

Estudio de la Factibilidad Técnica de la implementación de PLC (Power Line Communication) en la red de distribución eléctrica de Bogotá



Tesis presentada a la Universidad Nacional de Colombia para optar el título de Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

YEFERSSON CAÑÓN DE ANTONIO

(Universidad Nacional de Colombia)

Dirigido por Andrés Pavas, PhD. Msc. EE

1 de noviembre de 2016

Programa de Adquisición y Análisis de Señales PAAS
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá D.C.

Al dador de la vida por permitirme cumplir uno a uno mis sueños y darme un día mas para soñar.
¡Gracias Dios!

A mi madre por enseñarme que sólo esforzándose se logran las cosas...

A mi esposa por ser mi ayuda idónea, mi motor y la fuerza, por su paciencia durante este proceso, por soportar mi estrés, por entenderme y por estar siempre a mi lado ...

A mi director y amigo Andrés, por que desde el principio creyo en este proyecto y con sus sabios consejos le dio forma a este trabajo ...

A todos y cada uno de los que hicieron parte de este nuevo logro...

Gracias por ayudarme a cumplir este gran sueño.

Agradecimientos

Agradezco al Programa de investigación PAAS-UN (Adquisición y Análisis de Señales) por todo el apoyo en la realización de esta tesis, en especial a mi director, el ingeniero Andrés Pavas por todo su valioso apoyo, por sus conocimientos, por sus palabras llenas de sabiduría y por su amistad.

A los estudiantes Daniel Agudelo Martínez, Gad Alejandro Rincon y la ingeniera Martha Patricia Camargo por su colaboración en cada parte de este proyecto.

Al Grupo de investigación Electrónica de Alta Frecuencia y Telecomunicaciones CMUN de la Universidad Nacional, en especial al estudiante Miguel Limas y el ingeniero David Becerra.

A Codensa, en especial al ingeniero Hector Andrés Díaz D. por su colaboración e información pertinente.

A todos mil gracias por compartir la felicidad de cumplir un sueño mas!

Resumen

El presente documento es el informe de investigación sobre el Estudio de la Factibilidad Técnica de la implementación de PLC (Power Line Communication) en la Red de distribución de Bogotá, tema propuesto para obtener el título de Magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia. El desarrollo de la tesis ha sido dirigida por el Ingeniero Andrés Pavas, quien es profesor e investigador del Programa de Investigación sobre Adquisición y Análisis de Señales PAAS-UN.

Este documento presenta el enfoque global de la utilización de la tecnología PLC en baja tensión, como alternativa para el monitoreo, lectura remota, suspensión y reconexión, seguimiento de clientes, etc, y de esta manera mejorar la gestión del proceso comercial y la gestión técnica de reducción de pérdidas. PLC resulta una opción atractiva, pues utiliza las redes eléctricas de baja tensión existentes y de este modo no se requiere la instalación de infraestructura adicional, evitando una inversión para las empresas prestadoras del servicio eléctrico.

Se enfatiza en las limitaciones, ventajas y comparación de esta tecnología, sus beneficios y las implicaciones que conlleva la implementación de esta nueva alternativa en el sector eléctrico. Se trata el tema de la regulación y estandarización de esta tecnología para unificar conceptos que permitan el desarrollo de nuevas alternativas de solución a los problemas que se presentan en cada parte del canal por donde se transmite la señal hasta llegar al usuario final.

Palabras claves: Power Line Communication (PLC), Broadband over PowerLine (BPLC), Advanced Metering Infrastructure (AMI), Automatic Meter Reading (AMR), Smart Grid, Micro Grid, Power Quality monitoring.

Abstract

The present document is a research report on the Study of Technical Feasibility of implementing PLC (Power Line Communication) in distribution network, theme proposed to be carried out as thesis for the degree of Master in Electrical Engineering at the National University of Colombia, the development of the thesis has been supervised by Andrés Pavas, who is professor and researcher whit the research Program on Acquisition and Analysis of Electromagnetic Signals PAAS-UN.

This document presents the overall approach to the use of low voltage PLC technology as an alternative for monitoring, remote reading, suspension and reconnection, customer tracking, etc., and thus improve management of the business process and technology management loss reduction. PLC is an attractive option, as it uses existing electrical low voltage networks and thus no installation of additional infrastructure required, avoiding investment for companies providing electric service.

It emphasizes the limitations, advantages and comparison of this technology, its benefits and implications of the implementation of this new alternative in the electricity sector. The issue of regulation and standardization of this technology is to unify concepts that enable the development of new alternative solutions to the problems that arise in every part of channel through which the signal is transmitted to the end user.

Keywords: Power Line Communication (PLC), Broadband over PowerLine (BPLC), Advanced Metering Infraestructure (AMI), Automatic Meter Reading (AMR), Smart Grid, Micro Grid, Power Quality monitoring.

Contenido

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Contenido	XI
Lista de símbolos	XIX
1. Introducción	1
1.1. Identificación del Problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos de la Tesis	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Alcances y limitaciones	3
1.5. Método Propuesto	4
1.6. Resultados esperados	4
1.7. Estructura del documento	5
2. Power Line Communications (PLC)	7
2.1. Introducción	7
2.2. Antecedentes	8
2.3. Implementación	10
2.3.1. Implementación Mundial	11

2.3.2.	Implementación en Colombia	13
2.4.	Clasificación de la Tecnología	16
2.4.1.	Banda Ultra Angosta / PLC Baja frecuencia (NB-PLC)	16
2.4.2.	PLC Banda Ancha (BB-PLC)	19
2.5.	Esquemas de modulación	22
2.5.1.	Modulación por división de frecuencia OFDM (Ortogonal Frequency Division Multiplexing)	23
2.6.	La tecnología PLC y las Redes Inteligentes	26
2.6.1.	Las Redes Inteligentes	26
2.6.2.	El papel de la tecnología PLC en las Redes Inteligentes	26
2.7.	¿Cual es el mejor tipo de tecnología PLC para aplicaciones en una Red Inteligente?	28
2.8.	Viabilidad de implementación de PLC según características Técnicas	29
2.8.1.	Ventajas Técnicas	29
2.8.2.	Limitaciones Técnicas	30
2.8.3.	Análisis de la tecnología mediante matriz DOFA	31
2.9.	Viabilidad de implementación de PLC en BT según marco regulatorio	31
2.9.1.	Estandarización de PLC en Banda Ultra Angosta y Banda Angosta	32
2.9.2.	Estandarización en PLC Banda Ancha	34
2.10.	Viabilidad de implementación de PLC según normatividad Colombiana	35
2.10.1.	Análisis sobre políticas publicas sobre el uso de medidores inteligentes	36
2.10.2.	Beneficios Tributarios	37
2.11.	Conclusiones	38
3.	Caracterización de la red eléctrica	41
3.1.	Topología de la red	41
3.1.1.	Topología de la red de baja tensión	41
3.2.	Estructura de las redes de acceso PLC	42
3.2.1.	Conexión de acceso domestico PLC	44
3.2.2.	PLC en vehículos	44
3.3.	Elementos de una red PLC	44
3.3.1.	Redes Eléctricas	44

