ortogonales entre sí (Álvarez, García , & González, 2010).

Por otra parte, en el método OFDM, cuando la onda electromagnética de PLC influye en otros sistemas existentes, es posible no utilizar esa frecuencia de esta banda o se puede configurar para reducir el nivel de envío (Cajamarca & Sarmiento, 2012).

Hoy en día se está desarrollando comunicación estable de alta velocidad, de aquí surge BPL (*Broadband over Power Lines*) que se basa en la tecnología PLC, Línea Eléctrica de Telecomunicaciones (PLT), Internet mediante Línea Eléctrica (IPL);

así el acceso BPL ofrece la transmisión de datos digitales de alta velocidad sobre el cableado de distribución de energía eléctrica.

Por aquello debe evaluarse el canal de conducción eléctrica y por otra parte, investigaciones de simulaciones del modelo de PLC para usos de control y supervisión de datos, como los son sistemas *SCADAs* y las Redes eléctricas inteligentes *Smart Grids*.

1.2 Planteamiento del Problema

La electricidad es la forma más conveniente de energía en la vida moderna, esta energía guiada a través de cables hoy en día puede transportar otras señales (con tecnología PLC) aunque existen limitaciones para su óptimo uso como la presencia del ruido electromagnético emitido desde todo tipo de dispositivos eléctricos. Por aquello se define el siguiente problema:

La necesidad de conocer las características principales del desempeño de la modulación de banda ancha para PLC y su aplicación en redes energéticas inteligentes (*Smart Grid*).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar las características de los parámetros de desempeño de varios tipos de modulación para el uso de la tecnología PLC en redes energéticas inteligentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Especificar el estado del arte de la tecnología PLC
2. Describir modelos de modulación para la tecnología PLC.
3. Evaluar parámetros de desempeño de la modulación bajo OFDM para PLC y su prestación en redes energéticas inteligentes.

1.4 Hipótesis

Si se determina las ventajas y desventajas de la modulación OFDM en la tecnología PLC se puede especificar el mejor desempeño para transmitir servicios de telecomunicaciones, así como de control y supervisión de redes energéticas inteligentes.

1.5 Metodología de investigación

El presente trabajo investigativo previo al grado académico de Magíster en Telecomunicaciones, es exploratorio y descriptivo. Se indica que es “EXPLORATORIO”, debido a que examina el desempeño de varios tipos de modulaciones en la tecnología PLC, esto se lo concibe en el Estado del Arte. Es “DESCRIPTIVO”, puesto que permite analizar y evaluar características de desempeño de modulaciones en OFDM para PLC y evidenciar que es capaz de integrarse en redes energéticas inteligentes o *Smart Grids*.

Además, la investigación se enmarca en el paradigma “EMPÍRICO-ANALÍTICO” con un enfoque “CUANTITATIVO” puesto que se manejan cálculos matemáticos y estadísticos para mostrar indicadores que permitan caracterizar el desempeño de modulaciones OFDM.

Finalmente, el diseño del trabajo investigativo es “PRE-EXPERIMENTAL”, debido a que no se alteran las variables de estudio, sino que se procede a la observación directa mediante su simulación de los acontecimientos físicos electrónicos de varios tipos de modulaciones en OFDM en un canal de comunicación PLC.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA PLC

A continuación, se nombra las dos formas diferentes de la tecnología PLC, de acuerdo al organismo que la estudia:

- DPL/BPL (Digital Power Line/Broadband Over Powerline), según la FCC (Federal Communications Commission) en los Estados Unidos.
- PLC/PLT (Power Line Communications/Power Line Transmission), según la ETSI (European Telecommunications Standards Institute)

A inicios de 1924, en Estados Unidos se registraron dos patentes en la *American Telephone and Telegraph Company* (No:1.607.668 y No:1.672.940), en el campo de la "transmisión y transporte a través de circuitos de energía". Esto fue el primer indicio de un sistema para transmitir y recibir señales de comunicación a lo largo de un cableado trifásico de corriente alterna (Phil, 1998).

Desde esos años hasta la actualidad se han realizado investigaciones y experimentos, aunque no con resultados para ser explotados de forma comercial, la tecnología PLC tiene un reducido número de aplicaciones, aunque se necesitan más investigaciones exitosas para ser considerado como un modo primordial para la transmisión de señales digitales (Salman & El-Shafei , 2008).

Con el surgimiento de la banda ancha, la demanda para la transmisión de voz y datos a través de Internet en el hogar, escuelas y empresas aumenta continuamente. Mientras que la población va en aumento, la necesidad de comunicación entre estas es inevitable, teniendo así que la implementación de cableado especial sea una necesidad de las comunidades y ciudades en diferentes partes del mundo (Barrientos & Lucario, 2014).

La tecnología PLC consiente el uso de la infraestructura del tendido o cableado de red eléctrica existente para facilitar capacidades de red de alta velocidad, en otras palabras, esta tecnología admitiría la compatibilidad entre señales analógicas y digitales en un mismo canal de transmisión a través de una infraestructura ya

existente, siendo esta, la red de distribución eléctrica de Media Tensión (MT) y Baja tensión (BT).

Al respecto, investigadores de la Universidad de Málaga señalan que desde los años 90s, se han exteriorizado dos aplicaciones muy interesantes, los cuales se detallan a continuación:

1. El acceso a internet; El cual consiste en el uso de la red eléctrica de Baja Tensión (BT) para la última milla, es decir, integrarla como la parte de acceso de redes de telecomunicaciones de área extensa (WAN, *Wide Area Network*).
2. Las Redes domésticas; Cimentadas en el uso de la red eléctrica como red de área local (LAN, *Local Area Network*) dentro de los edificios, tanto en domicilios como en pequeñas oficinas. Su objetivo no es solo interconectar computadores, sino también dispositivos multimedia como televisores modernos etc., sin necesidad de más cable que el de la alimentación eléctrica (PLC Málaga, 2014).

Frente a tecnologías inalámbricas, PLC ofrecen más calidad de señal y más capacidad de transmisión, evitando los problemas de mala cobertura habitual en redes WiFi (Bertran, 2006). Además, las tasas de transferencia de datos, son muy superiores a los que ofrece WiFi.

2.1 Funcionamiento de PLC

PLC utiliza los tramos de la red eléctrica en MT y BT para el transporte de datos. Con un correcto acondicionamiento de la red de transmisión y distribución de energía eléctrica, es factible transmitir señales digitales por encima de la banda de 1 MHz, sin afectar el rendimiento eléctrico, así como las señales digitales. El punto de integración entre el sistema eléctrico de potencia y el sistema de comunicación es el transformador en una subestación eléctrica de distribución, “aquí es donde se produce el acoplamiento entre la red eléctrica y los equipos complementarios que se enlazan a una conexión de datos de alta velocidad proporcionados por un

proveedor de internet, ya sea por fibra óptica u otro medio, a un control PLC” (Barrientos & Lucario, 2014).

La transmisión paralela de energía y señales digitales a través de los conductores eléctricos, de manera simultánea, es posible dado que las dos señales son diferentes y son enviadas a distintas frecuencias. Mientras que la energía eléctrica es transmitida a una frecuencia de 50 a 60 Hertz, la tecnología PLC ocupa un espectro electromagnético en la banda de Alta Frecuencia (*High Frequency*, HF), cuyo rango de frecuencias varía dependiendo del tipo de tecnología empleado; por ejemplo, en banda estrecha se emplea un rango de frecuencia por debajo de los 500 kHz (CENELEC), mientras en banda ancha las frecuencias se encuentran alrededor de los 2 a 30 MHz (Home Plug AV) (C, Lewandowski, Wietfeld, & Kellerbauer , 2012).

Las velocidades de transmisión dependen del tipo de tecnología que se emplee (Home Plug 1.0, Home Plug AV, entre otras), el estado de las líneas de transmisión, así como los equipos PLC (Barrientos & Lucario, 2014). Así dentro de estos aspectos, en la figura 2.1, se muestra la ruta de la tecnología de acceso PLC desde inicios del año 2000 en donde inicia su primera generación o versión, desde el 2004 hasta la actualidad se encuentra en su 3 generación.

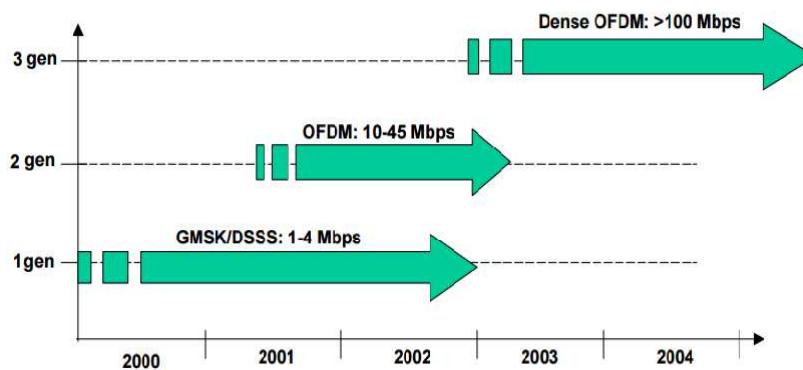


Figura 2. 1. Ruta de la tecnología de acceso PLC

Fuente: (DS2, 2004)

- De 1 a 4 Mbps con modulación DSSS/GMSK (1° generación).
- De 10 a 45 Mbps con modulación OFDM (2° generación).
- Mayores de 100 Mbps con Dense OFDM (3° generación) (DS2, 2004)

Actualmente, a través de la *Home Plug Powerline Alliance*, la especificación AV2 alcanza velocidades muy cercanas a los 1000 Mbps.

2.2 Categorías de PLC

La tecnología PLC se puede dividir en dos categorías; la banda estrecha y banda ancha de comunicación.

1. PLC Banda Estrecha o Angosta; Abarca el rango de frecuencia de hasta 150 KHz, con tasas de velocidades de kilobits hasta 2 Mbps (Bañon, Casado, & Rodríguez, 2007). PLC banda estrecha es utilizada en lectura de medidores o contadores eléctricos, en aplicaciones de domótica, supervisión de la red eléctrica.



Figura 2. 2 Rango de frecuencias para PLC Banda Estrecha

Fuente: (Bañon, Casado, & Rodríguez, 2007)

Según la figura 2.2, la frecuencia para PLC banda estrecha está distribuida en 4 bandas: A, B, C y D. Estas comprenden desde los 3 kHz hasta 148,5 KHz.

2. PLC Banda Ancha; Está prevista para proporcionar servicios de telecomunicaciones multiservicio basadas en protocolos de internet (IP). La gama de frecuencias para la tecnología de banda ancha es desde 1,61 a 34 MHz con tasas de bits teóricas de hasta 200 Mbps. Las frecuencias utilizadas y el esquema de modulación son dos factores principales que tienen una influencia significativa en la eficiencia del sistema y también la velocidad del servicio de PLC.

La tecnología PLC utiliza dos entornos o redes para transmitir datos: Acceso (*outdoor*) e *In Home* (red área local/residencial). Se enfatiza que las líneas de alimentación eléctrica a nivel latinoamericano, en el que se incluye el Ecuador están generalmente clasificadas como de AT (Alta Tensión >100 kV), de MT (Media Tensión 10-40kV) y BT (Baja Tensión 120-600V).

En la figura 2.3 se muestra un esquema general de red PLC y su dos redes eléctricas de operación.

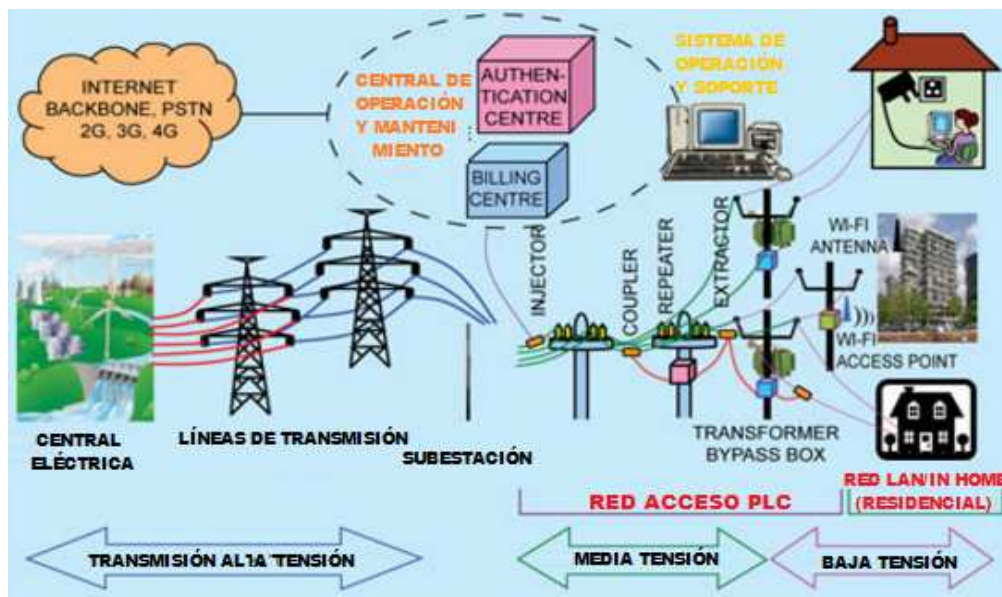


Figura 2. 3. Esquema general de red PLC

Fuente: (Anatory, Theethayi, & Thottappillil, 2009)

Los altos voltajes no son adecuados para la transmisión de datos (Elek, 2010). En cambio, en MT y BT es posible transmitir datos. Así desde la subestación eléctrica, los dispositivos *Head End* (HE) de PLC, que se instalen se enlazarán a su vez con el proveedor de servicios de internet.

Este proveedor tendrá una Central de Operaciones en la subestación eléctrica que tendrá un Sistema de Soporte de Operaciones (SSO) para la conectividad a internet, red telefónica pública conmutada (*Public Switched Telephone Network, PSTN*), redes del servicio universal de telecomunicaciones móviles tanto 3G como 4G (*Universal Mobile Telecommunications System, UMTS*), redes interoperables de

acceso por microondas (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*, WiMAX), etc.

El SSO proporciona el acoplamiento de los datos a una línea de distribución de MT. (Bastidas, 2015). Además, convierte los formatos de datos, agregados y concentra los flujos de datos de enlace ascendente, ofrece la funcionalidad de enrutamiento, ayuda a asignar ancho de banda y recursos, genera la facturación y los datos de carga, y ofrece diversas interfaces para conexiones de fibra óptica o inalámbrica. Se compone de varios servidores como los de autenticación, de autorización, de protocolo de control, de host dinámico, de nombres de dominio y de facturación para realizar las tareas de interfaces finales requeridas

2.2.1 Red de Acceso PLC

El entorno de red de acceso, transmite la información desde la red troncal de telecomunicaciones hasta la residencia del usuario. Puede utilizar la infraestructura eléctrica de MT y la de BT.

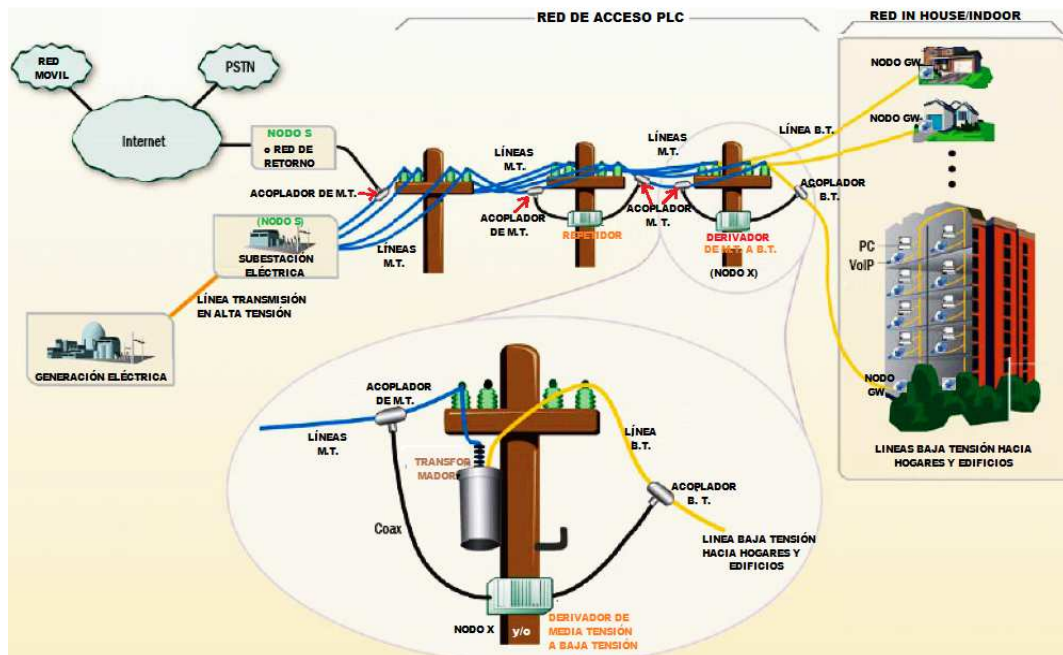


Figura 2. 4. Esquema de Red de Acceso PLC
Fuente: (Hossain, Toufikur, Asif, & Rahman, 2014)

En la figura 2.4, se indica que dentro de una subestación eléctrica puede instalarse el Nodo-S para conectarse a la red de Internet, la red telefónica pública conmutada y otras. Por lo general, se puede instalar en las subestaciones de MT donde se conectan varias líneas de distribución del mismo nivel de tensión. Sin embargo, los nodos-S también pueden instalarse en otro lugar en el sistema de distribución donde la conectividad de la red de transporte de datos sea necesaria.