3.3.2.	Transformadores	45
3.3.3.	Modem de Cabecera (Gateway)	45
3.3.4.	Repetidor	46
3.4.	Acoplamiento de la señal	46
3.5.	Dificultades de la transmisión por las líneas de potencia	48
3.5.1.	Ruido	49
3.5.2.	Atenuación	52
3.6.	Conclusiones	53
4.	Análisis de pruebas en la red eléctrica	55
4.1.	Introducción	55
4.2.	Medición	57
4.2.1.	Arquitectura del sistema	57
4.2.2.	Características Técnicas de los equipos	59
4.2.3.	Caracterización de Comunicación en redes de Baja Tensión	60
4.2.4.	Características de las mediciones	63
4.2.5.	Estudios de Caso	65
4.2.6.	Medición y resultados	67
4.2.7.	Influencia de armónicos en la comunicación	80
4.2.8.	Compatibilidad electromagnética	81
4.3.	Modelado	84
4.3.1.	Caracterización de las líneas subterráneas de baja tensión	85
4.3.2.	Caracterización para instalaciones internas	86
4.3.3.	Modelo del canal de comunicación	87
4.3.4.	Simulación	90
4.4.	Análisis	93
4.4.1.	Características de atenuación de la señal debido a la longitud	94
4.4.2.	Características de atenuación de la señal debido al número de ramas	95
4.4.3.	Atenuación vs SNR medido y calculado	97
4.4.4.	Resultados de simulación	98
4.5.	Conclusiones	99

5. Conclusiones	101
5.1. Conclusiones	101
5.2. Recomendaciones	103
5.3. Contribuciones	104
Bibliografía	115
A. Control y Automatización en las Redes Inteligentes	117
A.1. Sistemas Flexible de Transmisión AC (FACTS)	117
A.2. Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)	118
A.3. Unidad de Medición Fasorial o sincrofasor (PMU)	118
A.4. Sistemas de Control de Área Extensa (WAMS)	118
A.5. Sistemas de Transmisión de Alta Tensión en Corriente Continua (HDVC)	120
B. Fabricantes de equipos	123
B.0.1. Corinex Communications Corp	123
B.0.2. ABB	125
B.0.3. DS2	125
B.0.4. Amperion Connect	125
B.0.5. Siemens Corporation y BPL Global	126
B.0.6. Netgear	126
C. Medición de SNR en el circuito piloto de Codensa	127
D. Reporte de Conformidad según EN50160	131
E. Medidor electrónico polifásico residencial y comercial Landis+Gyr E34A	153
F. Concentrador APSystem M3C-CB10	159
G. Contribuciones	161

Lista de Tablas

2-1. Bandas CENELEC PLC Banda angosta	9
2-2. Tecnologías de medición inteligente en comercializadoras en Cali	13
2-3. Comparación de PLC Banda Angosta y PLC Banda Ancha	16
2-4. Estándares de frecuencia de PLC en diferentes regiones	17
2-5. Diferencias entre PLC y BPL	20
2-6. Denominación de la tecnología	20
2-7. Costos de implementación de PLC frente a RF Peña (2012)	26
2-8. Valores Típicos de perdidas en dB/km	29
2-9. Especificaciones de PLC Banda angosta	33
4-1. Valores de ruido medidos - Circuito Codensa	71
4-2. Valores de ruido medidos - Circuito Codensa	71
4-3. Resultados de mediciones en medidores con problemas de comunicación - Circuito piloto Codensa	72
4-4. Espectrograma señales - Centro de entrenamiento Bossanova	73
4-5. Caracterización de bandas de frecuencia - Bossanova	74
4-6. Mediciones en concentrador y medidor - Centro de entrenamiento Bossanova	75
4-7. Análisis medición circuito piloto	76
4-8. Caracterización de bandas de frecuencia - Bossanova	77
4-9. P_e y R_c de cargas eléctricas	78
4-10. Comparación de distorsión de la señal en diferentes cargas	79
4-11. Emisión de Supra-Armónicos de diferentes cargas Agudelo y Pavas (2015)	79
4-12. Límites de radiación para PLC	83
4-13. Datos simulación - Inyección en F_1 -concentrador	92

4-14. Atenuación - Inyección en F_1 -concentrador	92
4-15. Rangos de evaluación de longitud	95
4-16. Rangos de evaluación utilizados	97
4-17. SNR calculado, medido y simulado	98
C-1. Valores de ruido medidos en campo	127
C-2. Rangos de evaluación utilizados	128

Lista de Figuras

2-1. Arquitectura del sistema REMPLI Treyt y otros (2003)	10
2-2. Diagrama de bloques del proceso de modulación de una señal	22
2-3. Representación frecuencial de la señal OFDM Maneerung y otros (2011)	24
2-4. Comparación de modulación FM y OFDM	25
2-5. Concepto general de una red inteligente	27
2-6. Análisis mediante Matriz FODA	32
2-7. Mapa de regulación de frecuencia IEEE-1901.2 (2013)	34
3-1. Acopladores Inductivo y capacitivo PLC Arteche (2014)	43
3-2. Topología de una red PLC de baja tensión Corinex (2014)	43
3-3. Red PLC con repetidores	46
3-4. Circuito de protección de transitorios y equivalente. CENELEC EN-50065-1 (1991)	47
3-5. Parámetros característicos de una señal en el dominio del tiempo Zimmermann y Dostert (2002)	50
3-6. Tipos de Ruido observado en Sistemas PLC	50
3-7. Representación de un modelo en un canal PLC	51
4-1. Topología red eléctrica	56
4-2. Componentes e interface del sistema AMI Meters y More (2014)	58
4-3. Sección de Comunicación en una línea en BT	61
4-4. Esquema general de medida	63
4-5. Filtro Butterwort pasa banda	64
4-6. Mapa de ubicación circuito implementación piloto Yahoo (2014)	66
4-7. LA 302 Red abierta existente - circuito secundarios sencillo Codensa (2014)	66

4-8. Medición de impedancia mediante Eurotest Metrel	68
4-9. Impedancia vs frecuencia en la banda CENELEC - Circuito Urbano	68
4-10. Impedancia vs frecuencia en la banda CENELEC - Circuito Rural	69
4-11. Efectos de algunos electrodomésticos en la impedancia	69
4-12. Medición inicial - Bossanova	73
4-13. FFT - Voltaje en el medidor y el concentrador con señal emitida	74
4-14. Medición inicial - Circuito piloto Codensa	76
4-15. Medición de ruido en el concentrador	77
4-16. Clasificación de las perturbaciones de EMC según el espectro ocupado	81
4-17. Implementación de medidas de protección adicionales Pagani y otros (2010)	82
4-18. Conductor trifásico con neutro concéntrico externo utilizado en instalaciones subterráneas	85
4-19. Matriz de transmisión de una red de 2 puertos	88
4-20. Circuito con una derivación y circuito equivalente Korke y otros (2011)	89
4-21. Esquema general circuito Codensa - (ATP-EMTP)	90
4-22. Casos de estudio - simulación (ATP-EMTP)	91
4-23. Atenuación vs Frecuencia - Simulación Inyección F1	93
4-24. Circuito piloto Codensa	94
4-25. Longitud vs SNR - Datos medidos circuito piloto	95
4-26. Señal de propagación en multitrayectoria	96
4-27. Pérdidas vs SNR - Datos medidos y calculados en circuito piloto	98
A-1. Localización de PMU en el Prototipo WAMS León y Gomez (2012)	119

Lista de símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI
C	Capacitancia Eléctrica	F
L	Inductancia Eléctrica	H
G	Conductancia	S
\vec{E}	Intensidad de Campo Eléctrico	$\frac{V}{m}$
f	Frecuencia	Hz
Z_L	Impedancia característica	Ω
l	Longitud	m
M	Inductancia Mutua	H
R	Resistencia Eléctrica	Ω
S	Superficie	m^2
t	Tiempo	s
a	Profundidad de penetración	mm

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α	Constante de atenuación	$\frac{Np}{m}$
β	Constante de fase	s
σ	Conductividad	$\frac{S}{m}$
ϵ	Constante dieléctrica	$\frac{F}{m}$

Notaciones, abreviaturas y acrónimos

Abreviatura	Término
<i>CIGRE</i>	International Council on Large Electric Systems
<i>CENELEC</i>	European Committee for Electrotechnical Standardization
<i>EN</i>	European Norm
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission
<i>OPEN – meter</i>	Open Public Extended Network metering
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>DC</i>	Corriente Directa
<i>AC</i>	Corriente Alterna
<i>PRIME</i>	Powerline Intelligent Metering Evolution
<i>B – PSK</i>	Binary Phase-Shift Keying
<i>AMI</i>	Advanced Metering Infrastructure
<i>AMR</i>	Automatic Meter Reading
<i>PLC</i>	Power Line Communication
<i>SCADA</i>	Supervisory Control And Data Acquisition
<i>GIS</i>	Geographic Information System
<i>GPRS</i>	General Packet Radio Service
<i>FACTS</i>	Flexible Alternating Current Transmission System)
<i>PMU</i>	Phasor Measurement Unit
<i>RTU</i>	Remote Terminal Unit
<i>HMI</i>	Human (Y) Machine Interface
<i>SSB</i>	Single Side Band
<i>PLC</i>	Power-line Communication
<i>PLT</i>	Power Line Telecommunications
<i>DPL</i>	Digital Power Line
<i>BPLC</i>	Broadband Powerline communication
<i>TWACS</i>	Two-Way Automatic Communications System
<i>TS</i>	Turtle System
<i>SMTP</i>	Simple Mail Transfer Protocol
<i>PSD</i>	Power Spectral Density
<i>HCS</i>	Host Central Station
<i>DCU</i>	Data Concentrator Units
<i>MIU</i>	Meter Interfacing Units
<i>SVC</i>	Static Var Compensator

Abreviatura	Término
<i>TCSC</i>	Thyristor Controlled Series Compensator
<i>PST</i>	Phase Shifting Transformer
<i>STATCOM</i>	STATic synchronous COMpensator
<i>UPFC</i>	Unified Power Flow Controller
<i>SSSC</i>	Static Synchronous Series Compensator
<i>LDR</i>	Low Data Rate
<i>HDR</i>	High Data Rate

Introducción

Resumen

Este capítulo presenta una breve descripción sobre la tesis y la importancia de la implementación de la tecnología PLC y el aporte investigativo. Se presentan los objetivos, los resultados esperados y la metodología propuesta para el desarrollo del mismo. El capítulo finaliza con la descripción de la estructura general del documento.

1.1. Identificación del Problema

Debido a las pérdidas existentes de energía, las empresas prestadoras del servicio han decidido darle mayor importancia a este tema dentro de la gestión de negocio de distribución y comercialización. Una vez realizada la medición de consumo de cada usuario, se procede a la normalización de la medida para luego ingresar la información en el sistema de información comercial y a su vez vincularla al proceso de lectura y facturación de manera oportuna. Después de la contabilización de los consumos, se determinan las pérdidas. El proceso se termina cuando la empresa realiza el cobro oportuno y el acompañamiento con los procesos operativos comerciales ya sean de suspensión, reconexión, corte ó reinstalación del servicio. Debido a los inconvenientes que se presentan durante todo el proceso, las empresas han venido tomando alternativas que mejorar la gestión del proceso comercial y la gestión técnica de reducción de pérdidas. Mediante la utilización de la tecnología PLC se pretende tener la medición de consumos permanentemente facilitando la toma de decisiones y el direccionamiento oportuno de las actividades a realizar. Este sistema asegura el monitoreo permanente de la condición de cada usuario, alertando sobre variaciones en el sistema de medida, desviaciones del patrón de consumo, además de detectar fallas en el suministro, etc.

La tecnología de más amplia utilización implementada para estos fines corresponde a la tecnología Power Line Communication - PLC, que adicionalmente posibilita el crecimiento de la cobertura del sistema de manera gradual en el largo plazo, permitiendo atender todo el espectro de clientes (urbanos, rurales, comerciales, industriales, residenciales) sin requerir de inversiones exorbitantes en el corto plazo. Adicionalmente, por las características del sistema de comunicación es factible que los desarrolladores de medidores y ensambladores nacionales integren sus equipos a esta tecnología de comunicación.

Debido a que las redes dispuestas en la transmisión de energía eléctrica son compartidas para un número finito de usuarios determinado por la capacidad de los transformadores instalados en el sistema, resulta un reto el análisis de la forma como se envían y reciben datos desde diferentes

lugares y por diferentes medidores de energía. Puesto que las señales no pueden pasar fácilmente a través de los transformadores (su alta inductancia los hace actuar como filtros pasabajos), se convierten en la frontera de estudio en este trabajo.

Otro factor importante dentro del análisis, es la transmisión de datos ya que son muy sensibles a las pérdidas y distorsión de la señal dependientes de variaciones de la carga, compensación de potencia reactiva entre otros, en cada parte del sistema eléctrico. La presencia de dispositivos para compensación de potencia reactiva como los bancos de condensadores ocasionan una disminución en la intensidad de la señal, así como también diversas cargas eléctricas que generan interferencias.

Mediante el desarrollo de esta tesis se pretendió verificar si las redes eléctricas de baja tensión de Bogotá pueden ser utilizadas para transmitir datos y de esta manera contar con un nuevo acceso al servicio de medición inteligente. Mediante la medición inteligente se puede pensar en la inclusión de estas nuevas formas de monitoreo a las redes inteligentes del futuro (Smart Grid).

1.2. Justificación

Power Line Communication (PLC), es una tecnología que permite la conexión a internet, envío de datos y otros servicios a través de la red eléctrica ya instalada. La transmisión de datos utilizando PLC, consiste en utilizar las redes eléctricas como el canal para la transmisión de información y diversos servicios que pueden ser ofrecidos específicamente en las líneas de baja tensión y con interés económico de las empresas de energía eléctrica como: lectura remota de consumo, suspensión, reconexión, optimización en el suministro y gestión de la demanda, minimización de las pérdidas, localización de fallas, mejoramiento en la gestión de activos etc., ofreciendo al cliente una mayor seguridad del suministro y la posibilidad de una gestión activa de la demanda y otros servicios adicionales como Televisión e Internet entre otros.

Mediante la integración de PLC al Sistema Eléctrico Nacional, se puede ofrecer servicio de internet a través de las redes existentes tanto en áreas cercanas como alejadas, ya que involucra una de las infraestructuras más extendidas en el territorio nacional y de esta forma poder cumplir con los objetivos propuestos en programas de masificación de este servicio. Muchos países han implementado planes de masificación de Internet en los últimos años, entre los más exitosos están países como Corea del Sur, Japón, Hong Kong y los países nórdicos, donde los niveles de penetración son mucho mayores que el promedio mundial. Vive Digital Colombia es uno de los programas en Colombia que busca promover el uso y apropiación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en diferentes sectores de la vida económica y social de Colombia y PLC puede ser una solución de última milla para poder ofrecer servicio de Internet a la población, sencillamente un Proveedor de Servicios de Internet (ISP) proporciona los datos a un terminal de onda portadora, el cual se ubica en una subestación eléctrica y se conecta a la red eléctrica y por ésta viajan juntas la señal eléctrica a 60 Hz y la señal de datos a una alta frecuencia, evitando que se afecten entre sí [Mintic \(2015\)](#).