La señal de PLC se puede inyectar en las líneas eléctricas entre dos conductores de fase, entre un conductor de fase y el conductor neutro, o en una sola fase o conductor neutro. Las señales de PCL se inyectan o se extraen de las líneas de MT/BT a través de acopladores capacitivos o inductivos. El inyector es un dispositivo que agrega los datos de usuario en las líneas de energía y proporciona una interfaz entre la línea de alimentación y el sistema de soporte de operaciones PLC que está conectado a la red troncal de Internet.

El transformador de trayectoria bypass (nodo X), transfiere los datos entre las líneas de MT y BT, y puede servir de repetidor a lo largo de la línea de MT. El nodo X o router, facilita su ubicación en cualquier poste de distribución eléctrica. (Barrientos & Lucario, 2014).

Se indica además que el transformador de trayectoria bypass suministra la señal al Nodo Gateway del usuario final. En el poste entre el transformador de trayectoria bypass (nodo X), se produce un *'puenteo'*, para la señal de MT con la de BT, obviamente se utilizan acopladores adecuados, con lo que se limita solamente a la señal de RF y no a la energía eléctrica en 60 Hz.

En el acoplamiento inductivo, los inductores se envuelven alrededor de cada línea. Por otro lado, el acoplamiento capacitivo utiliza un condensador para el acoplamiento y la señal se modula sobre la tensión de red. Los acopladores inductivos son más seguros para instalarse en líneas energizadas que los acopladores capacitivos. (Bañon, Casado, & Rodríguez, 2007).

2.2.2 Red en el Hogar (*In Home*)

El entorno *in home* está dirigido a crear redes de área local (LAN, *Local Area Network*) dentro de una residencia usando el cableado eléctrico. Es el paso final que transporta datos hacia el hogar o la oficina del abonado. Existen tres opciones para esta red (ver figura 2.5), Una a través de transformador de trayectoria bypass (nodo X), otra opción, transportar sin transformador de trayectoria bypass, la señal en la energía eléctrica en la línea de alimentación, mientras que otra opción, son los enlaces inalámbricos; desde los postes de distribución, un transmisor envía los datos de forma inalámbrica a los receptores en el hogar.

Desde la opción 1, en el poste de distribución eléctrica, el transformador y específicamente el router, puede incluir una o más funciones de comunicación tales como: el enrutamiento de datos, gestión de información de abonado, la asignación de Protocolo de Internet (IP), el cifrado, los datos simétricos de transmisión a todas las tomas de corriente eléctrica en el hogar o en la oficina del abonado. La señal puede ser recibida por un módem de línea eléctrica que se conecta a la pared. (Hossain, Toufikur, Asif, & Rahman, 2014).

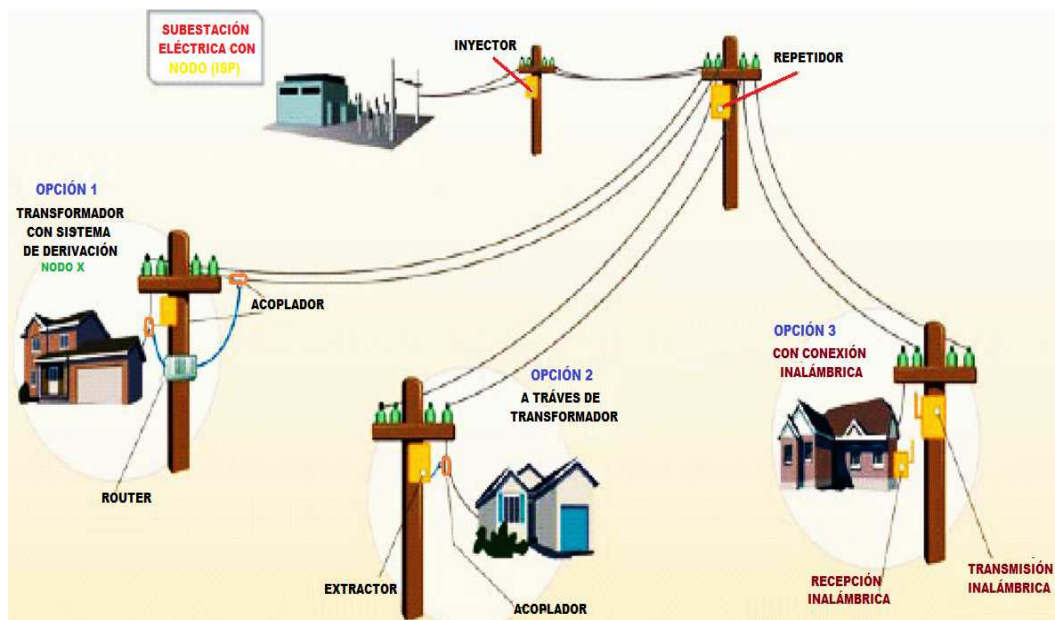


Figura 2. 5 Opciones de red en el hogar PLC

Fuente: (Hossain, Toufikur, Asif, & Rahman, 2014)

En la opción 2, los acopladores inductivos se utilizan para conectar módems PLCs a las líneas eléctricas de MT para extraer la señal de información. El módem envía la señal a la computadora. El módem PLC opera la carga de trabajo de la extracción de datos de una corriente eléctrica. A través del uso de técnicas de modulación especialmente desarrollados y de algoritmos adaptativos.

La opción 3, es una implementación híbrida de PLC, en esta opción, se utilizan normalmente sólo las líneas de MT y una red inalámbrica fija, se sustituye las líneas de BT, el equipo de derivación no acopla la señal de datos a la línea BT, pero la convierte a un formato inalámbrico y lo entrega al punto de acceso inalámbrico (AP) que también se encuentra en el poste de distribución. Para PLC híbrido, se requieren equipos de derivación (routers) con tablas de conversión inalámbrica, puntos de acceso inalámbricos y módems inalámbricos de usuario. (Hossain, Toufikur, Asif, & Rahman, 2014).

2.3 Arquitectura de interconexión

La tecnología PLC está basada en el sistema abierto de siete capas del modelo OSI para la interconexión y normalización de las funciones de comunicación, sin tener en cuenta su estructura interna subyacente y la tecnología (Álvarez, García , & González, 2010). De esta manera PLC está diseñado para operar en una arquitectura de dos capas que comprende las capas Física y la de Control de Acceso al Medio (*Media Access Control, MAC*).



Figura 2. 6 Pila de protocolos típico para un equipo PLC

Fuente: (Álvarez, García , & González, 2010)

La capa Física define las especificaciones eléctricas y físicas para los dispositivos, es decir, la relación entre un dispositivo y un medio físico. Incluye todo el sistema de distribución de la línea de alimentación eléctrica y el cableado en las tomas de corriente en el hogar. Las principales funciones de la capa Física incluyen el establecimiento y terminación de una conexión a un medio de comunicación, el control de flujo de la comunicación, la modulación y la codificación.

La capa MAC, que consta de sub-capas (MAC inferior) y la capa de control de enlace lógico (*Logical Link Control*, LLC), proporciona una interfaz entre la capa Física y las capas superiores para la conexión al medio físico. (Hashmat, Pagani, Zeddani, & Chonave, 2011).

2.3.1 Estándares desarrollados para PLC

En su etapa inicial, los fabricantes de sistemas PLC han desarrollado sus propias soluciones propietarias para los inyectores, repetidores, extractores y acopladores. Estas soluciones han sido implementadas en una variedad de arquitecturas de sistemas, que cuentan con diferentes técnicas de modulación y diseños en las capas Física, MAC y LLC. Tales sistemas han planteado problemas de incompatibilidad. (Anatory, Theethayi, & Thottappillil, 2009).

Con el fin de agilizar la funcionalidad e interoperación, las siguientes organizaciones han desarrollado estándares abiertos para los sistemas PLC.

- Alianza Europea de Investigación para PLC Abierto, (*Open PLC European Research Alliance*, OPERA)
- Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones, (*European Telecommunications Standards Institute*, ETSI)
- Universal Powerline Association, (Asociación Universal de Líneas de comunicación, UPA)
- Comité Europeo para Normalización de la Electrotécnica (*European Committee for Electrotechnical Standardization*, ECES)

- HomePlug Powerline Alliance, (Alianza HomePlug, HPA)
- Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*).

El IEEE ha constituido; el IEEE P1675 'Estándar de hardware para la banda ancha sobre línea eléctrica', el IEEE P1775 'Equipamiento para la comunicación: -sobrelíneas eléctricas: Métodos de Compatibilidad Electromagnética (EMC). Requisitos de ensayo y medida' y el IEEE P1901 'Proyecto de Norma para Redes -banda ancha por línea eléctrica: Acceso de Control al Medio y especificaciones de la capa física.

HomePlug Powerline Alliance ha desarrollado internamente especificaciones PLC: HomePlug 1.0 para velocidades de hasta 14 Mbps y HomePlug AV para velocidades superiores a 100 Mbps.

Desde el marco legal, las instalaciones internas de PLC (*In Home*) son 'libres' dentro de la residencia u hogar, siempre y cuando estas no causen efectos negativos en el entorno donde esta tecnología sea utilizada, en tal caso esta sería retirada del sitio. Con respecto a las instalaciones externas (red de acceso) donde las señales se transmiten en los niveles de MT y BT, para crear lazos eléctricos locales, la autoridad reguladora en telecomunicaciones debe conceder los permisos para realizar pruebas (Barrientos & Lucario, 2014).

2.4 Evolución de las técnicas de modulación para PLC

A diferencia del par trenzado (utilizado en DSL) o un cable coaxial blindado, las líneas eléctricas no tienen ningún mecanismo inherente de cancelación de ruido. Con el fin de hacer frente al entorno ruidoso de las líneas eléctricas, existen diferentes técnicas de modulación empleadas para PLC. Una técnica de modulación debe proporcionar una baja tasa de error de bits (*Bit Error Rate, BER*), así como un bajo índice de relación señal a ruido.

Con el fin de aumentar la inmunidad al ruido, es necesario incrementar la potencia de la señal. Sin embargo, la cantidad de la potencia de la señal podría aumentarse para obtener un cierto nivel de fidelidad, es decir, una BER aceptable, dependiendo del tipo particular de modulación empleada (Anatory, Theethayi, & Thottappillil, 2009).

En las etapas de evolución de las técnicas de modulación para PLC, muchos científicos concuerdan que la mejor técnica es, la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM). En la tabla 2.1, se muestra un resumen.

Tabla 2. 1. Resumen de algunas contribuciones basados en OFDM

Año	Nombres de colaboradores	Estudios y algunas de las aportaciones a PLC basado en OFDM
1966	Chang	Presentación de esquema OFDM para canales con decoloración dispersiva.
1968	R. Chang and R. Gibby	Estudio teórico de rendimiento de un esquema de transmisión de datos de multiplexación ortogonal.
1971	Weinstein y Ebert	Aplicación de Transformada Discreta de Fourier (DFT) a módems OFDM.
1980	Hirosaki	Un ecualizador basado en sub-canal era diseñado para un multiplexado ortogonal en sistema QAM.
	Keasler et al.	Se diseña el módem OFDM para redes telefónicas.
1981	Hirosaki	Diseño de un multiplexado ortogonal con sistema QAM usando la Transformada Discreta de Fourier
1985	Cimini	Investigación sobre la viabilidad de OFDM en comunicaciones móviles.
1986	B. Hirosaki, S. Hasegawa, A. Sabato	Los modem de datos para banda ancha. Grupo avanzado en multiplexado ortogonal con técnica QAM.
1987	Alard and Lasalle.	La OFDM para la transmisión digital.
1991	—	Estándar ADSL ANSI.
1994	—	HDSL estándar ANSI.
	Classen and Meyr	Investigación de la frecuencia, los algoritmos de sincronización de OFDM. Los sistemas adecuados para la comunicación a través de canales con Frecuencia de desvanecimiento selectivo.
1995	T. Pollet, M. Van Bladel, and M. Moeneclay	Investigación de la sensibilidad en sistemas OFDM a la frecuencia de portadora desplazada y el ruido de fase Wiener.
	—	Estándar ETSI DAB: La primera norma para OFDM en sistemas de radiodifusión digital.
1996	--	Norma ETSI WLAN.
1997	Fazel and Fettweis	Investigaciones en transmisión OFDM.
	--	Estándar ETSI DVB-T.
	--	Norma ETSI BRAN.

1999	--	Estándar IEEE 802.11a WLAN.
2000	B. Muquet, M.de Courville, P. Duhamel and G. Giannakis	Investigación sobre la igualdad mediante el concepto prefijo cíclico.
2002	--	Estándar IEEE 802.11g WLAN
2003	S. Aghajeri, H. Shafiee	Investigación sobre la sincronización para sistemas de comunicación OFDM.
2004	--	Estándar ETSI DVB-H
	---	Estándar IEEE 802.16 WMAN
	---	OFDM fue seleccionada como un candidato para el estándar IEEE 802.11n para siguiente generación WLAN.
	S. Kunaruttanapruk and S. Jitapunkul	Investigación en la ecualización de canales mediante el uso de "ecualización de realimentación".
	T. Han and X. Li	Trabajo en la ecualización de canales por el uso de "ecualización adaptable a ciegas".
	S. Lerkvaranyu, K. Dejhan and Y. Miyanaga	Aplicación de una red neuronal artificial (ANN) a un sistema OFDM.
2006	L.V. Ninh, T.A. Vu, H.T.Huynh and P. Fortier	Investigación de la sincronización para Sistemas de comunicación OFDM.
	E. Chen, R. Tao, X. Zhao	Trabajo en la ecualización de canal para Sistema de OFDM basándose en el Propagación de Regreso en Red Neural (BPNN)
2007	B. Naeeni, H. Amindavar	Red neuronal usada para el canal de igualación de sistemas OFDM.
	N. Rodríguez y C. Cubillos	Trabajo en Pre-distorsión Ortogonal Neural base para sistemas OFDM.
2008	M. Jiang, C. Li, H. Li and D. Yuan	Estudio del seguimiento de canal en función de red neuronal y filtro de partículas en Sistemas MIMO-OFDM
2009	J. Kassab and Dr. S. Nagaraj	Estudio de la modulación adaptativa en un sistema de comunicaciones OFDM con redes neuronales artificiales.
	Qingyi Quan	Estudio el multinivel <i>Hopfield</i> de red neuronal para el sistema OFDM con ruido de fase.
2010	H. Yigit and A. Kavak	Trabajo para la adaptación de Red neuronal en sistema selectiva en frecuencia MIMO OFDM
	R. Zayani, R. Bouallegue and D. Roviras	Estudio de la red neuronal para la compensación de Diafonía y la no linealidad en sistemas MIMO-OFDM
2011	F. Meucci, L. Pierucci and N. Prasad	Investigación sobre la base de la detección de redes neuronales de no linealidad de identificación en el sistema OFDM

Fuente: Elaborado por el autor.

Weinstein y Ebert (1971) iniciaron la aplicación de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) a módems OFDM, así se redujo la complejidad de la implementación de módems OFDM mediante el empleo de la técnica de DFT en sustitución de los bloques generadores sinusoidales y sus demoduladores. Se pudo transmitir varios

mensajes empleando un canal limitado en banda base y evitando por primera vez los fenómenos ICI (interferencia inter portadora) e ISI (interferencia inter símbolo).

No obstante, para combatir la ISI y la ICI se utiliza tanto un intervalo de guarda vacío entre símbolos como un ‘enventanado’ de tipo coseno (proceso que se aplica a las señales en el análisis frecuencial basado en la transformada de Fourier), alzado en el dominio del tiempo.

Como resultado de la gran cantidad de investigaciones en OFDM, y debido a pruebas de fiabilidad y rendimiento, ésta técnica se estandarizó como el estándar Europeo de Audio y Video Digital *Broadcast* (DAB- DVB) (Jáuregui, 2012). Pues, desde 1990 OFDM ha mejorado en términos de la funcionalidad y el rendimiento por muchas técnicas que incluyen su combinación con otras técnicas emergentes como esquemas *Multiple-Output Multiple-Input* (MIMO) (Guimaraes, 2010).

Por lo tanto, OFDM en conjunción con otra diversidad de métodos tales como MIMO y el código de Espacio-Tiempo por código de bloque (*Space-time block coding*, STBC), han demostrado ser la elección lógica para su consideración desde los sistemas inalámbricos 3G en adelante.

Después de las investigaciones fundamentales sobre OFDM, se descubrió entonces que la ortogonalidad podría ser obtenida y mantenida. Esto se logró mediante la mitigación de ISI usando *Inverse Discrete Fourier Transform* (IFFT) y la adición de prefijo cíclico.

2.4.1 Técnicas de modulaciones para PLC

La tecnología PLC hace uso de cuatro técnicas de modulación principalmente, con las cuales la señal modulada logra transmitirse con una óptima calidad al usuario final. Estas técnicas son:

- Multiplexado con División de Frecuencia Ortogonal (OFDM),
- Modulación de Espectro Distribuido (*Spread Spectrum Modulation*, SSM)

- Modulación de Multiportadoras de Espectro Distribuido (*Multi-carrier Spread Spectrum Modulation*, MSSM)
- Modulación Discreta Multitono.