El lugar de integración del sistema eléctrico y de comunicación se da en el transformador o en la subestación de distribución. Aquí se produce el acoplamiento de la red eléctrica con equipos

complementarios que en un extremo se enlazan a una conexión de alta velocidad instalada en la subestación donde llegara la información obtenida de cada usuario de la red eléctrica y de esta forma ésta se convertiría en una central de control donde se analizarán los datos obtenidos. Es por esto que cada usuario tendrá instalado un dispositivo que posibilita el envío y la recepción de datos a través de su instalación eléctrica y la Compañía Eléctrica tendrá un dispositivo de recepción de datos, ubicada en una subestación (o transformador local).

La importancia del aporte investigativo en esta tesis, radica en los estudios que se realizan sobre las características técnicas y del modelo de la red de baja tensión para ser utilizado como canal de transmisión de datos, además de la definición de la viabilidad del diseño y el acercamiento del modelo a la regulación y normatividad colombiana vigente y en revisión por parte de los respectivos comités de normalización con el fin de adaptarlas con miras a la implementación de las redes inteligentes en Colombia. Los componentes y las características del sistema determinan qué tipo de información puede ser transmitida o recibida, cuántos canales, en qué frecuencias, con qué rapidez y fidelidad, a qué costo y con qué cobertura, además de su grado de inmunidad frente a ruido e interferencias y a otros parámetros de operación.

1.3. Objetivos de la Tesis

1.3.1. Objetivo General

Estudiar y evaluar la factibilidad técnica de la implementación de la tecnología PLC sobre la Red Eléctrica de Baja Tensión de Bogotá.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterización y modelado de las líneas Baja Tensión típicas de Bogotá
- Revisión de las tecnologías disponibles para la utilización de PLC, en particular las empleadas actualmente en Colombia
- Análisis de los inconvenientes que se pueden presentar en la implementación de esta tecnología, como el ruido y atenuación de la señal
- Análisis de compatibilidad electromagnética entre la transmisión de señales usando PLC y la red eléctrica

1.4. Alcances y limitaciones

Se evaluara la factibilidad técnica de la implementación de la tecnología PLC en las redes eléctricas de Baja Tensión dispuestas en Conduit PVC, Conduit metálico y redes aéreas y subterráneas, las cuales deben cumplir con la norma NTC 2050 y el Reglamento Técnico para

Instalaciones Eléctricas RETIE, que proporciona un marco regulatorio para las configuraciones típicas de las redes.

Se explorarán herramientas de modelado de redes, para la simulación de las configuraciones típicas de la red de Baja Tensión establecidas mediante regulación técnica, con el fin de determinar anchos de banda y capacidad de transmisión de datos a través de la infraestructura del Sistema Local Eléctrico ya instalado. Los componentes y las características del sistema determinan qué tipo de información puede ser transmitida o recibida, cuántos canales, en qué frecuencias, con qué rapidez y fidelidad, a qué costo y con qué cobertura, etc.

Posteriormente, se realizara un análisis de compatibilidad electromagnética.

1.5. Método Propuesto

En primer lugar se realizó una revisión y análisis detallado del estado de arte. Esta revisión permitió conocer en detalle los diferentes avances en la utilización de la tecnología PLC para la medición inteligente. También se realizó una revisión bibliográfica en los diferentes temas que se trataron en esta tesis: modelos, ensayos, estudios, etc.

Posteriormente, se realizó una caracterización de las líneas de Baja tensión para identificar anchos de banda y capacidad de transmisión de datos para determinar la factibilidad técnica de la implementación de la tecnología PLC. Para el estudio del canal, se tuvo en cuenta los diferentes componentes de las líneas de transmisión de energía eléctrica, como lo son la topología de la red, caracterización de las líneas (resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia) para determinar la influencia en la capacidad de transmisión de información a través de la red.

Para la caracterización y determinación de la influencia en la capacidad para transmitir información de la red se analizó: la resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia.

Se realizo el modelado y simulación de las redes de Baja Tensión de las configuraciones típicas establecidas en la NTC 2050 y el RETIE. Por ultimo se realizo un análisis de compatibilidad electromagnética basados en [CISPR-22 \(2006\)](#) que define los principios de medición, información de los equipos y los valores limite que permiten el funcionamiento adecuado de los sistemas PLC.

1.6. Resultados esperados

Con el modelado y simulación de la red de baja tensión, se presentan los siguientes resultados:

- Caracterización y modelado de las líneas Baja Tensión típicas de Bogotá con el fin de obtener sus anchos de banda y atenuación
- Las características técnicas y el modelo de las características eléctricas de la red de baja tensión establecido en la NTC 2050 (Norma Técnica Colombiana) y la Norma Técnica para Instalaciones Eléctricas RETIE en Colombia

1.7. Estructura del documento

En el capítulo 1, se hace una breve descripción sobre el tema tratado en la tesis y la importancia de la implementación de la tecnología PLC y el aporte investigativo. Se presentan los objetivos, los resultados esperados y la metodología propuesta.

En el capítulo 2, se hace una revisión del estado de arte de la evolución de las tecnologías de comunicación, se presenta una definición de Smart Grid y el concepto de medición inteligente junto con los beneficios para las empresas del sector eléctrico y los usuarios, los tipos de comunicación y los costos de implementación, las ventajas de la tecnología PLC, las limitaciones técnicas, análisis de las fortalezas mediante la matriz DOFA y un análisis de viabilidad de la implementación según el marco regulatorio mundial y colombiano.

En el capítulo 3, se presenta la caracterización de la red eléctrica, la topología, la caracterización del medio y las dificultades de la transmisión utilizando PLC.

En el capítulo 4, se presenta el estudio de caso y las mediciones obtenidas en el circuito piloto de Codensa en Bogotá, además de las simulaciones y resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones, contribuciones y recomendaciones. Los anexos complementan el desarrollo del documento.

Power Line Communications (PLC)

Resumen

En la automatización de las redes eléctricas del futuro esta la comunicación entre los dispositivos. Una de las tecnologías que se plantean para la comunicación como soporte para diversos propósitos y funcionalidades, entre ellas las redes inteligentes, es PLC (Power Line Communications). PLC es un sistema de comunicaciones que se basa en la transmisión a través de la red eléctrica instalada. La tecnología PLC es un conjunto de elementos y sistemas de transmisión, que utiliza los sistemas de transporte y distribución instalados por el Sistema Eléctrico Nacional y de esta forma ofrece a los clientes otro tipo de servicio, como internet, telefonía, televisión, lecturas de información remotas, telecontrol. En este capítulo se presenta una descripción detallada de la tecnología PLC, antecedentes, implementación a nivel mundial y en Colombia, así como los esquemas de modulación.

2.1. Introducción

El principio de esta técnica de comunicación es que la señal es modulada con una señal portadora de alta frecuencia desde un transmisor; a continuación, esta señal de alta frecuencia está acoplada a la línea de transmisión eléctrica y enviada a través de ella a un receptor.