2.4.2 Características de OFDM

Este tipo de modulación simple con múltiples portadoras, es fácil de entender y tiene varios defectos fundamentales. Primero, en una implementación realista hay una limitante en el ancho de banda, debido a que las subportadoras no pueden tener la forma de pulsos rectangulares perfectos y están limitadas en tiempo. Además, filtros paso bajas de muy alta calidad serán requeridos para mantener la ortogonalidad de las subportadoras en el receptor. Y más importante, este esquema requiere L unidades de RF independientes y trayectorias de demodulación (Alcántara, Sandoval, & García, 2010).

Para superar la necesidad de L unidades de RF en el transmisor y en el receptor, OFDM usa una técnica computacional efectiva, la Transformada Rápida de Fourier (FFT). En el procesamiento de señales digitales un algoritmo optimizado de la FDT es el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), está incluida en hojas de cálculo como Excel, Matlab etc. Su importancia radica en que con ella se puede calcular y visualizar el espectro de una señal (parte complicada de Fourier) e incluso filtrar señales con ella.

Un canal de transmisión eléctrico puede ser caracterizado por múltiples atenuaciones, equivalentes a las redes inalámbricas; esto es debido a un número concentrado de nodos y diferentes cargas conectadas. Así mismo, el retraso de las señales debido a dichas cargas y nodos crean ISI. Debido a que las señales retrasadas se obstruyen con las señales de origen, y degradan los sistemas, este retraso debe ser suprimido lo antes posible y el único medio para esto es a través de técnicas de modulación ortogonal (Edfors, Landström, Sjöberg, & Jaap van de Beek, 1996) y (Barrientos & Lucario, 2014)

La FFT y su inversa, la IFFT, pueden crear múltiples subportadoras ortogonales utilizando una sola unidad de RF. La clave para hacer OFDM realizable en la práctica es el uso del algoritmo FFT. (Barrientos & Lucario, 2014).

2.4.3 Modelo de comunicación básico de OFDM

Un modelo de comunicación básico del PLC con sistema OFDM se muestra en la figura 2.7.

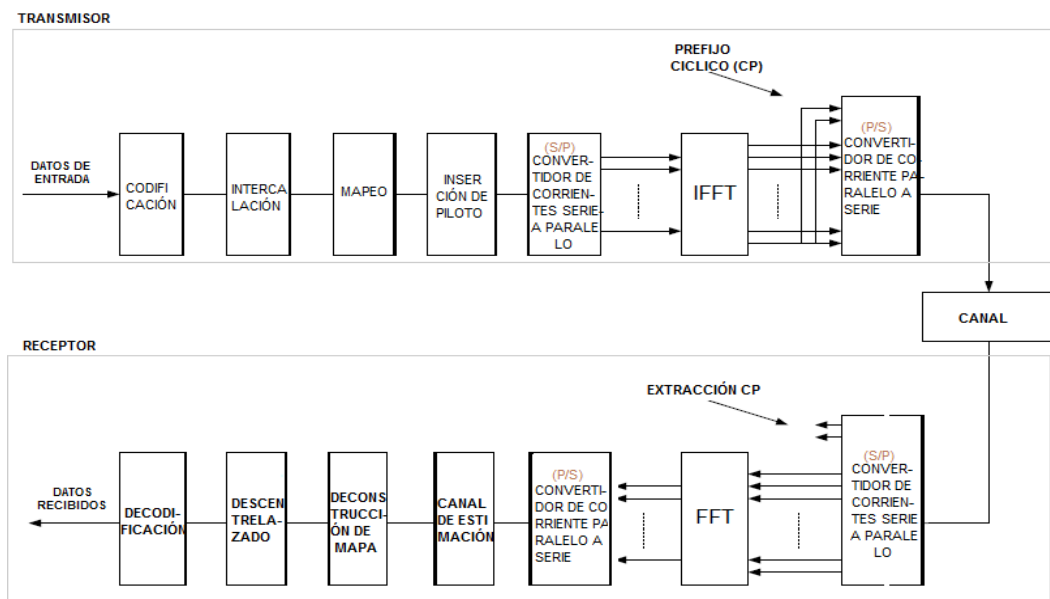


Figura 2. 7. El modelo básico de la comunicación PLC con el sistema OFDM

Fuente: (Mlynek, Koutny, & Misurec, 2010)

Los datos de alta velocidad transmitidos son codificados e intercalados y después mapeados. Posteriormente los datos son distribuidos como una transmisión de datos paralelos en varios canales, en el cual los datos de alta velocidad son convertidos en datos paralelos lentos en múltiples canales. “Incrementando el número de canales de transmisión paralela se reduce la tasa de transmisión que cada sub canal individual debe transmitir” (Barrientos & Lucario, 2014).

Los datos de transmisión de cada sub canal paralelo son modulados por cualquiera de dos técnicas; modulación por desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying*, PSK) o modulación de amplitud en cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*, QAM). Los datos son introducidos en un circuito que realiza una Transformada

Rápida Inversa de Fourier para así generarse la señal OFDM. La señal es nuevamente introducida a un circuito de inserción de tiempo de guarda para reducir el ISI y después inyectarse a un canal de comunicación PLC.

En el receptor, el tiempo de guarda es removido y la ortogonalidad de los canales puede ser mantenida usando un circuito que realice la Transformada Rápida de Fourier en el receptor.

Dado que los datos en un circuito FFT son paralelos, la conversión paralelo a serie es necesaria y desde la línea de transmisión se hace uso de un sistema de detección coherente y las estimaciones de canales son necesarias, las cuales son importantes ya que con ellas los datos pueden ser demodulados correctamente. El desempeño de un esquema de modulación en cualquier canal de comunicación puede ser determinado a través del desempeño BER (Anatory, Theethayi, & Thottappillil, 2009).

El codificador añade la información redundante a la secuencia de bits, si hay un error en la cadena de bits redundante, la información podría ser utilizada para una detección y corrección de errores con la ayuda de los codificadores de detección y corrección (Toki & Sato, 2014).

Las tecnologías de entrelazado se utilizan para eliminación de evolución de errores durante la transferencia. La transferencia de datos en serie se obtiene a partir de bloques de la codificación. Este bloque está conectado a un bloque de asignación (Sartenaer & Delogne, 2006).

2.5 El Ruido en línea de transmisión eléctrica

En el rango de frecuencias de interés para PLC el omnipresente ruido es el causante de interferencias, se debe considerar que el ruido de la línea eléctrica se presenta a toda hora y lugar, y es dependiente de la frecuencia. El comportamiento variable en el tiempo se debe principalmente a la naturaleza de cambio dinámico de la carga conectada a las líneas de energía. La línea de ramificación, el número y tipos de ramas, las longitudes de los tramos de línea, los tipos de equipos conectados a la

línea de alimentación (tales como baterías de condensadores y transformadores), y el tipo de cargas conectadas, todo afecta a las características de la línea eléctrica. (Velásquez, Zambrano, & Medina, 2014).

Los inconvenientes para transmitir por PLC están desde su concepción, las redes eléctricas no fueron diseñadas en principio para la transmisión de señales de comunicación de alta frecuencia. Si se desean transmitir regímenes binarios del orden de Mbps, hace preciso situar las señales en la banda de frecuencias medias (Cañete, 2007).

A las frecuencias de 3 a 30MHz les corresponde una longitud de onda λ entre 10m y 100m, respectivamente, y los efectos de propagación se consideran apreciables si la distancia excede $\lambda/8$, que es fácilmente superable en estos sistemas. Al mismo tiempo, la naturaleza arborescente de la red eléctrica residencial, con tramos de línea sin terminación (en circuito abierto) o con cargas no necesariamente adaptadas a la impedancia de la línea, provoca múltiples reflexiones de la señal dando lugar a desvanecimientos por interferencia destructiva.

2.5.1 Características del ruido en PLC

Se reconoce que el entorno de ruido de una red PLC es muy complejo, aun así, el ruido puede ser clasificado en cinco categorías:

- 1) El ruido de fondo de color/ruido coloreado.- Los aparatos y componentes que operan a baja potencia, generan ruido en conjunto con la densidad espectral de potencia relativamente baja
- 2) El ruido de banda estrecha/angosta.- Son señales sinusoidales causadas por la entrada de estaciones de radiodifusión, sobre todo en amplitud modulada
- 3) El ruido periódico impulsivo sincrónico.- Por la frecuencia de la red, los componentes; como diodos rectificadores, transistores, cuyo corte de voltaje y umbral de tensión conducen a acciones de conmutación en sincronismo con la frecuencia de la red eléctrica.

- 4) El ruido periódico impulsivo asíncrono. - Es un ruido a la frecuencia principal, causada principalmente por fuentes de alimentación conmutadas.
- 5) Ruido asíncrono impulsivo. - Es causada por los transitorios de conmutación en la red de alimentación

Y esta clasificación se puede resumir en tres tipos: ruido de fondo de color, ruido de banda angosta y ruido impulsivo. (Moreno, 2009). El ruido colectivo es la suma de todos los tipos de ruido antes mencionados.

2.6 Estado de la Investigación sobre el canal PLC interior para banda ancha

El canal PLC puede ser considerado como un canal de “múltiples rutas” debido a las reflexiones generadas por las discontinuidades de la impedancia ocasionada por fallas en los acoples, lo que genera desvanecimiento de la señal en frecuencia (Philipps, 2000).

El canal tolera la convivencia de la señal de energía con diferentes tipos de señales de ruido e interferencias ocasionadas por diversas fuentes, además las líneas no están sometidas a cargas constantes sino que por el contrario varían constantemente a causa de los dispositivos que se conectan y desconectan en cualquier momento y que ocasionan cambios en las características del medio y afectan su funcionamiento en el tiempo, a diferencia de lo que ocurre en una red Ethernet (Mendez, 2002) y (Martínez, Muñoz, & López, 2008).

Todos los trabajos consultados sobre modelado están centrados en modelos estadísticos de canal cuyos parámetros se ajustan, con procedimientos de optimización en muchos casos, a partir de datos obtenidos. Las investigaciones realizadas son experimentadas con uno de los factores que afecta severamente a las líneas de potencia, esto es el ruido. Este no solo afecta la línea de distribución de energía, sino las líneas de comunicación (Velásquez, Zambrano, & Medina, 2014).

2.7 Caracterización del Modelo de canal PLC interior

Tres modelos de canales PLC interior, se han evaluado como:

1. *Simplified bottom-up*. Ascendente Simplificado o ‘de abajo hacia arriba’
2. L-Taps o L-Derivación
3. Multipath o Multitrayecto.

Todos ellos proporcionan generadores de canal, con los parámetros de acuerdo con ciertas distribuciones probabilísticas, que permiten obtener conjuntos estadísticos de canales. El comportamiento Lineal Invariante en el Tiempo (*Linear Time Invariant*, LTI) supone un comportamiento de los canales.

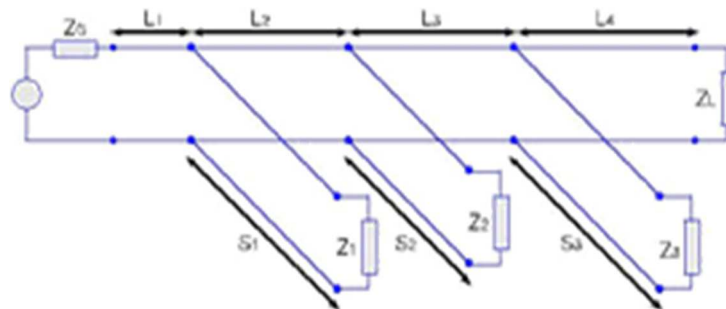


Figura 2. 8 Modelo Bottom-Up o Simplificado ascendente (de abajo hacia arriba)

Fuente: (Cañete, 2007)

En la figura 2.8, el S1 es un nodo o punto de transmisión compartido, lo que significa que varios usuarios pueden utilizar el mismo punto de distribución. Esto implica, desde el punto de vista de la línea de transmisión, que se pueden tener múltiples cargas conectadas en un solo nodo. Esto indica que el modelo está compuesto por un número limitado de tramos de líneas de transmisión, se calculan los ecos de su respuesta al pulso y se ajustan los parámetros finales.

En cualquier caso, en todas estas aproximaciones se asume que el sistema es lineal e invariante en el tiempo, aunque muy dependiente de la ubicación sobre la que se establezca el enlace. Este enfoque de modelado se denomina como ascendente simplificado, fue propuesto por Zimmermann y Dostert (2002), ellos describen el canal (0,5-20 MHz) basado en el fenómeno multitrayectoria. La naturaleza de

múltiples trayectos del canal PLC se debe a la presencia de ramas y desajustes de impedancia que causan las reflexiones múltiples. La función de transferencia del canal puede expresarse como:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0+a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f (d_i / v_p)} \quad (2.1)$$

Donde N es el número de trayectorias dominantes, g_i es el peso de la trayectoria i -ésima determinado por reflexiones y transmisiones, a_0 y a_1 representan la atenuación del cable, k determina la dependencia de la atenuación en la frecuencia f , d_i es la longitud de la i -ésima trayectoria y v_p es la velocidad de fase del cable. Los siguientes parámetros también se ajustan a la ecuación 2.1:

g_i : Factor de peso

$e^{-(a_0+a_1 \cdot f^k) \cdot d}$: Porción de atenuación

$e^{-j2\pi f (d_1/v_p)}$: Porción de retardo

A continuación, se describen tres modelos para canal PLC interior:

1. Modelo *Buttom-up* o Ascendente simplificado.- Los parámetros de esta topología se seleccionan acuerdo con consideraciones físicas. Un generador de canal está disponible para su descarga en: <http://www.plc.uma.es/canales.htm>.

A pesar de que las longitudes de las líneas o las cargas de impedancia se generan a partir de distribuciones estadísticas independientes, la topología da una correlación natural a los parámetros de comportamiento de las respuestas de canal (teoría de la línea de transmisión) como la atenuación, dispersión de retardo y la raíz media cuadrática (RMS-DS; *Root Mean Squared-Delay Spread*). Los comportamientos de los canales generados se han comparado con los canales medidos para evaluar su validez.

2. Modelo *L-Taps* o Derivación.-. El segundo modelo incluido en este estudio fue propuesto por Galli (2011) con parámetros más flexibles y se aplica no sólo a PLC, sino también a otros canales de línea fija como coaxial o línea telefónica. Se basa en un modelo para la respuesta de pulsos del canal con L derivaciones, donde sus amplitudes y retrasos (lo que define el carácter de trayectos múltiples) son seleccionados de acuerdo con distribuciones estadísticas, pero con la imposición de una correlación entre la atenuación del canal y dispersión de retardo con la raíz media cuadrática (Galli, 2011). La correlación se extrae de los canales medidos.

Se consideran dos casos para este modelo de canal: $L= 2$, con derivaciones de igual amplitud, y $L= 1000$, con toma de amplitudes seleccionados de acuerdo con un perfil de potencia de retardo en forma de la función Gaussiana.

3. *Multipath* o Multitrayecto. Fue propuesto inicialmente por Zimmermann y Dostert (2002), para el escenario exterior, consiste en un modelo de trayectoria múltiple de frecuencia de la respuesta del canal con un número limitado de caminos. Algunos años más tarde, Tonello (2006) lo adaptó a los canales interiores del PLC, definiendo distribuciones estadísticas por sus valores de los parámetros.

Existe un generador basado en este modelo, disponible en; www.diegm.uniud.it/tonello/. Este modelo carece de valores de atenuación realistas. Por lo tanto, para este estudio, las respuestas de canal del conjunto generado se han reducido de manera que su atenuación media coincide con los canales medidos (Cañete, 2007).

2.7.1 Modelo Multitrayecto

El modelo de trayectos múltiples es un modelo ampliamente utilizado para la investigación de la transmisión de datos a través de redes de línea de potencia. El ruido de fondo de color y el de banda estrecha se consideran como ruido de fondo que se extendió uniformemente a lo largo del espectro, es decir que se considera que es ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN) para el análisis PLC

En el capítulo 3, se muestra las mediciones realizadas con un generador de canales, que se puede descargar para fines académicos.

2.8 La convergencia de PLC a redes energéticas inteligentes

El desarrollo de redes energéticas inteligentes (SG, Smart Grid), es la aplicación de las nuevas tecnologías de comunicación e información digital para gestionar en forma eficiente los recursos de generación, los sistemas de transmisión y distribución y las instalaciones del cliente. (EDENOR-FIEL, 2012)

La Plataforma Tecnológica Europea, define a Smart Grid como “la aplicación de nuevas tecnologías de comunicación e información digital, para gestionar en forma eficiente los recursos de generación, transmisión, distribución y las instalaciones del cliente. Esto, con el objetivo de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible” (OLADE, 2012). En la figura 2.9 se muestra un esquema general de una red inteligente.