Mediante la tecnología PLC, se puede tener acceso a servicios de telecomunicación, convirtiendo los enchufes convencionales en puntos de conexión. Gracias a la integración del sistema eléctrico nacional y PLC, se puede dar servicio de internet a través de las redes existentes a lugares apartados de nuestro país, además poder realizar la medición de magnitudes físicas, consumo de energía u otros parámetros eléctricos, y el posterior envío de la información al operador de red.

Una ventaja adicional para la compañía eléctrica que comercialice los servicios basados en PLC es el hecho de ahorrarse la instalación de la última milla, lo que evita todos los inconvenientes asociados a la realización de tendidos adicionales: obras, aperturas de zanjas en zonas urbanas, etc.

El nivel de tensión utilizado para la transmisión de datos es baja tensión, la cual está definida en la parte de baja del transformador de energía eléctrica hasta la acometida de cada usuario. Para la integración de estos dos sistemas se tendrá que analizar el sistema eléctrico nacional que será el canal por donde se enviarán las señales. Se tendrá que diferenciar los distintos tramos que conforman el sistema, para dicho análisis se tendrá en cuenta la red de Media Tensión que da acceso al servicio eléctrico a pueblos, barrios y donde puede ser implementado la tecnología PLC

y Baja Tensión, que será de análisis para la implementación de esta tecnología.

El lugar de integración del sistema eléctrico y de comunicación se da en el transformador o en la subestación de distribución. Aquí se produce el acoplamiento de la red eléctrica con equipos complementarios que en un extremo se enlazan a una conexión de alta velocidad instalada en la subestación, desde donde llegara la información de las mediciones obtenidas en el extremo de cada usuario de la red eléctrica y de esta forma la S/E se convertiría en una central de control donde se analizarán los datos obtenidos.

2.2. Antecedentes

PLC surge en el seno de las empresas eléctricas como una nueva alternativa que, basándose en la infraestructura existente asociada a la distribución eléctrica, pueden complementar las redes existentes de banda ancha suplidas mediante líneas ADSL o con enlaces contratados a operadores de cable y llegar a mucho más usuarios. Desde hace varios años atrás las empresas eléctricas en varios países han usado la tecnología PLC para el envío y recepción de datos para uso interno de la empresa, pero actualmente, luego de varias investigaciones y pruebas piloto, este sistema orientado a brindar un acceso a Internet a alta velocidad se comercializa en varias ciudades de España como Madrid, Barcelona, Zaragoza y en otros países en el mundo [Chong y otros \(2006\)](#).

Los primeros enlaces PLC a través de líneas de alta tensión se instalaron en la década de 1920 con el objetivo de proporcionar servicios telefónicos operacionales y se basaron en modulación SSB¹ (Single-Side Band modulation) [Schwartz \(2009\)](#).

Los esfuerzos iniciales se centraron en transmitir datos a través de las líneas de sistema eléctrico a baja velocidad. En 1922, los primeros sistemas comenzaron a operar sobre las líneas de Alta tensión en el rango de frecuencias de 15 a 500 kHz, para aplicaciones de telemetría, que aun funcionan según lo documentado por [Broadridge \(1984\)](#) y [Dostert \(1997\)](#). En 1930, PLC fue introducido en los sistemas eléctricos de media y baja tensión. Después, esta tecnología se utilizó para control y telemetría de los equipos instalados en el sistema, medición remota, control dinámico de tarifas, medición de perfiles de carga, etc.

En 1975, las compañías United Utilities de Canada y Northem Telecom de Reino Unido, presentaron un PLC. Los primeros proyectos sobre la tecnología PLC fueron desarrollados entre los años 1976 y 1978, en Glenrothes Escocia, por los ingenieros de la empresa Pico Electronics Ltda. y la empresa de sistemas de audio BSR. El propósito de estas empresas era controlar un dispositivo electrónico de forma remota. Como resultado de estos proyectos, estudios y experimentación nació el protocolo X-10 ².

En la segunda mitad de los años 90, se logró experimentar un notable impulso la investigación en sistemas de transmisión de banda ancha sobre redes eléctricas ya instaladas, debido a la desaparición de los monopolios europeos de operadoras de telecomunicación. También surgió el

¹En radio comunicaciones, es un refinamiento de la modulación de amplitud que utiliza la potencia del transmisor y el ancho de banda de manera más eficiente

²Es un protocolo de comunicaciones para el control remoto de dispositivos eléctricos, que utiliza la línea eléctrica existente, para transmitir señales de control entre equipos de automatización del hogar (domótica) en formato digital

interés por desarrollar sistemas de transmisión en interiores que sirvan como base para redes de datos de área local [Cañete \(2005\)](#).

En 1991, CENELEC emitió la Norma Europea [EN-50065-1 \(1991\)](#), donde se restringen las bandas de frecuencia para la tecnología PLC en MT/BT como se muestra en la tabla [2-1](#). La banda A CENELEC se asigna a las comunicaciones en las empresas eléctricas para automatización y la lectura remota de contadores, mientras que las bandas restantes se destinan en las comunicaciones de los clientes.

Tabla [2-1](#): Bandas CENELEC PLC Banda angosta

Banda	Rango de frecuencia (KHz)	Amplitud Max. de transmisión (V)	Dedicación
A	9-95	10	Empresas Eléctricas
B	95-125	1.2	Hogar
C	125-140	1.2	Hogar

En 1997 la compañía Nortel junto con una empresa inglesa crea Digital Power Line, antecesor de la tecnología PLC, con los resultados obtenidos durante este periodo surge gran expectativa para el futuro de las telecomunicaciones y el desarrollo de esta tecnología en Alemania. El primer sistema PLC digital fue introducida por ABB en 1999 y permitía velocidades de datos de hasta 64 kb / s en una banda de 8 kHz.

Entre los años 2000 y 2002 se desarrolla la tecnología PLC con algunas implementaciones en países como E.E.U.U, Japón, Alemania y España entre otros, sin embargo los resultados finales no son favorables debido a problemas de compatibilidad con los sistemas de comunicación vigentes. La empresa RWE y Ascom hacen una prueba piloto con 200 puntos conectados a la red de baja tensión.

Entre los años 2003 y 2006, el proyecto REMPLI (Real-time Energy Management via Powerlines and Internet), fue financiado por la Comisión Europea con el objetivo de establecer una infraestructura que combinara la tecnología PLC en la banda CENELEC y basada en redes IP para hacer medición y control de equipos remotamente [Treyt y otros \(2003\)](#).

Las aplicaciones que utilizan el sistema REMPLI son principalmente los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), sistemas de medición, sistemas de gestión de energía y sistemas de facturación. Estas aplicaciones utilizan protocolos estandarizados para la interfaz con los equipos sobre el terreno. Las normas [IEC-60870 \(1990\)](#)³ y [IEC-62056-21 \(2002\)](#), también conocido como IEC 1107 y [EN-1434-3 \(2002\)](#), comúnmente conocido como M-Bus son los principales representantes de este tipo de protocolos. La arquitectura del sistema REMPLI se presenta en la Figura [2-1](#).

En 2009, un grupo de vendedores formó el Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME). Originalmente concebida por la empresa eléctrica Iberdrola para definir un estándar PLC en

³IEC 101, es una norma internacional preparada por TC57 para la monitorización de los sistemas de energía, sistemas de control y sus comunicaciones asociadas

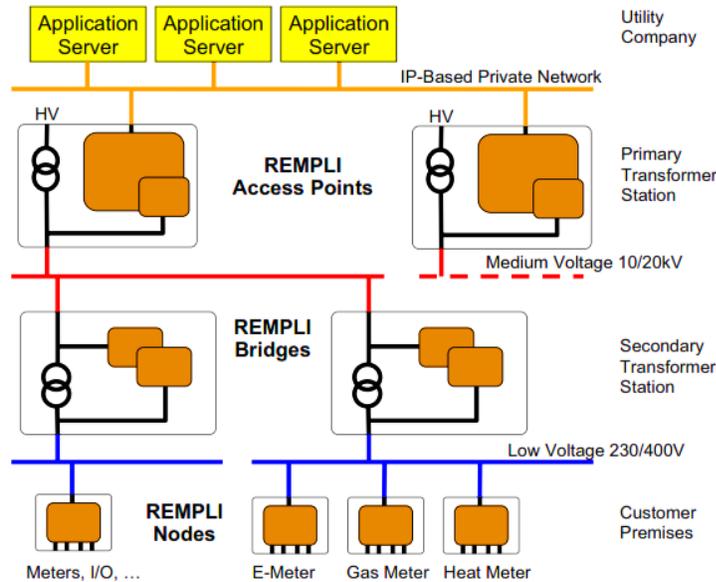


Figura 2-1: Arquitectura del sistema REMPLI [Treyt y otros \(2003\)](#)

torno a sus necesidades específicas, el PRIME Alliance es una iniciativa de múltiples proveedores desarrollar un nuevo solución abierta, pública, interoperable y sin derechos de propiedad.

Con la publicación del Estándar [IEEE-1901 \(2010\)](#) (Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications) en diciembre del 2010, aparece nuevo enfoque para esta tecnología que al combinarla con otras tecnologías de acceso podría llegar a lugares remotos o áreas rurales que carecen de líneas telefónicas u otros medios de comunicación a bajos costos.

En 2011, varias compañías, incluyendo los operadores de redes de distribución (FEDER , Enexis), vendedores de medidores (Sagemcom, Landis Gyr) y los proveedores de chips (Maxim Integrated, Texas Instruments, STMicroelectronics) fundaron la Alianza G3-PLC, para promover la tecnología G3-PLC. G3-PLC puede operar en las siguientes bandas CENELEC A (35 kHz a 91 kHz) o banda B (98 kHz a 122 kHz) en Europa, en la banda ARIB (155 kHz a 403 kHz) en Japón y en FCC (155 kHz a 487 kHz) para los EE.UU. y el resto del mundo. G3- PLC ha sido diseñado para la comunicación robusta basada en conexiones fiables y altamente seguras entre dispositivos.

En diciembre de 2011, la tecnología G3 PLC fue reconocido como un estándar internacional en la UIT (International Telecommunication Union) en Ginebra [G3-PLC \(2014\)](#).

2.3. Implementación

La tecnología de más amplia utilización y con mejores prestaciones, corresponde a la tecnología PLC, que adicionalmente posibilita el crecimiento de la cobertura del sistema de manera gradual

en el largo plazo, permitiendo atender a todo el espectro de clientes (urbanos, rurales, comerciales, industriales, residenciales) sin requerir de inversiones exorbitantes en el corto plazo.

2.3.1. Implementación Mundial

2.3.1.1. Caso de estudio de Canadá

Uno de los proyectos exitosos en el mundo en la implementación de esta tecnología, es la red completa en la provincia de Alberta (Canadá). ATCO lee medidores de agua, gas y electricidad utilizando la tecnología PLC de TWACS.

2.3.1.2. Caso de estudio de España

En España, Ds2 (Design of Systems on Silicon) fue una de las empresas que desarrollaba esta tecnología hasta el año 2010 cuando quebró después de tratar de expandirse a otras tecnologías de redes domésticas. El rendimiento de sus soluciones era mucho más alto que el resto de las empresas del mercado a nivel global. Así, Ds2 participada por Endesa Net Factory, logro una velocidad de transmisión de datos teórica de 45 Mb/s y 17 Mb/s la velocidad alcanzada en campo.

Existen en España algunas empresas que prestan el servicio de internet mediante la tecnología PLC y se lo venden a los hoteles, pequeñas y medianas empresas, como es el caso de EkoPLC. EkoPLC ofrece las más modernas y convenientes soluciones PLC. El Sistema iWire de EKOPLC aplica tecnología probada y patentada de comunicaciones por red eléctrica (PLC) que transforma el cableado eléctrico interno de un edificio en una plataforma inteligente de red de banda ancha. En 2006 la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT) autorizo a EkoPLC para operar como proveedor de acceso a Internet a través de la red eléctrica gracias a la tecnología PLC.

La empresa española del grupo Endesa está llevando un programa para desarrollar una red de telecomunicaciones con la misma cobertura que la red de distribución y que permite que la información se utilice en tiempo real y que ayude a optimizar el suministro y gestión de la demanda, minimizar las pérdidas, mejorar la gestión de activos y racionalizar el funcionamiento de la red. En noviembre de 2003, después de 15 meses de pruebas gratuitas, Endesa comenzó a cobrar y confió a Auna la comercialización del servicio. Los resultados no fueron los esperados. En dos años, los 2.000 clientes de Zaragoza que probaron el PLC quedaron reducidos a 600. Además, el operador de cable Ono formalizó el día 4 de noviembre la compra de Auna Telecomunicaciones por 2.251 millones de euros. En las mismas fechas, Endesa envió un preaviso para comunicar su intención de cerrar el acceso a Internet por la red eléctrica en Zaragoza. En Endesa dicen que no han dejado de utilizar PLC y que aprovechan la red eléctrica para usos internos de la compañía, para el telecontrol de la red, como herramienta de detección precoz de defectos en cables subterráneos y para la telegestión de la lectura de contadores.

En Madrid y Valencia la empresa Iberdrola que cuenta con 3000 clientes, dispone de infraestructura para prestar el servicio a 80.000 hogares. Además de algunos distritos de Madrid, la compañía ofrece PLC en Móstoles, Getafe y Leganés. Iberdrola comenzó a comercializar PLC

en octubre de 2003. La empresa Iberdrola es el coordinador de la segunda fase de un proyecto europeo para extender el PLC denominado OPERA. OPERA es el acrónimo de Open PLC European Research Alliance, un proyecto de más de 20 M cofinanciado por el 6^o Programa Marco de la Comisión Europea. Dentro de las investigaciones realizadas en el grupo de investigación de la Universidad de Málaga, se plantea una nueva aplicación de la tecnología PLC en automóviles.

2.3.1.3. Estudio de caso de Alemania

Alemania es un mercado importante para el PLC ya que fue uno de los primeros países en implementar la tecnología. Se le considera como pionera en el desarrollo de esta tecnología, alcanzando en el 2001 los 20.000 abonados. Con varias pruebas en curso, las regulaciones han sido estrictas en cuanto a los niveles aceptados de emisiones no intencionales provenientes del PLC que permitan promover el uso de PLC como servicio de valor agregado. La competencia es promovida porque Deutsche Telecom es un monopolio excepcionalmente fuerte en telecomunicaciones.

En Alemania hay aproximadamente 110,000 hogares con PLC y la RWE (compañía eléctrica alemana) inició el despliegue comercial en julio de 2001 en Essen. RWE cursó un pedido a ASCOM de 150.000 unidades para dos años y ha llegado a dar servicio a 20.000 clientes a finales del 2001. Sin embargo, debido a fuertes presiones por parte de Deutsche Telecom y la imposición de niveles de radiación muy estrictos, el 30 de septiembre de 2002 el operador se vio obligado a dejar de dar servicio al hacerse inviable su plan de negocio y cesó sus servicios de PLC alegando problemas regulatorios de utilización del espectro no resueltos [Echeverri y Madera \(2008\)](#).