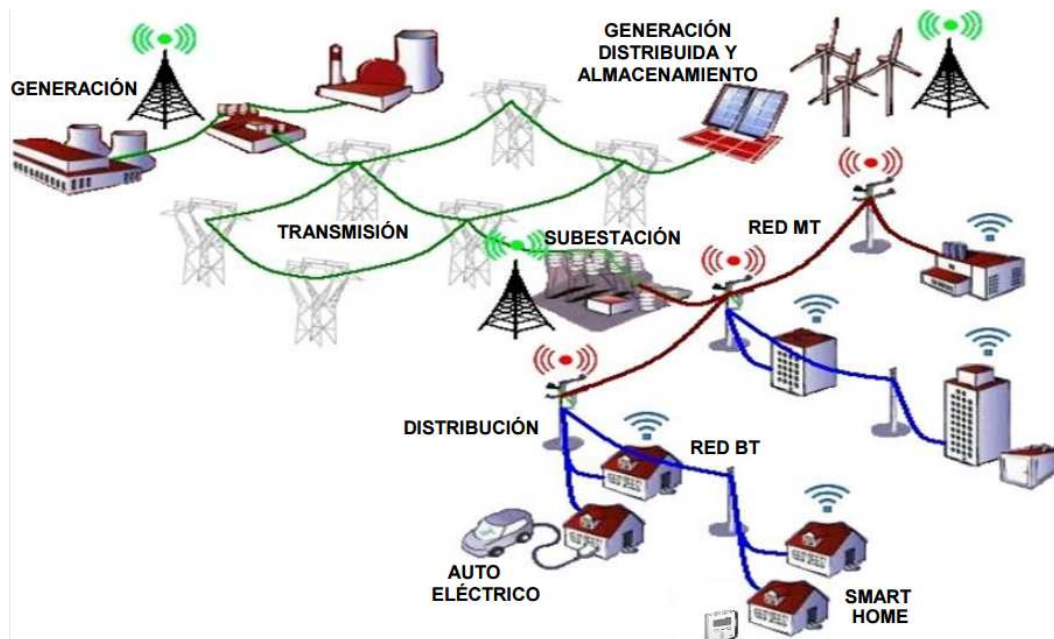


Figura 2. 9. Esquema de red inteligente
Fuente: (EDENOR-FIEL, 2012)

El concepto Smart Grid, se caracteriza por el flujo bidireccional de energía y de información, permitiendo que el usuario interactúe de forma directa con la central generadora. También Smart Grid envuelve servicios como el control de

electrodomésticos, ahorro de energía y reducción de costos, proporcionando al cliente de equipos inteligentes, que le ayuden a decidir cómo y cuándo consumir energía de forma responsable. Otro aspecto importante a considerar con la implementación de Smart Grid es la reducción del impacto ambiental, mediante la disminución del desperdicio de energía al proporcionar sólo la energía solicitada; y mediante la incorporación de energía de fuentes alternativas como la energía eólica y la solar. (Poveda, Medina, & Zambrano, 2015).

Las ventajas que ofrece la moderna red de potencia inteligente sólo son posibles si se emplea la tecnología de comunicación adecuada, ya que ésta es la que va a permitir el control del flujo de energía, el control de fallas y la fiabilidad de todo el sistema. Es por ello que esta selección deber hacerse tomando en cuenta su entorno de aplicación y los requisitos de la red, ya que de esto dependerá el buen funcionamiento de todo el sistema de distribución de energía.

Es a través de la red de MT donde la información de los equipos y de las condiciones del flujo de potencia debe ser transmitida entre las subestaciones dentro de la red. Algunas aplicaciones de la comunicación por líneas de MT son:

- Control remoto para la detección de hurto de energía
- Verificación de la temperatura de los transformadores.
- Control de la tensión en el secundario de los transformadores.
- Reportes de fallas.
- Medición de calidad de energía.

Algunos aspectos específicos se detallan a continuación:

- 📊 Observabilidad: Permite que el estado de la red eléctrica pueda ser observado de forma precisa y oportuna mediante el uso de avanzados sensores y tecnologías de medición;
- 📊 Controlabilidad: Permite el control efectivo del sistema de potencia, observando el estado de la red eléctrica;
- 📊 Análisis de tiempo y toma de decisiones: Se permite la mejora del proceso de toma de decisiones inteligentes;

- Auto-adaptable y auto-sanación: Previene trastornos de alimentación y distribución a través del auto-diagnóstico y la localización de fallos.
- integración de las energías renovables: Se permite integrar las energías renovables, como la solar y eólica, así como la electricidad a partir de micro red y es compatible con los servicios de abastecimiento de energía eficientes y seguros para vehículos eléctricos, el hogar inteligente y otros.

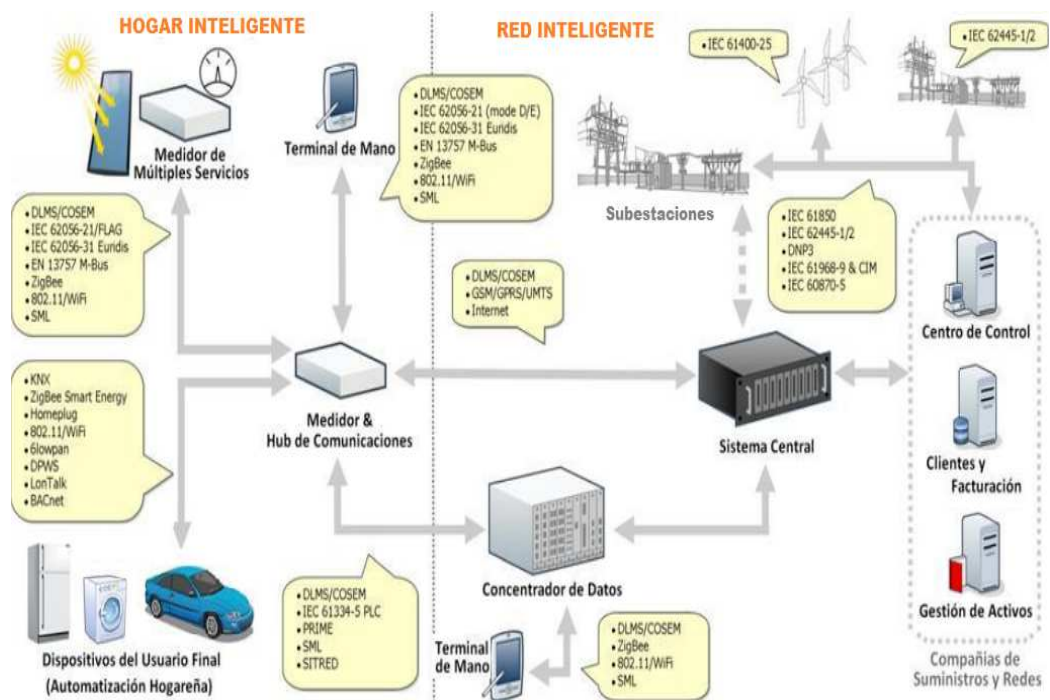


Figura 2. 10 tecnologías e interconectividad en redes inteligentes

Fuente: (EDENOR-FIEL, 2012)

Hauser & Bakken (2005) indican los requisitos que deben cumplir las futuras arquitecturas de comunicación y se propone un modelo llamado *Grid Stat* (aplicación middleware que proporciona una interfaz de programación) para satisfacer las futuras necesidades de la red de distribución eléctrica.

Con *Smart Grid* se pueden utilizar muchos tipos de tecnologías para la comunicación, pero PLC es la única que ofrece un costo menor en cuanto a la

infraestructura ya que las líneas ya están disponibles (Poveda, Medina, & Zambrano, 2015).

2.8.1 Ejemplo de proyecto de red inteligente

Un proyecto de red eléctrica inteligente deberá desplegar implementaciones para:

- Telecontrol y Telesupervisión de Subestaciones y Redes de AT y MT
- Telesupervisión de Centros de Transformación MT/BT.
- Telecontrol de Red de Media Tensión
- Telemedición de Medidores



Figura 2. 11 Telecontrol en subestaciones eléctricas

Fuente: (EDENOR-FIEL, 2012)

PLC permite la utilización de la red eléctrica para mejorar la seguridad y eficiencia de la misma, a través de servicios de monitoreo, diagnóstico, gestión de redes, control remoto de cargas, telemetría entre otros más. (ITU, 2014).

La Telesupervisión de Centros de Transformadores (CT) implica la automatización de dichos centros, este aspecto favorece a la ‘inteligencia’ de la red de distribución eléctrica. Existen las siguientes funciones que deben alcanzarse:

- Supervisión de la red de MT/BT.
- Supervisión del transformador de potencia.
- Detección de paso de falta.
- Mejora de la calidad de onda.
- Gestión medida facturación.

Estas funciones hacen necesario que el CT inteligente esté dotado de nuevos componentes: sensores, equipos de supervisión/automatización, equipos de comunicación (tanto con la red de MT como con la de BT). El CT está alojado en una envolvente que incorpora en su interior: Transformador de potencia; Elementos de corte y aislamiento necesarios para la configuración; Equipos de automatización.

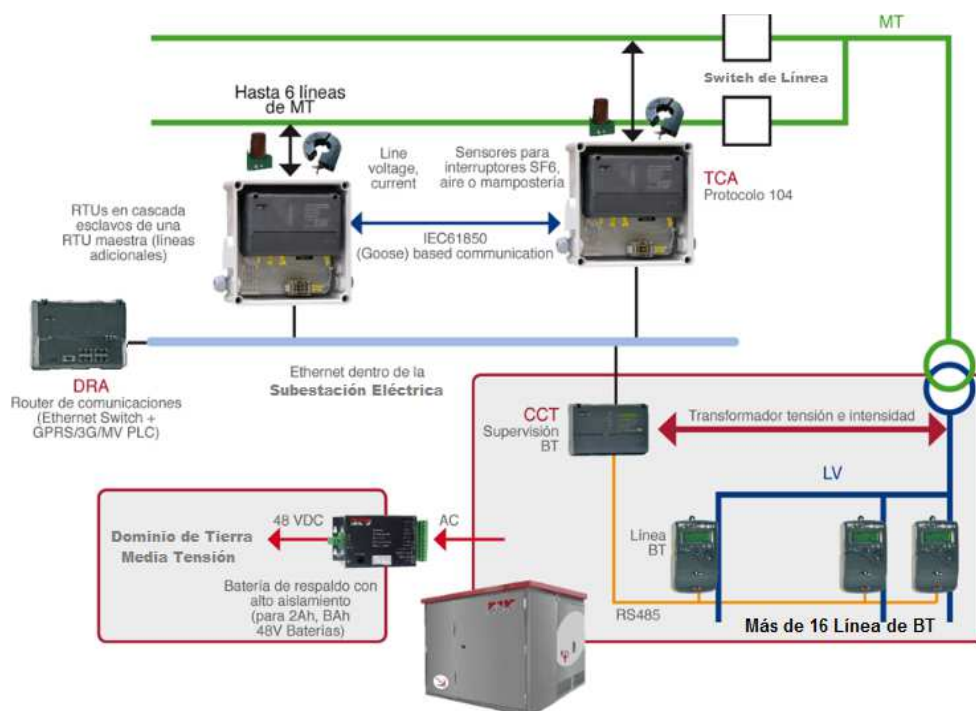


Figura 2. 12. Esquema de conexión general de centro de transformadores inteligentes

Fuente: (ZIV, 2014)

Se considera que debe constar de:

- Sistema de Control: Supervisión del Transformador y de las líneas de MT y BT, contadores, concentrador de medida, equipos de comunicaciones (switch + módem + equipo transceptor), elementos de conexión, magneto térmico, transformador de aislamiento, fuente de alimentación y baterías.
- Supervisión: Detección de Paso de Falta, localización y respuesta ante faltas; mejorar el tiempo de respuesta ante incidencias. Involucra equipos de comunicaciones, entradas digitales para captación de información, unidad de control, unidades de adquisición de datos de cada posición, transductores de tensión e intensidad.
- Sensores auxiliares: Toroidales de intensidad y de tensión resisitivos, detección de intrusos y de fuego, disparo de la ventilación, temperatura del transformador, niveles, bobina de disparo del interruptor de 230 Vca.

El componente principal del CT ha sido y seguirá siendo el transformador de potencia. Para supervisar su estado se recogerá la información directamente de las señales digitales/analógicas proporcionadas por el transformador de potencia. En el caso de que se detecte alguna alarma, se registrará y se enviará al nodo de supervisión/automatización de MT para que el mismo pueda tomar la decisión adecuada. (ZIV, 2014).

Existen parámetros o "señales de entrada" que permiten monitorizar el estado del transformador y obtener información que facilite el análisis y planificación de su mantenimiento, gracias a algoritmos internos de los equipos encargados de la monitorización.

Tabla 2. 2. Parámetros de control de entrada y salida del transformador de potencia

ENTRADAS	SALIDAS
Temperatura de los bobinados	Estado de carga. Estimación de vida residual. Avisos y alarmas
Temperatura del núcleo	
Temperatura del dieléctrico	
Medición de tensiones y corrientes	Alarma
Nivel de fluido dieléctrico	

Fuente: (ZIV, 2014)

Para la recepción de esta información el centro debe estar preparado con un nodo de control equipado con sensores que la provean, además de un equipo que las sepa

interpretar y tenga capacidad de envío de esta información hasta el despacho, actuando como unidad remota. En una red de distribución las posibilidades de aplicar la inteligencia no terminan con la red en sí misma, sino que deben continuar con la conectividad WAN a todos los equipos del CT, siendo capaz de gestionar prioridades de acuerdo con los distintos tipos de tráfico cursados. Por otra parte, incorporará las funciones LAN (red de área local) que permitirán el establecimiento de una red Ethernet en el CT, a la que se conectarán el resto de nodos. (ZIV, 2014).



Figura 2. 13 Telesupervisión a centros de transformadores de MT y BT

Fuente: (EDENOR-FIEL, 2012)

Se controla el nivel de calidad de servicio; se ingresa a zonas con acceso limitado a otras tecnologías de comunicaciones, se adapta completamente a la topología de la red de la compañía eléctrica. Se controla las latencias y tiempos de respuesta de la red de telecomunicaciones; ofrecerá confiabilidad, la gestión de la red será mucho más rápida al no depender de terceros; por este aspecto los costos resultarán bajos.

Son claras las ventajas que tienen las compañías eléctricas al disponer de una red propia, es evidente que la nueva red de telecomunicaciones deberá basarse tanto en medios propios como en medios de terceros, respecto a los cuales las tecnologías celulares presentan muchas ventajas dado su ancho de banda, su disponibilidad y facilidad de puesta en marcha. (ZIV, 2014).

En la figura 2,14 se muestra la arquitectura de comunicación que utilizan los centros de transformadores inteligentes.



Figura 2. 14. Telesupervisión de centros de transformadores y su arquitectura

Fuente: (EDENOR-FIEL, 2012)

la Telesupervisión de CT puede efectuarse con el apoyo de tecnologías PLCs e inalámbricas.

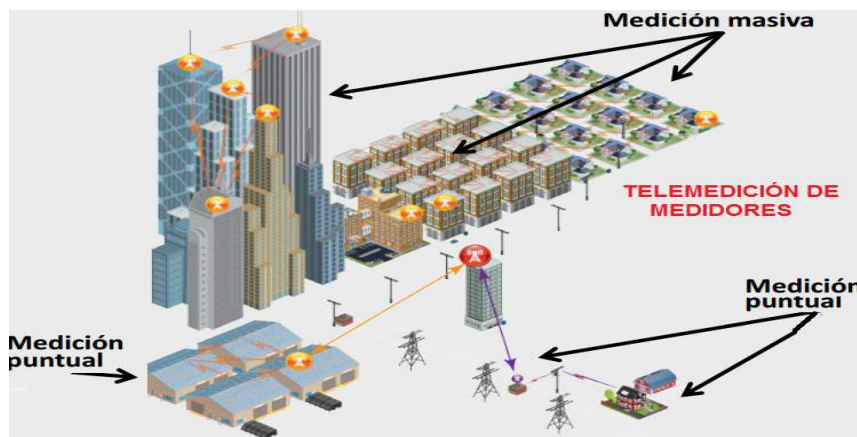


Figura 2. 15 Esquema de la telemedición

Fuente: (EDENOR-FIEL, 2012)

La telemedición a través de medidores eléctricos ofrece mayor control sobre la energía consumida y admitirá la discriminación horaria para dinamizar su capacidad para la telegestión, es decir suministrará el control y la gestión de la red en ambos sentidos. Consigue la posibilidad de ofertar sistema prepago, con ello se conseguirá optimizar la eficiencia del sistema y mejorar la calidad del suministro.



Figura 2. 16. Esquema de conexión para la telemetría masiva

Fuente: (EDENOR-FIEL, 2012)

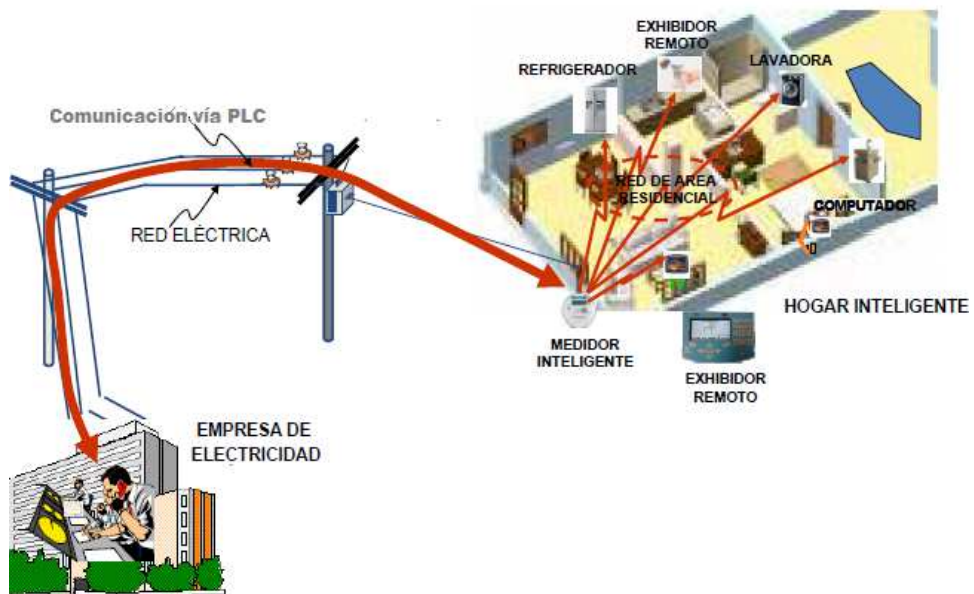


Figura 2. 17. Representación del Hogar Inteligente

Fuente: (Vidrio, 2011)

En cuanto a datos en banda ancha, se han realizado pruebas que evidencian, que se aprovecha más el ancho de banda con PLC que en una señal inalámbrica. Por ejemplo, WiFi no es adecuado para transportar las nuevas aplicaciones de audio/vídeo. En la figura 2.18, se muestra por colores las velocidades de Wifi en una residencia.

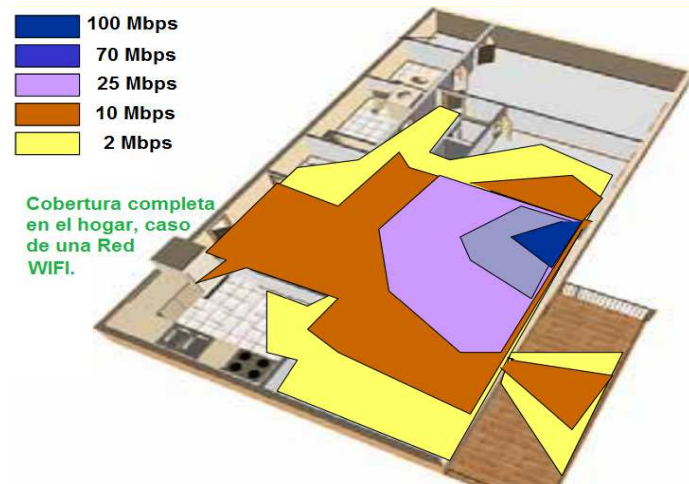


Figura 2. 18. Escenario de cobertura Wifi en una residencia

Fuente: (DS2, 2004), (ITU, 2014)

La red WIFI es limitada, en cambio PLC suministra una velocidad más alta, más segura y más estable que la tecnología inalámbrica. Esta tecnología emergente tiene un futuro potencial si se logra reducir el nivel de interferencias. (ITU, 2014).

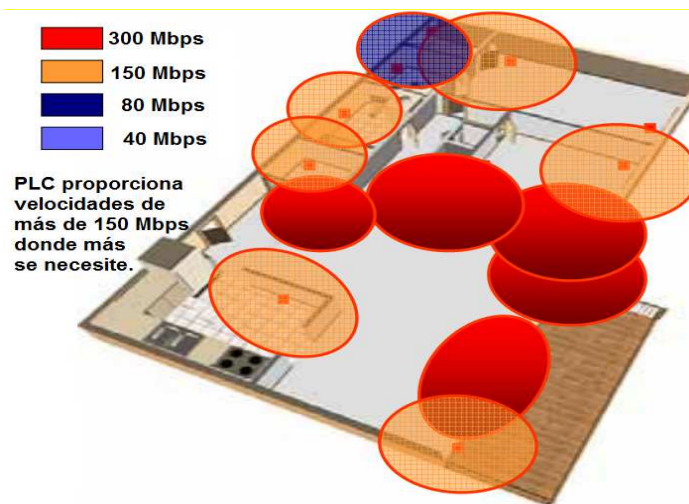


Figura 2. 19 Velocidad en Mbps para PLC

Fuente: (DS2, 2004) (ITU, 2014)

Según el informe final de 'Banda Ancha en los países Andinos' elaborado por la ITU (2014) indica que PLC puede ofrecer oportunidades de negocios para las empresas proveedoras de energía, en conectividad de última milla y prestación del servicio de Internet.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE SIMULACIONES DEL CANAL DE PLC INTERIOR

En este capítulo se realizará el análisis de las simulaciones realizadas para el canal PLC en interiores.

3.1 Modelo de Canal Multitrayecto

En la línea de transmisión de energía, la propagación de señales de datos no sigue una sola ruta o camino unidireccional, sino que sigue una trayectoria múltiple, siguiendo un patrón muy similar a las señales inalámbricas. Una representación de la red eléctrica, se muestra en la figura 3.1. T_x es el punto de transmisión (subestación eléctrica/proveedor de servicios) y R_x el punto de recepción (medidor automático, el cliente u otros aparatos).

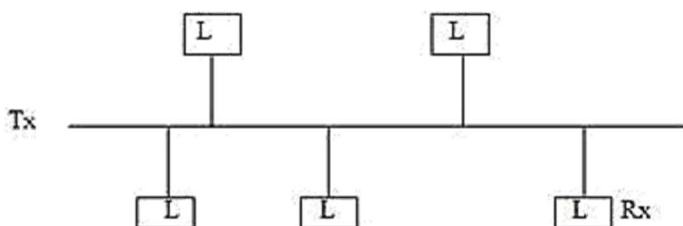


Figura 3. 1 Topología típica de la línea de transmisión de la red eléctrica para la última milla

Fuente: (Cañete, 2007)

Una pequeña sección de la figura 3.2 podría ser utilizada para estudiar la propagación multitrayecto de la señal.

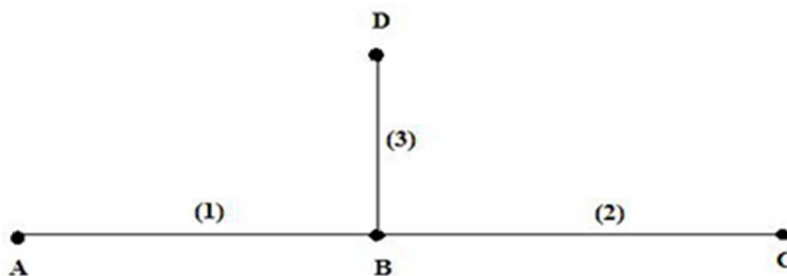


Figura 3. 2. Propagación Multitrayecto de la señal de D a C

Fuente: (Cañete, 2007)

Sea D el punto de transmisión y C el de recepción. La señal generada en D podría adoptar las siguientes posibles rutas:

1. D – 3 – 2 – C
2. D – 3 – 3 – D
3. D – 3 – 1 – 3 – D
4. D – 3 – 1 – 1 – 2 – C

Las expresiones indicadas son una lista de las diferentes rutas de propagación. La potencia de la señal y BER de la señal recibida depende de la trayectoria seguida y la longitud de la trayectoria. La propagación por trayectos múltiples es también responsable del retardo (τ_i) en PLC, que viene dado por:

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{v_p}$$

Donde d_i es la longitud del camino, c_0 es la velocidad de la luz y ϵ_r es la constante dieléctrica del material aislante.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, d_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}$$

$H(f)$ es la respuesta de frecuencia de canal entre dos puntos. Cuando la red se hace grande y es compleja podría ser separada en subcanales para el estudio individual. Donde $A(f, d_i)$ son las pérdidas del cable, que podría ser en forma de calor o fuga de señal, etc., f es la frecuencia de operación, g_i es el factor de peso que es directamente proporcional al número de reflexiones y trayectoria que sigue:

$$|g_i| \leq 1$$

Los valores de g_i y $A(f, d_i)$ se determinan experimentalmente, sobre la base de factores dados anteriormente y se propone un modelo matemático de la trayectoria múltiple en PLC.

Sobre la base de la investigación de Ma, So & Gunawan (2004) los datos experimentales $A(f, d_i)$ pueden aproximarse mediante la fórmula matemática para el factor de atenuación (α)

$$a(f) = a_0 + a_1 \cdot f^k$$

Las variables a_0 y a_1 son parámetros de atenuación que conducen a:

$$A(f, d) = e^{-\alpha(f) \cdot d} = e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot d}$$

El uso de $A(f, d_i)$ en $H(f)$ da el modelo de canal para la línea de transmisión de PLC:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot d} \cdot e^{-j2\pi f (d_1/v_p)}$$

Dónde:

g_i : Factor de peso

$e^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot d}$: Porción de atenuación

$e^{-j2\pi f (d_1/v_p)}$: Porción de retardo

Una manera de resumirlo se aprecia en la figura 3.3.



Figura 3. 3 Esquema del modelo general del Multitrayecto

Fuente: El autor

3.2 Modelo de canal PLC para interiores con ruido

Los canales de la red eléctrica interior pueden modelarse, como se muestra en la figura 3.4, por medio de un filtro lineal y periódicamente variante con el tiempo (LPTV-Linear and Periodically Time-Varying) y un ruido ciclo-estacionario

compuesto por tres componentes: ruido de fondo, ruido impulsivo e interferencias de banda estrecha.

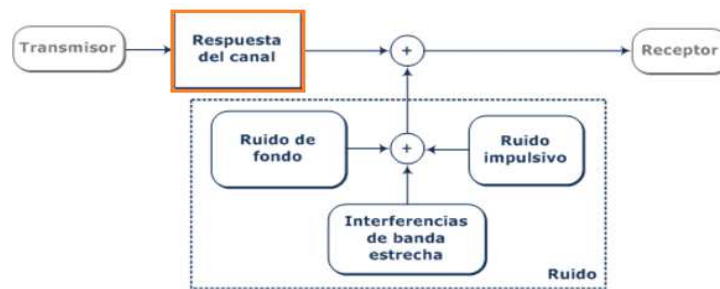


Figura 3. 4. Modelo de canal PLC interior adicionando ruido

Fuente: (PLC Málaga, 2014)

En el link; <http://www.plc.uma.es/canales.htm>, se pueden descargar los elementos necesarios para realizar simulaciones de técnicas de transmisión conforme a este modelo. Es posible generar canales, con todos sus parámetros, con ello es posible estimar las pérdidas del cable. Puede usarse para fines no comerciales siempre que se cite la fuente.

El simulador de PLC elaborado por Cañete (2007), es un paquete de software que contiene un conjunto de funciones en MATLAB que proporcionan la respuesta en frecuencia de canales realistas de la red eléctrica interior de viviendas y pequeñas oficinas con una topología simple.

3.3 Modelado de canal PLC interior

Para el modelado de la transmisión de información (datos) a través de la línea de transmisión de energía se empleará algunas técnicas de codificación bajo modulación OFDM. Las particularidades de OFDM son muy convenientes para solucionar los problemas de ruido y multitrayectoria.

El siguiente diagrama muestra el esquema del modelo realizado, se inicia con el transmisor de datos (trama aleatoria de 1024 bits) luego se dirige a la etapa compuesta por el codificador y modulador, luego ingresa al filtro IFFT

(Transformada Inversa de Fourier) con esto se genera el símbolo OFDM con dicha trama modulada (se utilizará en tres técnicas de modulación) pasa por el canal PLC después llegara al lado receptor que utiliza, la etapa de Transformada de Fourier, y finalmente su etapa demoduladora-decodificadora.

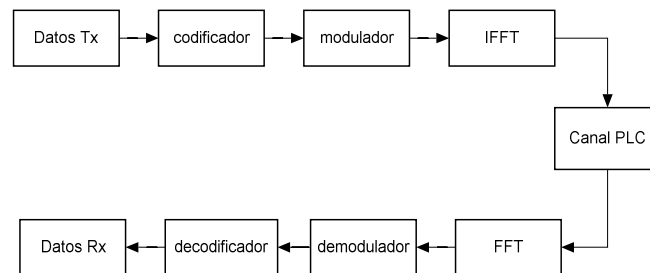


Figura 3. 5 Modelado para canal PLC interior

Fuente: el autor

A través de BERTool herramienta de la librería de MATLAB se prepara el simulador para calcular:

- Relación E_b/N_0 (Energía por bit/densidad espectral de potencia de ruido) es un parámetro de medida de la SNR (relación señal a ruido), también conocida como "SNR por bit" viene dado en deci Belios que el canal producirá.
- Máximo número de errores que contabiliza el medidor BER (maxNumErrs) antes de detener la simulación.
- Máximo número de bits (maxNumBits) que se han de procesar en cada ciclo.
- Valor calculado de BER (BERCalculada).

3.3.1 Selección de técnicas de modulación OFDM

Se simularán 3 técnicas de modulación: BPSK, QPSK y QAM. Con BERTool y la función de generación aleatoria, se puede obtener una trama de valores que pueden representar la trama de bits a transmitirse para 3 técnicas de modulación.

Modulación BPSK:

Para BPSK existen solo dos símbolos transmitidos (-1 y 1) que se transmiten en fase.

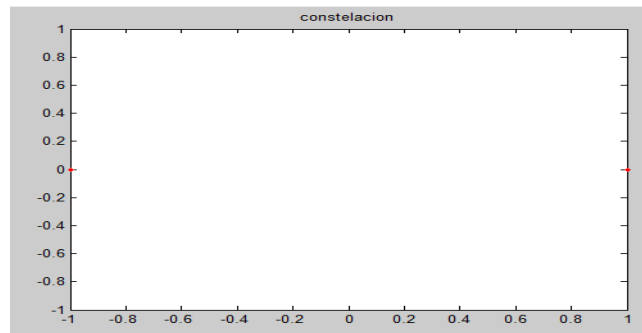


Figura 3. 6 Constelación de Símbolos BPSK

Fuente: el autor

Modulación QPSK:

En cambio, en QPSK, prevalecen 4 símbolos en fase-cuadratura, la entrada digital a un modulador QPSK es una señal binaria (base 2) que produce 4 condiciones diversas de entrada. En la figura 3.7 se muestra que cada símbolo está en fase (0.7, -0.7 en todos los cuadrantes formando 45°).

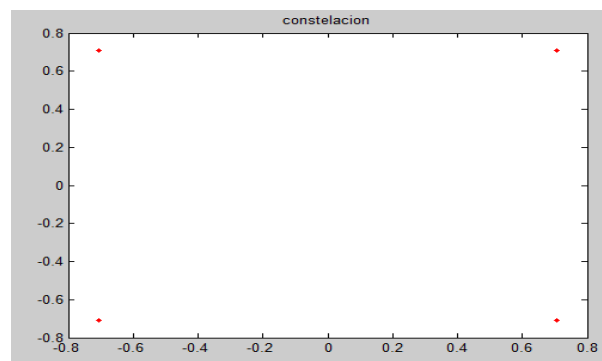


Figura 3. 7 Constelación de Símbolos en QPSK

Fuente: el autor

Modulación 16QAM:

Los datos en modulación por amplitud 16 QAM al ser visualizados en su diagrama fase-cuadratura se muestran la ubicación de sus 16 símbolos.

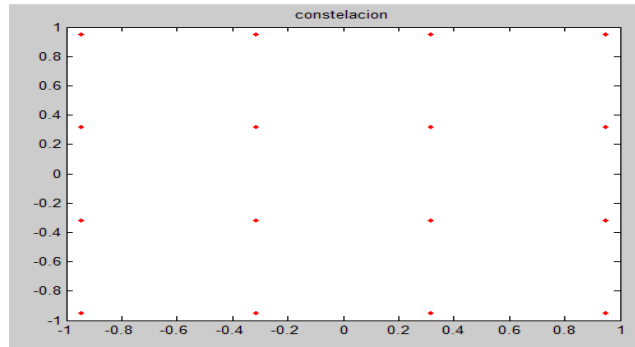


Figura 3. 8 Constelación de Símbolos 16 QAM

Fuente: el autor

Modulación 64QAM:

Como en la anterior técnica de modulación, cada símbolo se genera de acuerdo a la trama de bit, y esta técnica muestra 64 símbolos en su diagrama fase-cuadratura.

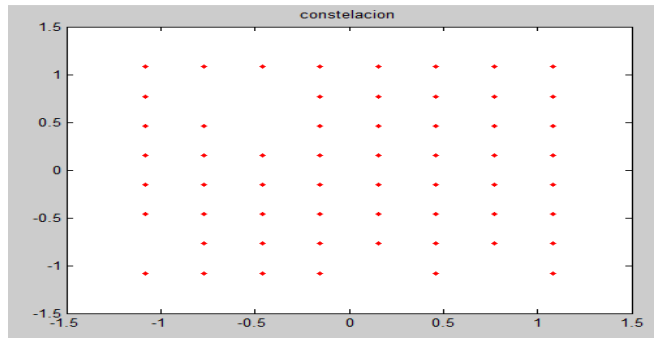


Figura 3. 9 Constelación de Símbolos para 64 QAM

Fuente: el autor

En OFDM, el ancho de banda disponible se divide en M subportadoras o subcanales y cada subcanal se modula independiente a baja velocidad usando esquemas BPSK, QPSK o QAM, los sub-canales no interfieren entre sí porque las portadoras son ortogonales logrando una gran eficiencia espectral.

3.3.2 Subportadoras

Con OFDM se incrementa el período de los símbolos (se dividen los datos en todo el espectro disponible), traspasando toda la información digital de serie a paralelo, para modularla en un esquema de portadora única y transmitirla a través de varias subportadoras adyacentes, ortogonales y espaciadas entre sí un número de ciclos

enteros (prefijos cíclicos). A continuación, se muestran resultados de subportadoras en las 3 técnicas de OFDM.