2.3.1.4. Estudio de caso en Norteamérica

En Norteamérica la banda ancha está mucho más disponible que en Europa y la penetración doméstica es superior en aproximadamente 15%. Además, en las áreas donde la banda ancha está disponible, usualmente existen varios proveedores entre los que se puede escoger. Algunos de las características de la tecnología PLC en Norteamérica frente a Europa son:

- El precio promedio para usuarios finales de banda ancha es más bajo que en Europa, y menor que el precio de las ofertas actuales del PLC
- La topología de la red eléctrica es más desafiante para el PLC que en Europa, pues el número de usuarios por transformador de media a baja tensión es bajo comparado con el de Europa.
- Se aprovecharía especialmente en soluciones de medio voltaje
- Provoca más interferencias RF por las características del cable eléctrico utilizado. La FCC ha establecido reglas sobre interferencias máximas
- El cable y los operadores DSL limitan su gasto de capital nuevo por las condiciones económicas difíciles

En EE.UU la tecnología PLC de acceso no se encuentra muy extendida, debido a la complicada topología de la red eléctrica existente (se elevan los costos), aunque existe una implementación de la tecnología PLC in-home (líneas eléctricas utilizadas para crear LANs domesticas).

2.3.2. Implementación en Colombia

A nivel nacional, empresas como CODENSA, EPM, Electricaribe, EPSA y EMCALI, han venido desde hace algunos años iniciativas en implementación de algún tipo de inteligencia en sus procesos y no en un marco de trabajo sectorial sino aisladas del resto de las empresas del sector. A continuación se describen cada una de esas iniciativas.

2.3.2.1. EMCALI EICE ESP

De las 26 empresas comercializadoras de Cali, registradas por la CREG, 3 de ellas han adoptado tecnologías de medición inteligente. En la tabla 2-2 se muestra las tecnologías de medición inteligente adoptadas por cada una de las comercializadoras

Tabla 2-2: Tecnologías de medición inteligente en comercializadoras en Cali

Empresa Comercializadora	Tecnología
Empresas Municipales de Cali EICE (EMCALI)	Sistemas TWACS
ENERTOTAL S.A. E.S.P	Sistema de Medición Centralizada con Medidores Inteligentes
VATIA S.A. E.S.P	Sistema de Medición Centralizada con Medidores Inteligentes

EMCALI invirtió en la implementación de la tecnología PLC para la medición y control de consumos de energía, mediante la tecnología denominada TWACS (de las siglas en ingles Two-Way Automated Communications System), de la firma ACLARA Power Line Systems Inc., que provee una comunicación única bi-direccional sobre las líneas de energía para recolectar, comunicar, analizar, y manejar información sobre el consumo de electricidad, agua y gas.

En el 2012, estaban instalados 11.603 medidores de los inicialmente adquiridos, con base en los resultados obtenidos (pérdidas en los transformadores intervenidos menores al 6 %, efectividad superior a 99.5 % en la gestión de comunicaciones, efectividad del 99.8 % en las acciones de conexión y desconexión, efectividad de la solución prepago, efectividad de la integración con la plataforma comercial de EMCALI), este proyecto dejó de ser una prueba piloto para ser el estándar para la ciudad de Cali, Yumbo y Puerto Tejada.

La segunda fase, contemplaba la cobertura de comunicaciones en el 100 % del área de influencia de EMCALI (compuesta por 20 subestaciones, 6 intervenidas en la segunda etapa) y la ampliación en 10.000 medidores adicionales para completar un total de 24.000 medidores al cierre de 2012,

con un programa para el reemplazo de otros 80.000 medidores en un plazo de cinco años.

Ahora EMCALI trabaja en la integración de la plataforma AMI con la plataforma SCADA/DMS/GIS para implementar un sistema de red inteligente y la integración de la medición de agua y gas. También se trabaja en la madurez de una Smart Grid de la compañía y se está avanzando en la concepción de nuevos servicios para los clientes de la compañía.

Actualmente, EMCALI tiene instalada la infraestructura en todo el sistema de distribución de EMCALI, con lo que tiene garantizada la cobertura para el 99 % de los 600.000 usuarios del sistema. Se excluyen los usuarios servidos a 34.5 kV, ubicados en la zona industrial de Yumbo.

2.3.2.2. Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P.

Electricaribe, adelanta un proyecto en zonas subnormales como Nelson Mandela, cumpliendo con las disposiciones del Gobierno Nacional, a través del Ministerio de Minas y Energía. Mediante este proyecto se implementó un sistema de medida inteligente que ofrece mejores beneficios para las comunidades. El sistema de medición es centralizado e integra tecnología de medida, de telecomunicaciones y de información con el objetivo de reducir las pérdidas no técnicas. El sistema permite la gestión integral de los Clientes y los demás elementos de la red de energía que puedan ser operados en forma remota. Este cuenta con los siguientes elementos: Contadores Electrónicos con Gestión Remota, Dispositivos de Activación de Desactivación de contadores, Dispositivos de Lectura y Medición de consumo de Energía, Sistemas de Comunicaciones (GPRS, PLC, RF, Otros), Sistema de Gestión de Dispositivos de Red, etc.

La información que se recibe en el centro de control permite facturar, enviar y asesorar a los clientes, además de tener acceso a su consumo y lectura de un display. Adicionalmente, con la instalación del display, el cliente puede conocer su lectura diaria y así calcular y controlar su consumo en cualquier instante.

2.3.2.3. Empresa de Energía de Cundinamarca

Actualmente en Facatativá, la empresa de Energía de Cundinamarca (EEC), realiza una prueba piloto con 50 usuarios, a los que ofrece servicios de internet, televisión y telefonía a través de la red eléctrica instalada. Mediante esta tecnología se tienen velocidades de entre 1 y 10 Mbps. Para el desarrollo de este proyecto se firmó una alianza con la empresa BPLC Latín América, que se encargo de suministrar la tecnología de banda ancha sobre las líneas de energía.

2.3.2.4. SYNAPSIS Colombia

En el 2005 inicio un proyecto denominado Telecontrol Reconectores, que permitió integrar 310 de estos equipos utilizando la tecnología GPRS como medio de comunicación. En el 2007, se realizó la primera etapa del proyecto Telecontrol Subestaciones.

2.3.2.5. Electricadora de Santander (ESSA)

La Electricadora de Santander (ESSA) en alianza con Endesa Network Factory, desarrollan el subproyecto "Internet Eléctrico", con el cual buscan apoyar la política de estado del Gobierno Nacional, tendiente a la masificación de Internet en sectores de la población con bajos ingresos y muy poca penetración.

2.3.2.6. Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P.

En el desarrollo de las Redes Inteligentes, EPSA realizo la implementación de medición avanzada mediante la instalación de 9.000 medidores AMR y 2.000 medidores AMI para disminuir el porcentaje de perdidas no técnicas.