Modulación BPSK:

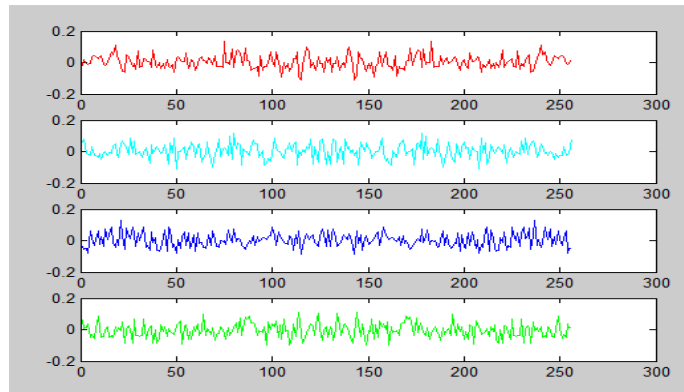


Figura 3. 10 Generación de subportadoras para BPSK

Fuente: el autor

El número de subportadoras con que se simula $N=4$, permite que un símbolo OFDM este compuesto de 4 símbolos modulados previamente y transmitirlos de manera paralela aumentando la eficiencia del canal reduciendo el tiempo de duración de los símbolos. En la figura 3.10, se aprecia que las subportadoras para BPSK su secuencia de bits (1024) se dividen para 4 por su conversión serie-paralelo, como es $1024/4$ se tiene 256 bits transmitidos.

Modulación QPSK:

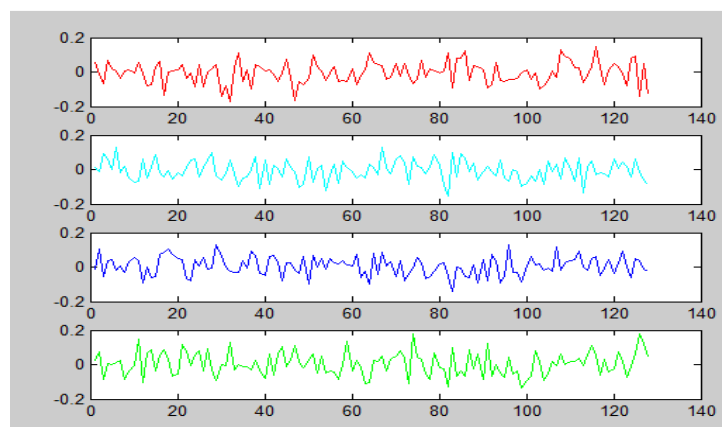


Figura 3. 11 Generación de subportadoras para QPSK

Fuente: el autor

En la figura 3.11, se aprecia que las subportadoras para QPSK su secuencia de bits se dividen para 4, pero se debe tomar en cuenta que 2 bits es 1 símbolo, (512/4 sería 128 bits a transmitirse).

Modulación 16QAM:

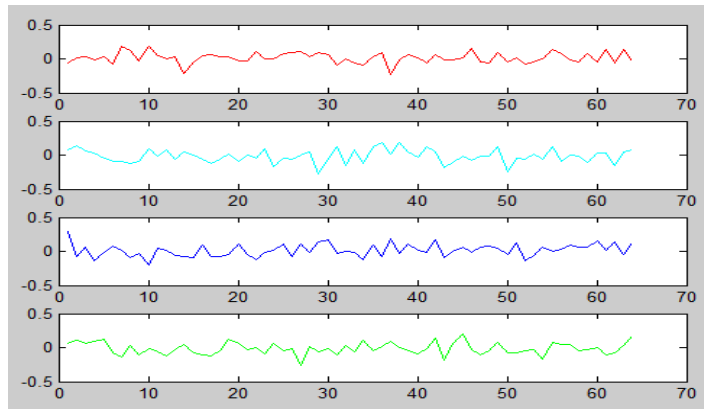


Figura 3. 12 Generación de subportadoras para 16QAM
Fuente: el autor

En la figura 3.12, se aprecia que las subportadoras para QPSK su secuencia de bits se dividen para 4, pero se debe tomar en cuenta que 2 bits es 1 símbolo, (1024/16 sería 256 y a su vez dividida para 4, resultando 64 bit a transmitirse).

Modulación 64QAM:

Las secuencias de bits se dividen las subportadoras, se toma en cuenta que, (512/4 sería 128/4, sería 32 bits a transmitirse).

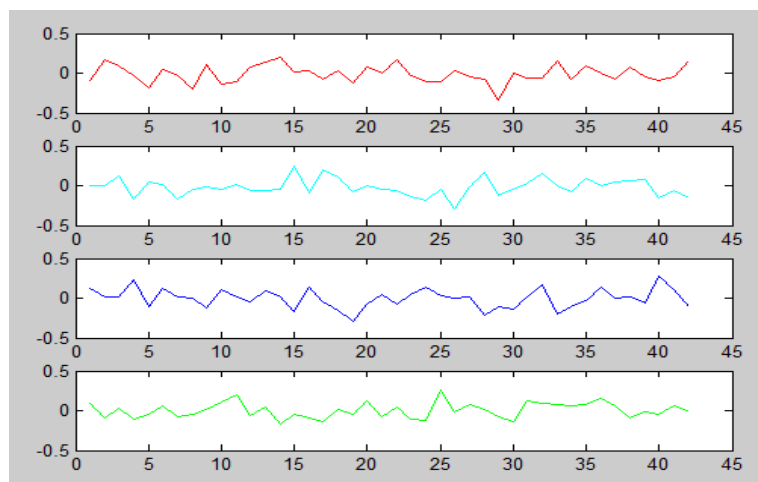


Figura 3. 13 Generación de subportadoras para 64QAM
Fuente: el autor

Todas las señales de información (subportadoras) una vez que atraviesa el canal PLC, y en su paso hacia el receptor, este debe pasar por el filtro FFT donde la señal paralela es convertida a serie.

3.4 Señales de Subportadoras OFDM transmitida

El procedimiento de generar la trama de bits es de un modo determinista y aleatorio, a continuación, se muestra la señal con subportadoras OFDM para cada una de las 3 técnicas OFDM propuestas.

Modulación BPSK:

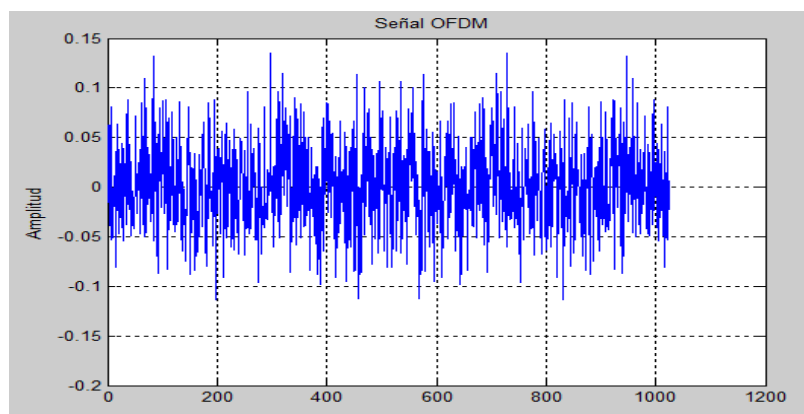


Figura 3. 14 Señal subportadoras OFDM en BPSK transmitido

Fuente: el autor

Modulación QPSK:

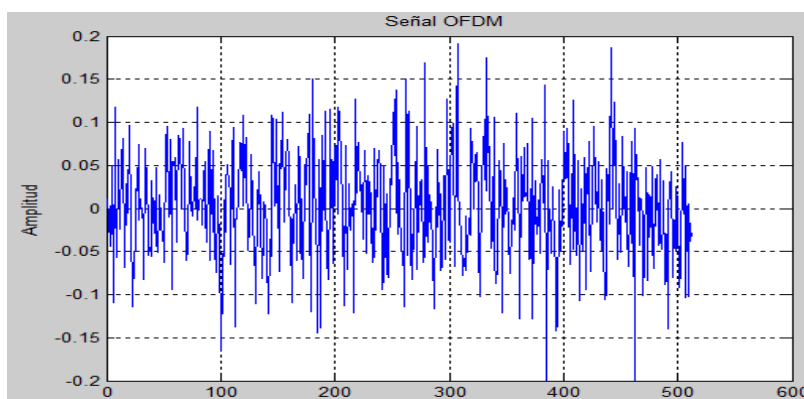


Figura 3. 15 Señal subportadoras OFDM en QPSK transmitido

Fuente: el autor

Modulación 16QAM:

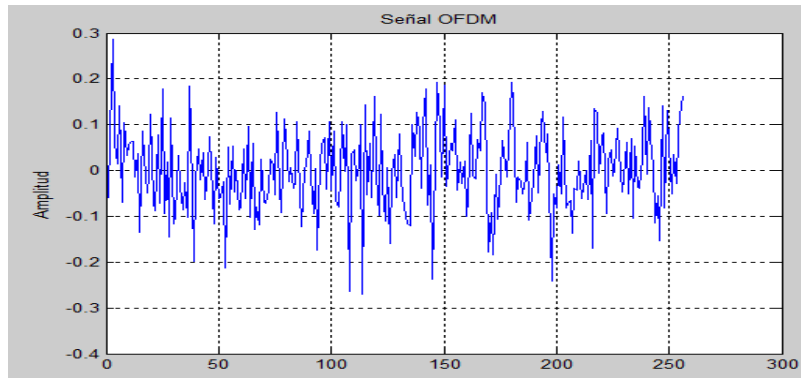


Figura 3. 16 Señal subportadoras OFDM en 16QAM transmitido

Fuente: el autor

Modulación 64QAM:

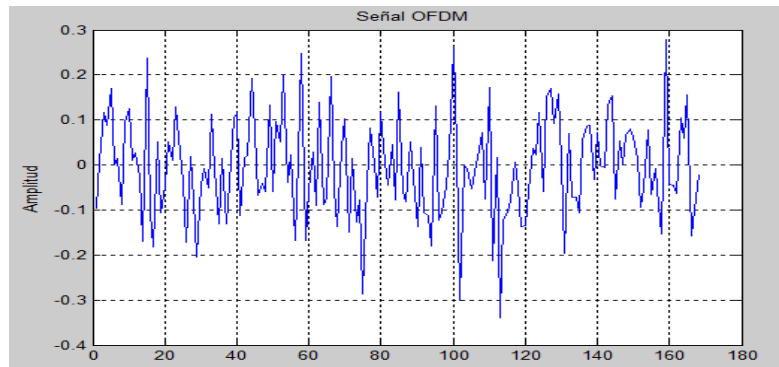


Figura 3. 17 Señal subportadoras OFDM en 64QAM transmitido

Fuente: el autor

3.5 Resultados del modelado de canal PLC interior

El diagrama siguiente muestra la representación del modelo de un canal PLC agregando ruido.

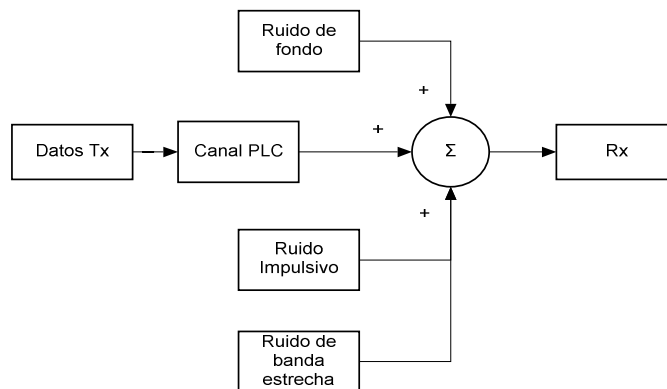


Figura 3. 18 Modelado de canal PLC adicionando ruido según propuesta del grupo Málaga

Fuente: el autor

3.5.1 Respuesta en frecuencia del canal PLC para interiores

En el canal PLC a medida que la frecuencia va incrementándose también se produce un incremento de la atenuación. La respuesta de frecuencia obtenida para el canal PLC interior de estudio, se muestra en la figura 3.19.

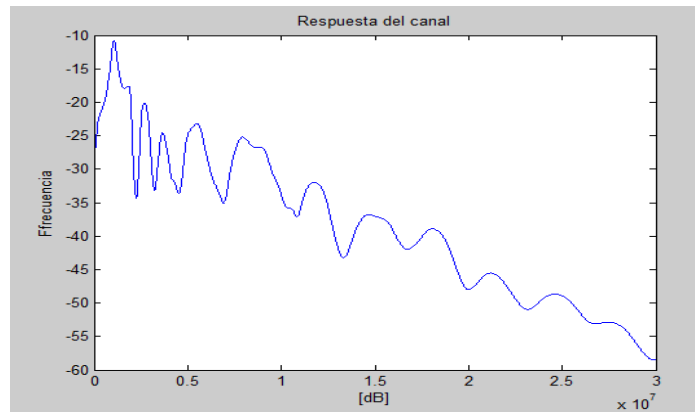


Figura 3. 19 Respuesta del canal PLC

Fuente: el autor

Es importante generar el canal de ruido blanco Gaussiano aditivo (*AWGN Additive White Gaussian Noise Channel*), que es el ruido impulsivo periódico sincronizado con la frecuencia de red causado por la conmutación en la red de potencia eléctrica y el ruido impulsivo asíncrono causado por transientes aleatorios con tiempos de duración en microsegundos a milisegundos. En el modelo AWGN, la potencia del ruido posee una densidad espectral uniforme (ruido blanco), el cual se suma a la señal original. En la figura 3,20 se muestra el ruido impulsivo asíncrono

Ruido impulsivo

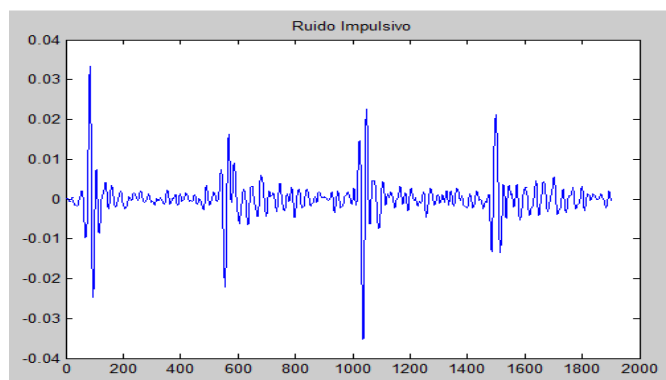


Figura 3. 20 El Ruido Impulsivo dado por generador PLC

Fuente: el autor

Del generador de canales PLC creado por el grupo de investigadores de la Universidad de Málaga, se puede descargar tres archivos Matlab que contiene la forma de onda de una componente de ruido impulsivo muestreada a 50 MHz. La primera de ellas pertenece a un ruido impulsivo periódico síncrono, mientras las otras dos conciernen a ruidos impulsivos periódicos asíncronos. Todas las amplitudes están en voltios.

Respuesta en frecuencia del Ruido Impulsivo

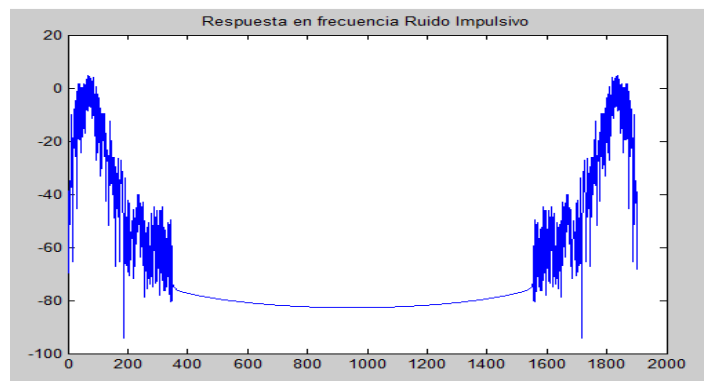


Figura 3. 21 Respuesta de frecuencia al Ruido Impulsivo dado por generador PLC

Fuente: el autor

El impulso de ruido impulsivo periódico síncrono aparece una vez por ciclo de red. Por su parte, el impulso periódico asíncrono 1 se repite con una frecuencia de 26.3 kHz y el asíncrono 2 con 48.93 kHz. Este último tipo de impulsos (asíncrono 2) está presente durante todo el ciclo de red.

Ruido de fondo

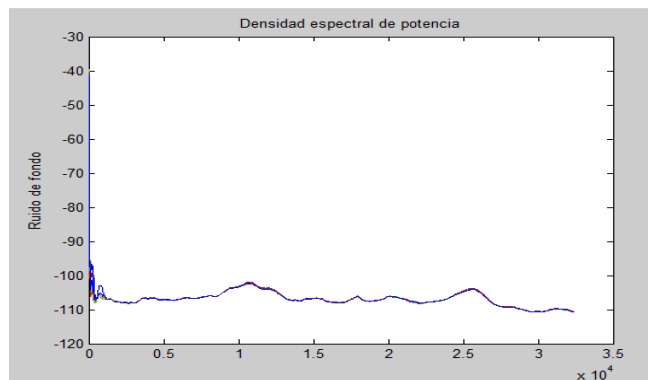


Figura 3. 22 Ruido de fondo vs Densidad espectral de potencia

Fuente: el autor

El ruido de fondo se lo emite a través del generador por el canal PLC y se agrega o se lo suma al canal PLC durante la transmisión (según modelo de figura 3.18). Los generadores de ruido detallan densidades espectrales: entonces el ruido total se calcula, subsiguientemente, sumando la densidad espectral total calculada en el canal PLC. Se muestran los resultados de la señal transmitida o información en cada una de las 3 técnicas de OFDM.

BPSK:

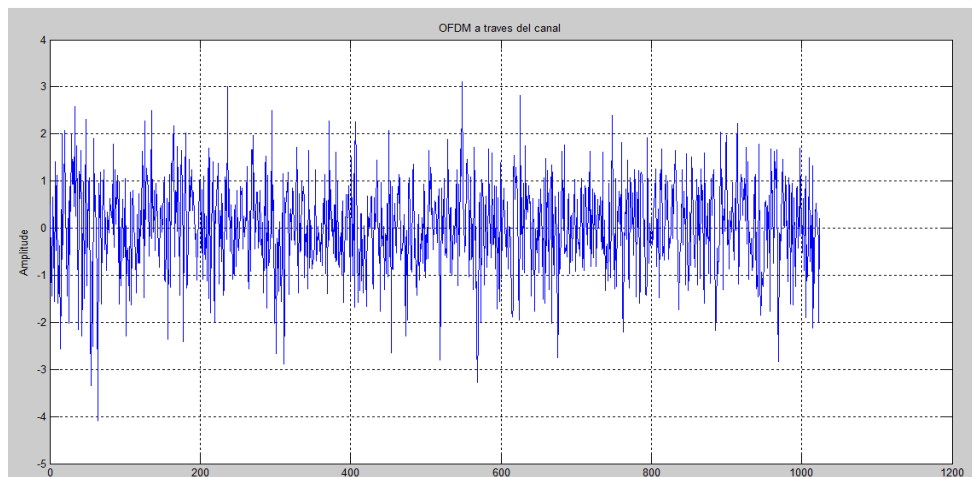


Figura 3. 23 Señal de información transmitida (bits) por BPSK
Fuente: el autor

Se indica que el mensaje de información a transmitirse por el canal PLC (valores alfanuméricos) se convirtió en la trama o cadena de bits. a través de convertidores en línea (<https://www.branah.com/ascii-converter>).

QPSK:

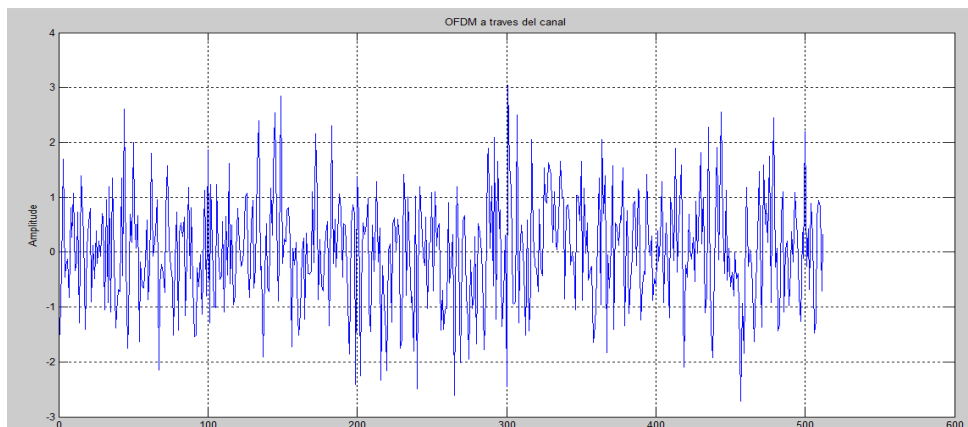


Figura 3. 24 Señal de información transmitida (bits) por QPSK
Fuente: el autor

16QAM:

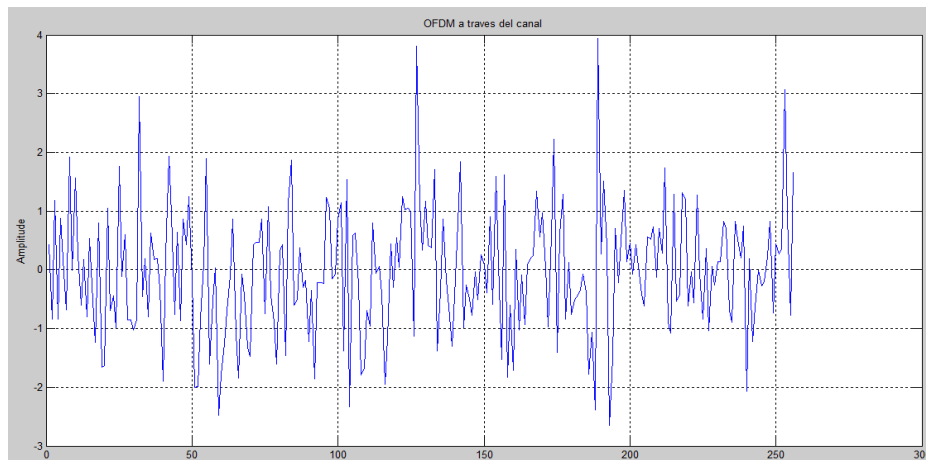


Figura 3. 25 Señal de información transmitida (bits) por 16QAM

Fuente: el autor

La señal que corresponde al símbolo OFDM se ve corrompida por las componentes de interferencia que adicionan nivel a la amplitud de la señal.

64QAM:

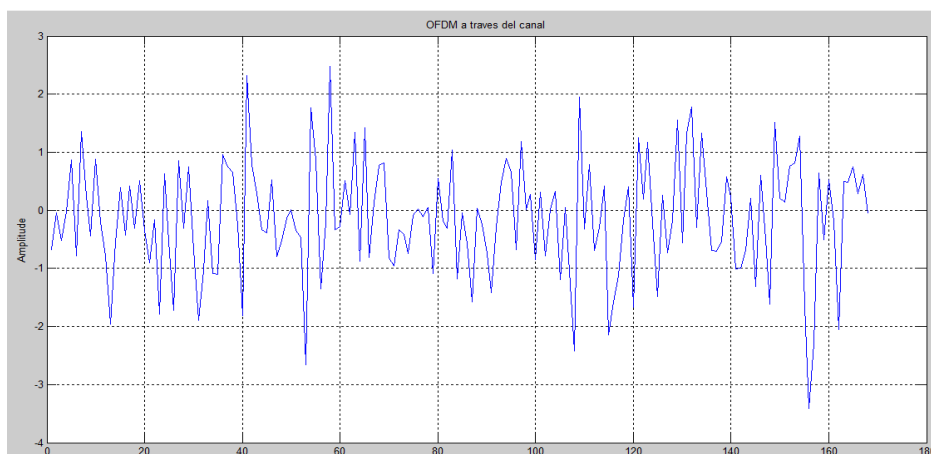


Figura 3. 26 Señal de información transmitida (bits) por 64QAM

Fuente: el autor

La señal que está siendo reestablecida, dividida en un principio en sus cuatro subportadoras se muestra con el nivel de ruido que ha afectado. Los datos recuperados se muestran en la figura siguiente, la tasa de error de bits se obtiene como se muestra.

3.5.2 Bit Error Rate

La técnica para caracterizar los medios de transmisión digital es la Tasa de Error de Bit BER (*Bit Error Rate*), que correlaciona los errores de transmisión en BER. Estos procedimientos de ensayo de BER (El transmisor emite patrones de bits por el conducto o canal hasta el receptor) se emplea para evaluar un desconocido conducto o canal de comunicación. Por consiguiente, indicará cuando un paquete, u otra unidad de datos, tiene que ser retransmitida a causa de un error. Un valor BER muy alto, exterioriza que una menor velocidad de los datos podría minimizar el tiempo de transmisión para una determinada cantidad de datos, y un BER más bajo reduciría la cantidad de paquetes que convengan ser retransmitidos.

A continuación, se muestran las gráficas de simulaciones para cada una de las 3 técnicas OFDM para un canal PLC interior, el eje vertical es el BER y el horizontal el SNR.

BPSK:

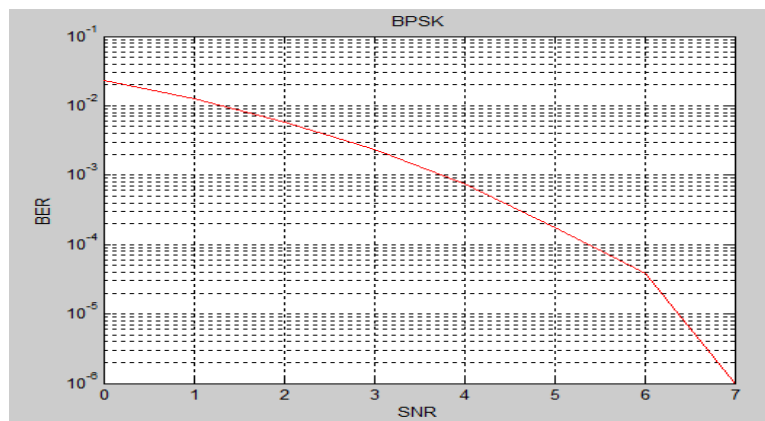


Figura 3. 27 Desempeño BER con BPSK

Fuente: el autor

La relación BER/SNR es ideal cuando se quiere comparar dos o más técnicas de modulación digital que utilizan diversas tasas o velocidades de transmisión (bps) o esquemas de modulación (BPSK, QPSK, QAM) por medio de ese resultado se obtiene su rendimiento de error.

QPSK:

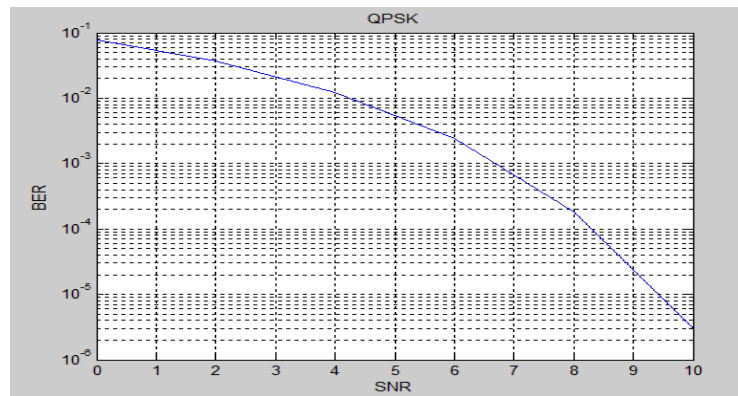


Figura 3. 28 Desempeño BER con QPSK

Fuente: el autor

Según estándares (Ref. IEC: 60870-3 y 60801-4) para la calidad de transmisiones de información o tramas de bit a través técnicas digitales de modulación, será ponderada por su tasa BER. Siendo de muy buena calidad $BER= 10^{-9}$ a 10^{-10} . De buena calidad $BER= 10^{-6}$. Sistemas degradados $BER= 10^{-3}$ a 10^{-6}

16QAM:

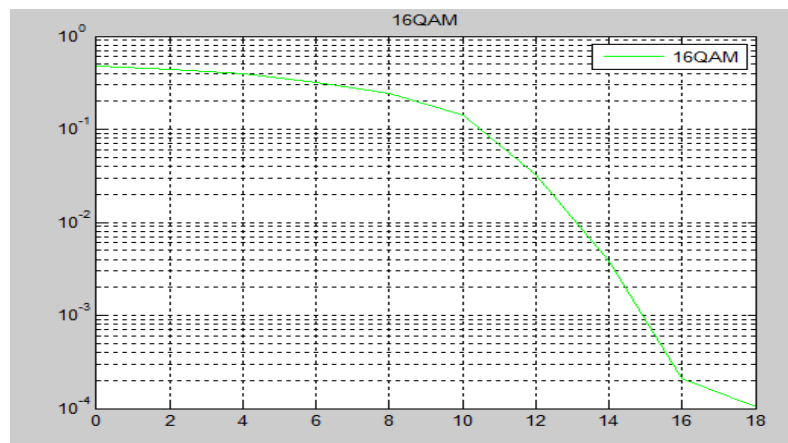


Figura 3. 29 Desempeño BER con 16QAM

Fuente: el autor

El valor que muestra la gráfica para 16 QAM indica que se eleva la tasa de ruido.

Comparación Bit Error Rate

Con las simulaciones obtenidas se evalúa el desempeño BER/SNR.

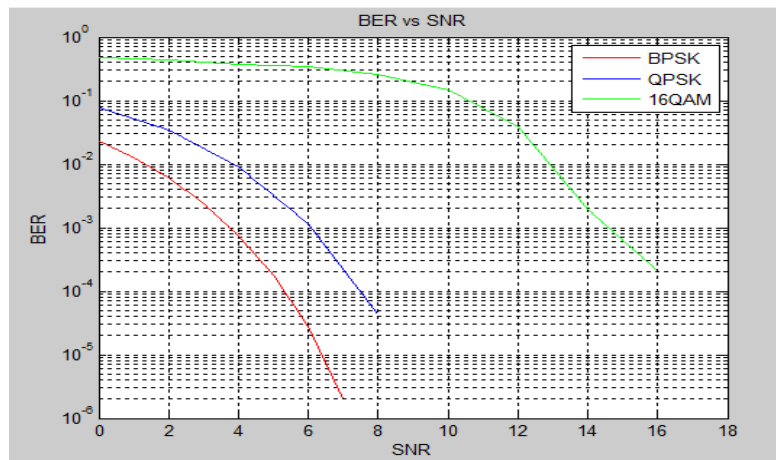


Figura 3. 30 Desempeño BER con 64QAM

Fuente: el autor

Según la tasa de BER vs SNR, la técnica QPSK es la de mejor desempeño, considerando ancho de banda 15 MHz hasta 30 MHz.

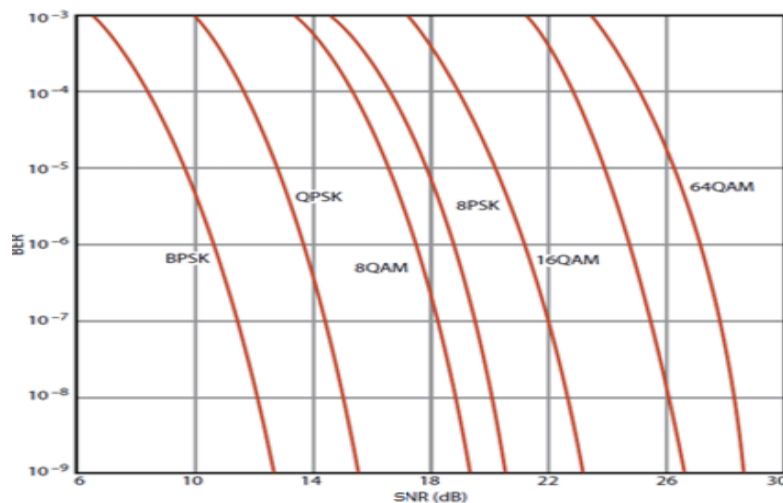


Figura 3. 31 Resultados de desempeño de diversas técnicas OFDM y su BER/SNR

Fuente: el autor

La grafica que compara la relación BER vs SNR muestra claramente que existe un mejor comportamiento en modulaciones digitales en frecuencia-fase ante las modulaciones digitales en amplitud sobre el canal PLC interior. No es eficiente la técnica basada en amplitud pues la relación SNR tiene alta tasa, es decir se presentará atenuaciones debido a ruido. Se señala que las codificaciones diversas en QAM producen SNR alta.

CONCLUSIONES

1. Del desarrollo del estado del arte de PLC para su aplicación en redes inteligentes empleando las plataformas de Tecnologías de la Información para transportar no solo la electricidad sino también información de datos, video y voz, se determinó que PLC banda ancha permite el uso de medidores eléctricos ‘inteligentes’ y la casa ‘inteligente’ (domótica). La SG es altamente integradora con tecnologías de detección y medición y puede gestionar la infraestructura de las redes eléctricas desde su etapa de distribución eléctrica, efectuando mediciones en tiempo real, así como el control en tiempo real y en forma remota, la compra del servicio eléctrico y transmitir datos entre el proveedor y los usuarios finales a velocidades mayores a 2 Mbps en frecuencias de 1 Mhz.

2. El estudio de los modelos de modulación para PLC permite comprender la naturaleza del comportamiento de la transmisión de información a través de cables eléctricos. El modelado del canal PLC para interiores se considera como multitrayecto por las reflexiones de la señal a causa de desacoples de impedancias en los empalmes de las líneas de transmisión de energía. En la transmisión de datos por un canal PLC interior debe considerarse los efectos del ruido blanco gaussiano aditivo que genera interferencia en la comunicación. OFDM resulta ser una modulación eficiente para disminuir los efectos de interferencia inter símbolos y entre portadoras. En OFDM, el ancho de banda útil se divide en M subportadoras o subcanales y cada subcanal se modula a baja velocidad utilizando técnicas de codificación BPSK, QPSK y QAM

3. Al evaluar el desempeño de OFDM para PLC se determina que puede solucionar los problemas de interferencias en un canal interior. Se evaluaron 3 técnicas de codificación basados en OFDM y la técnica de mejor desempeño es la QPSK que se basa en fase y frecuencia, los análisis fueron realizados hasta 30 MHz a través del programa Matlab. En las simulaciones se utilizó un modelo de ruido blanco aditivo gaussiano, distribuido en todo el espectro de frecuencias. En BPSK con el filtro IFFT la muestra de 1024 bits se divide para 4 y da una trama paralela de 256 bits transmitidos. Tiene 2 dB de BER/SNR con mejor desempeño que las diversas técnicas QAM. En cambio, QPSK presenta mejor desempeño en la relación

BER/SNR en comparación con BPSK. Los resultados indican que QPSK soporta las características aditivas del ruido impulsivo. De las simulaciones pueden interpretarse que los 3 dB de QPSK la hacen inmune al ruido por cuanto permite rápida sincronización y re-sincronización para recuperar información.

4. Por lo expuesto en las conclusiones anteriores, se considera que se han cumplido los tres objetivos específicos planteados en este trabajo de investigación y por consiguiente se ha alcanzado el objetivo general, esto es evaluar las características de los parámetros de desempeño de varios tipos de modulación para el uso de la tecnología PLC en redes energéticas inteligentes.

RECOMENDACIONES

La responsabilidad de definir, fomentar y poner en marcha proyectos con red de acceso PLC es de todos los actores; Gobierno, empresas y ciudadanos.

Se deben mejorar algunos aspectos, como los niveles de radiación sobre todo en Alta tensión, ya que son los causantes de la disconformidad entre empresas y radioaficionados en banda EHF.

Es recomendable profundizar marco legal y técnico en aquellas acciones que depuren los conceptos y los retos asociados a con el Internet de las cosas

Planificar para el entorno eléctrico ecuatoriano, un sistema de distribución eléctrica que realice un control automatizado del flujo de energía desde la central generadora hasta los consumidores, proporcionando mayor seguridad, rentabilidad y eficiencia.

Adoptar y aplicar estándares dado por organismos internacionales para el uso de PLC red de acceso.

Se recomienda implementar políticas de seguridad en la comunicación por cuanto el protocolo IP es el que se utilizaría en redes de potencia para transmitir información de video, voz y datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afkhamie, K., Latchman, H., Yonge, L., Davidson, T., & Newman, R. (2005). *Joint optimization of transmit pulse shaping, guard interval length, and receiver side narrow-band interference mitigation in the HomePlug AV OFDM system,*” *IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, pp. 996–1000.
- Ahola, J. (2004). *Applicability of Powerline Communications to Data Transfer of On-line Condition Monitoring of Electrical Drives*. Obtenido de <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31175/TMP.objres.311.pdf>
- Alcántara, R., Sandoval, D., & García, D. (2010). “*Análisis, implementación y evaluación de Algoritmos FFT para el multiplexado OFDM en redes de comunicación inalámbrica WiMax*”, pp. 17, 19,.
- Álvarez, J., García , V., & González, D. (2010). *Transmisión de datos por la red eléctrica*. Obtenido de <http://www.victorgarcia.org/files/PLC-v2.0RC.pdf>
- Amirshahi, P., Navidpour, S., & Kavehrad, M. (2006). Performance Analysis of OFDM Broadband Communications System Over Low Voltage Powerline with Impulsive Noise. *IEEE. 1-4244-0355-3*, 367-372.
- Anastasiadou, D., & Antonakopoulos, T. (2005). Multipath Characterization of Indoor Power-Line Networks . *IEEE Transactions on Power Delivery V.20 (1)*, 90-99.
- Anatory, J., Theethayi, N., & Thottappillil, R. (2009). Power-Line Communication Channel Model for Interconnected NetworksPart I: Two Conductor System. *IEEE Transactions on Power Delivery 24 (1)*, 118–123.
- Babic, M., Hagenau, M., Dostert, K., & Baush, J. (2005). Theoretical postulation of plc channel models, Tech. rep., the OPERA IST Integrated. 178-183.
- Bañon, J., Casado, J., & Rodríguez, M. (2007). *PLC (Power Line Communications)*. Obtenido de <http://www.tsc.uc3m.es/docencia/SyCT/docencia/SyCT/2007/PLC.pdf>
- Barrientos, F., & Lucario, O. (2014). *Análisis del posible uso de superconductores en la tecnología PLC*. Obtenido de Repositorio Digital UNAM:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4097/AN%C3%81LISIS%20DEL%20POSIBLE%20USO%20DE%20SUPERCONDUCTORES%20EN%20LA%20TECNOLOG%C3%8DA%20PLC.pdf?sequence=1>

- Bastidas, H. (2015). *Caracterización de las redes eléctricas para uso en BPL*. Madrid: Acámica Española.
- Bertran, E. (2006). *Procesado digital de señales: fundamentos para comunicaciones y control*. Barcelona: UPC.
- Bilal, O. (2004). *Designs of Broadband Coupling Circuits for PowerLine Communication*,. Proceedings of 7th ISPLC Proceedings,.
- C, M., Lewandowski, C., Wietfeld, C., & Kellerbauer, H. (2012). "Coexistence Analisis of Access and Indoor Powerline Communication Systems for Smart Grid ICT Networks", *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. Obtenido de IEEE Xplore: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6201302/>
- Cajamarca, C., & Sarmiento, R. (2012). *Estudio de factibilidad para implementar una red BPL sobre la red de la empresa eléctrica Azogues*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2308/12/UPS-CT002421.pdf>
- Cañete, J. (2007). *Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como medio de transmisión para banda ancha*. Obtenido de <http://www.biblioteca.uma.es/bbl/doc/tesisuma/16762204.pdf>
- Dostert, K., & Zimmermann, M. (2002). *Multipath Model for the Powerline Channel. Communications, IEEE Transactions*. V. 50, p. 553-559.
- DS2. (2004). *PLC Technology, PLC Standardization Tutorial*". Obtenido de DS2 IEEE 802, Orlando: http://www.ieee802.org/802_tutorials/04-March/plc-technology.pdf
- EDENOR-FIEL. (2012). *RED INTELIGENTE Y EFICIENTE*. Obtenido de http://www.fiel.org/publicaciones/SyC/SEMINARS_1334066989079.pdf
- Edfors, O., Landström, D., Sjöberg, F., & Jaap van de Beek, D. (1996). *An Introduction to Orthogonal Frequency Division Multiplexing*.

- Elek, F. (2010). *Theory and applications of multiconductor transmission line analysis for shielded sevenpiper and related structures*. Obtenido de University of Toronto: https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/26146/3/Elek_Francis_201011_PhD_thesis.pdf
- Eveliux. (2010). *Modelo de un sistema de comunicaciones*. Obtenido de <http://www.eveliux.com/mx/Modelo-de-un-sistema-de-comunicaciones.html>
- Fernandez, J. (2014). *Metodos Numéricos*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/http://es.slideshare.net/ajotasal/7-numerico1>
- Fernández, W., & Carrasco, P. (2014). *Estudio del desempeño de la concatenación de ecualizador de baja complejidad con código NRZ-LDPC irregular para canales inalámbricos móviles*. Obtenido de Revista chilena de ingeniería, vol. 22 N° 3. pp. 316-325: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052014000300003&lng=pt&nrm=iso&tlng=es
- Galli, S. (2011). A Novel Approach to the Statistical Modeling of Wireline Channels. *IEEE Transactions on Communications V. 59 (5)*, 1332-1345.
- George, J., Con, E., & Das, R. (2003). "Demonstration of the Technical Viability of PLC Systems of Medium and Low Voltage Lines in the United States". Obtenido de IEEE Magazine.
- Guimaraes, D. (2010). *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm*. Heidelberg: Springer.
- Hashmat, R., Pagani, P., Zeddani, A., & Chonave, T. (2011). A Channel Model for Multiple Input Multiple Output in-home Power Line Networks,. *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, IEEE*, 35-41.
- Hauser, C., & Bakken, D. (2005). *A failure to communicate: next generation communication requirements, technologies, and architecture for the electric power grid,* *IEEE Power and Energy Magazine*, vol.3, no.2, pp.47-55.

- Hossain, B., Toufikur, M., Asif, O., & Rahman, A. (2014). *Broadband over Power Line (BPL): An Emerging Technology for Bangladesh*. Obtenido de Scientific Research. Vol.7 No.9: http://file.scirp.org/Html/2-9701842_49419.htm
- Hosseinpournajarkolaei, A., & Hosseinian-Far, A. (2012). Channel Characterization for Broadband Power Line Communication System. *6th Sastech Intl Conference*. KL Malaysia.
- Hosseinpournajarkolaei, A., Jahankhani, H., & Hosseinian, F. (2014). *Vulnerability Considerations for Power Line Communication's (PLC) Supervisory Control and Data Acquisition*. Obtenido de International Journal of Electronic Security and Digital Forensics (IJESDF), Vol. 6, No. 2, : <http://www.inderscienceonline.com/doi/full/10.1504/IJESDF.2014.063108>
- ITU. (2014). *Banda Ancha en los países Andinos: Tecnología, regulación y mercado -Análisis de situación y perspectivas 2015*. Obtenido de http://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-EF.BB.ANDEAN-2014-PDF-S.pdf
- Jáuregui, E. (2012). *Recepción y distribución de señales de radiodifusión. ELES0108*. Antequera. Málaga: IC.
- Johnson, R. (1992). *Antenna Engineering Handbook. Third Edition*. New York: McGraw-Hill .
- Koutny, M., Krajsa, O., & Mlynek, P. (2009). *Modelling of PLC communication for supply networks*. In *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Communication*. Obtenido de p-p. 185-189. ISBN: 978-960-474-098- 7.
- Liu, E., Gao, Y., Bilal, O., & Korhonen, T. (2005). *Broadband characterization of indoor powerline channel*. Obtenido de <http://www.isplc2004.unizar.es/BROADBAND%20CHARACTERIZATION%20OF%20INDOOR%20POWERLINE%20CHANNEL.pdf>
- Lorenzo, M. d. (2000). *Influencia del Ruido Gaussiano Correlacionado en la Sincronización de Sistemas Caóticos*. Obtenido de Universidad de Santiago de Compostela:

http://www.usc.es/export/sites/default/en/investigacion/grupos/gfnl/documents/thesis/tesis_Lorenzo.pdf

- Lota, J., Hosney, W., & Hossein, A. (2012). Design of Broadband Power Line Communication system for UK Power line system. *University of East London*. London.
- M. Tlich, Zeddani, A., Moulin, F., & Gautier, F. (2008). Indoor Power-Line Communications Channel Characterization Up to 100 MHz Part I: One-Parameter Deterministic Model. *IEEE Transactions on Power Delivery* V. 23 (3) (2008) , 1392–1401.
- M. Zimmermann, & Dostert, K. (2002). A multipath model for the powerline channel. *IEEE Transactions on Communications* V. 50 N°4, 553-559.
- Martinez, D., Muñoz, e., & López, G. (2008). *Modelado de sistemas de transmisión OFDM y GMSK para comunicación de datos por líneas eléctricas PLC (Powerline Communication)*. Obtenido de <http://www.ece.ubc.ca/~diegop/papers/OfdmGmskOverPLC.pdf>
- Mendez, D. (2002). “*Tecnología Powerline*”, *ISA –Ingeniería de Sistemas y Automática*.
- Mlynek, P., Koutny, M., & Misurec, J. (2010). *OFDM model for power line communication*. Obtenido de LATEST TRENDS on COMMUNICATIONS and INFORMATION TECHNOLOGY: ISBN: 978-960-474-207-3
- Mlynek, P., Misurec, J., & Kountny, M. (2008). *The communication unit for remote data acquisition via the Internet*. Obtenido de In Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Circuits, systems, electronics, control and signal processing (CSES'08):. p-p. 168-173. ISBN: 978-960-474-035-2.
- Mlynek, P., Misurec, J., Koutny, M., & Fujdiak, R. (2015). *Analysis and Experimental Evaluation of Power Line Transmission Parameters for Power Line Communication*. Obtenido de Measurement Science Review, Volume 15, No. 2.

- Moreno, O. (2009). *Modelamiento de patrones recurrentes de ruido en redes de distribución de baja tensión de energía eléctrica*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1762/1/299689.2009.pdf>
- OLADE. (2012). *LAS REDES INTELIGENTES*. Obtenido de <http://www.olade.org/sites/default/files/47Septiembre.pdf>
- Paul, C. (2008). *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. New Jersey, USA: John Wiley and Sons,.
- Pejanovic, M., Kocan, E., & Prasad, R. (2012). *Ofdm Based Relay Systems for Future Wireless Communications*. Aalborg, Dinamarca: River.
- Phil, S. (1998). "A Power Line Communication Tutorial - Challenges and Technologies", *IEEE, International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, pp.1.
- Philipps, H. (2000). "Development of a statistical model for powerline communications channels", *Proceedings of the 4th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*.
- PLC Málaga. (2014). *Grupo de Trabajo en Comunicaciones por la Red Eléctrica. Las posibilidades de la tecnología*. Obtenido de <http://www.plc.uma.es/quesonplc.htm>
- Poveda, N., Medina, C., & Zambrano, M. (2015). *Tecnologías de comunicación para redes de potencia inteligentes de media y alta tensión*. Obtenido de http://www.utp.ac.pa/documentos/2015/pdf/08-ACTUALIDAD_TECNOL._COMUNIC_29-32_0.pdf
- Rohling, H. (2011). *OFDM: Concepts for Future Communication Systems*. Hamburgo, Alemania: Springer.
- Salman, Y., & El-Shafei, M. (2008). "Power Line Communications: An Overview-*IEEE*". <http://paginas.fe.up.pt/~ee03130/dissertacao/wp-content/uploads/2011/02/PLC-overview-I.pdf>.
- Sartenaer, T., & Delogne, P. (2006). Deterministic modeling of the (shielded) outdoor power line channel based on the multiconductor transmission line equations. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications V. 24 (7)*., 1277-1291.

- Szymanczyk, O. (2013). *Historia de las telecomunicaciones mundiales*. Buenos Aires. Argentina: Dunken.
- Toki, H., & Sato, K. (2014). *New circuit theory of multiconductor transmission lines resulting from a new practice of noise reduction*. Obtenido de Proc Acad Japonés Ser Phys B Biol Sci. V. 90 (2): p-p. 29-46.: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3948938/>
- Tonello, A. (2007). Wideband impulse modulation and receiver algorithms for multiuser power line communications. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 365-370.
- Tonello, A., & Vesolatto, F. (2010). Bottom-Up Statistical PLC Channel Modeling Part II: Inferring the Statistics, Delivery. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2356-2363.
- Velásquez, I., Zambrano, M., & Medina, C. (2014). *Redes eléctricas de interiores como canal de comunicación*. Obtenido de Revista Tecnología a fondo: http://www.utp.ac.pa/documentos/2015/pdf/10-TECNOLOGIA_A_FONDO_REDES_ELECT._39-42pdf_0.pdf
- Vidrio, G. (2011). *Estado del Arte en Redes Inteligentes “Smart Grids” Infraestructura de Medición Avanzada en las redes inteligentes*. Obtenido de http://es.slideshare.net/FiiDEM/infraestructura-de-medicin-avanzada-ami-en-las-redes-inteligentes?from_action=save
- ZIV. (2014). *Centros de Transformación Inteligente Activo*. Obtenido de <http://www.gridautomation.ziv.es/ziv/centro-de-transformacion-inteligente-activo.html>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ADR: Automated Demand Response

AMI: Advanced Metering Infrastructure

AMR: Automatic Meter Reading

BEMS: Building Energy Management System

BER: Bit Error Rate

BASK: Binary Amplitude Shift Keying

BPL: Broadband Over Powerline

BFSK: Binary Frequency shift Keying

BPSK: Binary Phase Shift Keying ()

DPSK: Differential Phase Shift Keying

DSP: Digital Signal Processor

ICI: InterCarrier Interference

ISI: InterSymbol Interference

LAN: Local Area Network

Multiplex: mix of several sources

M-Array: Quadrature Amplitude Modulation

OFDM: Orthogonal Frequency Multiplexing

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle

PLC: Power Line Communications

QAM: Quadrature Amplitude Modulation (M=4, 8, 6, 64, 128, 256,etc)

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Montoya Tomalá Moisés Isaías**, con C.C: # **0926916032** autor/a del trabajo de titulación: **Evaluación de los diferentes tipos de modulaciones para sistemas PLC empleados en las redes energéticas inteligentes (Smart Grids)** previo a la obtención del título de **Magíster 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, 16 de Junio de 2017

f. _____

Nombre: **Montoya Tomalá Moisés Isaías**

C.C: **0926916032**



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



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

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Evaluación de los diferentes tipos de modulaciones para sistemas PLC empleados en las redes energéticas inteligentes (Smart Grids).		
AUTOR(ES)	Montoya Tomalá Moisés Isaías		
REVISOR(ES)/TUTOR	MSc. Orlando Philco Asqui; MSc. Luis Córdova Rivadeneira / MSc. Manuel Romero Paz		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	16 de junio de 2017	No. DE PÁGINAS:	83
ÁREAS TEMÁTICAS:	Power Line Communication, Modulaciones, Modelación, Redes Inteligentes, Digital Signal Processor, Supervisory Control and Data Acquisition.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	PLC, BPL, OFDM, SMART GRID, BER, DSP, SCADA		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>Este trabajo expone el estudio de la tecnología Power Line Communication (PLC) considerada como un procedimiento de comunicaciones diseñado para la propagación de voz, video y datos, a través de las líneas eléctricas. PLC presenta características especiales, ya que converge en dos entornos diferentes: las telecomunicaciones y la electricidad. Actualmente la transmisión de información utilizando PLC ha adquirido una importancia vital para su uso en las llamadas redes energéticas inteligentes. Debido a la fuerte presencia de ruido, interferencias y desfavorables características del medio de transmisión, la elección de métodos de modulación de elevados desempeños resulta de primordial importancia en el comportamiento de PLC. Mediante modelación y simulación de las diferentes variantes, la obtención de sus parámetros de desempeño tales como la tasa de error binario (Bit Error Rate, BER), los diagramas de dispersión y otros, permitirá determinar las mejores variantes. El énfasis estará en sistemas con modulación por Multiplexación de División de Frecuencias Ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) con elevados números de subportadoras y modulaciones de alta eficiencia espectral. El alto nivel de atenuación (pérdida de señal o datos) en el acceso a los cables de alimentación de BPL (Broadband Power Line) tuvo dos efectos importantes: El ancho de banda limitado y la oposición de grupos de la comunidad de radioaficionados. BPL utiliza frecuencias del espectro radioeléctrico atribuido a los servicios inalámbricos de comunicación, por lo tanto, la prevención de interferencia a, y desde, estos servicios es un factor muy importante al diseñar sistemas BPL.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-987335677	E-mail: celec_jm@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús		
	Teléfono: +593-994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			