2.3.2.7. Avances de Universidades

Algunas Universidades del país, han mostrado un creciente interés en el tema, como es el caso de la Universidad Nacional de Colombia. Este interés se puede evidenciar en trabajos de investigación y tesis de pre-grado sobre el estudio de la viabilidad técnica y caracterización de las redes de baja tensión para la transmisión de datos y modelamiento del canal para transmitir datos. Algunos otros trabajos que se vienen implementando en el grupo GITUN de la Universidad Nacional de Colombia pretenden analizar la red eléctrica de baja y media tensión de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá como medio de transmisión de servicio portador. Algunas de las investigaciones realizadas y en ejecución por el grupo son: Análisis y diseño del modelo de interconexión de una red de telecomunicaciones que presta el servicio de valor agregado Internet, con una red eléctrica convencional para prestar el servicio de Internet en Colombia, Estudio de factibilidad técnica y regulatoria para la prestación del servicio de televisión a través de la red de suministro de energía eléctrica (PLT), Análisis y estudio de la red eléctrica de media tensión de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá como medio de transmisión de servicio portador e identificación de aportes de la tecnología PLT a la mitigación del cambio climático [Reinosa \(2012\)](#), y Estudio y Análisis de la viabilidad de la Implementación de Tecnología PLT en Colombia, en el ámbito de la transmisión de datos sobre redes de Baja Tensión [Chica \(2012\)](#). Algunos otros trabajos investigativos de maestría realizaron una caracterización de la red de suministro de un edificio para su aprovechamiento como medio de transmisión de información [Patiño \(2006\)](#).

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, desarrollo el proyecto "Diseño e implementación de una red domótica para un laboratorio de ingeniería electrónica", dicha propuesta de investigación formulada por el Grupo de Investigación de Electrónica, pretendía aprovechar el tendido eléctrico para crear una red domótica que ofreciera facilidades de acceso, control de los equipos de laboratorio, ahorro de energía y mejorar la calidad de servicio. Para ello se aplicó la tecnología Power Line Communications (PLC) y se exploraron mejores alternativas de modulación digital, codificación y detección de errores, acoples, protocolos de transmisión de datos y nuevas aplicaciones [Penagos y otros \(2006\)](#).

La Universidad Autónoma de Occidente de Cali, desde hace algunos años vienen realizando estudios sobre factibilidad de implementación de BB-PLC sobre las redes eléctricas de la empresa EMCALI como tecnología de acceso a la red multiservicios, definición de la relación costo beneficio para EMCALI al masificar la banda ancha con BB-PLC.

En la Universidad del Valle en el 2013 se realizo algunos estudios investigativos a través de la tesis del trabajo de grado Estudio preliminar sobre la viabilidad de la implementación de medidores inteligente de energía en los estratos 1,2 y 3 de Cali [Pérez \(2013\)](#).

La Universidad de Antioquia, también ha realizado algunos trabajos investigativos sobre el uso de la tecnología y la viabilidad de implementación, revisión de normatividad a nivel mundial y nacional. Algunos de los trabajos realizados son: Power Line Communication - Software: Apropiación teórica y metodología de implementación, evolución de costos y aplicación [Monsalve y Ceballos \(2006\)](#), Teoría y modulación OFDM y software interactivo de simulación en MatLab [Garces \(2006\)](#), Power Line Communication [Echeverri y Madera \(2013\)](#).

2.4. Clasificación de la Tecnología

PLC es el acronimo de Power Line Communication, también conocida como PLT (Power Line Telecommunications), DPL (Digital Power Line) en sus inicios.

La tecnología Power-line Communication esta clasificada como: Power-line de banda ancha (Broadband Powerline communication), Power-line de banda angosta (Narrowband Powerline Communication) y banda ultra estrecha (Ultra narrow band / low frequency PLC). En la Tabla [2-3](#) se muestra la comparación de dos tipos de PLC.

Tabla **2-3**: Comparación de PLC Banda Angosta y PLC Banda Ancha

	PLC banda angosta	PLC banda ancha
Frecuencia	Hasta 500 KHz	Más de 2 MHz
Velocidad de datos	Hasta 200 Kbs	Más de 1 Mbs
Modulación	FSK, SSBPSK	OFDM

La tabla [2-4](#) muestra los estándares de frecuencia de PLC banda angosta utilizados en diferentes regiones [Haidine y Lehnert \(2004\)](#).

2.4.1. Banda Ultra Angosta / PLC Baja frecuencia (NB-PLC)

Sistemas que operan a frecuencias debajo de 3 kHz y están muy limitados en su velocidad de transmisión. Se utilizan sobre todo para la comunicación a distancia con medidores eléctricos, incluyendo algunos contadores inteligentes. Algunos de estos sistemas son TWACS, TS1 y TS2

Tabla 2-4: Estándares de frecuencia de PLC en diferentes regiones

Región	Regulador	Banda de frecuencia	
Europa	CENELEC	3-95 KHz	A-Proveedores de energía
		95-125 KHz	B-Reservado para los usuarios
		125-140 KHz	C-Reservado para los usuarios, acceso CSMA regulado
		140-148.5 KHz	D-Reservado para los usuarios
Japón	ARIB	10-450KHz	
China	EPRI	3-90 KHz	No regulado
		3-500 KHz	
USA	FCC	10-450KHz	

(Turtle Systems⁴).

2.4.1.1. TWACS

Desde 1978, Distribution Control Systems, Inc. (DCSI) comercializó y fabricó con gran éxito la tecnología TWACS que ofrece capacidades únicas, ideales para AMR (Automatic Meter Reading), control de carga, automatización de la red de distribución y otros servicios. TWACS es un sistema de comunicación de utilidad de red fija que utiliza tecnología patentada para comunicarse a través de líneas de energía eléctrica, que proporciona bajo costo, comunicación confiable bidireccional entre el centro de control y los consumidores de electricidad, agua y gas. TWACS utiliza la red eléctrica para envío y recepción de datos desde la subestación hasta el cliente, posibilitando la implantación de servicios diversos tales como: automatización de la medición, telemedición, tarifación diferenciada (TOU), administración de cargas y composición de curva de carga. Permite varios niveles de paralelización de tecnologías que aumentan eficazmente su capacidad de manejar varias decenas o cientos de miles de puntos finales. Una de las tecnologías que son utilizadas en combinación con TWACS son TDMA, CDMA y GPRS para que cientos de lecturas de los medidores se puedan llevar a cabo dentro de una hora con la configuración adecuada [Mak y Moore \(1984\)](#).

Debido al aumento en el manejo de información de los sistemas y la velocidad de transmisión de datos, CENELEC emitió en 1992 la norma [EN-50065-1 \(1991\)](#). El estándar CENELEC [EN-50065-1 \(1991\)](#) permite la comunicación a través de baja tensión en el rango de frecuencias de 3 kHz a 148,5 kHz. Cuatro bandas de frecuencia se definen en [2-1](#).

⁴ *Turtle Systems*, se basa en la comunicación de baja frecuencia, por ejemplo 5-10 Hz, a través de la línea de energía y tiene un alcance de 100 km y utilizan un ancho de banda reducido. Debido a que funciona a baja frecuencia las señales pueden pasar a través de diferentes niveles de transformación y de esta forma disminuyen el número emisoras

CENELEC exige un mecanismo CSMA/CA en la banda C y estaciones que deseen transmitir deben utilizar la banda de frecuencia de 132,5 kHz para informar que el canal está en uso. Este protocolo obligatorio define un período máximo de retención (1 s), una pausa mínima entre transmisiones consecutivas del mismo remitente (125 ms), y un tiempo mínimo para declarar que el canal está inactivo (85 ms). Las especificaciones CENELEC regulan sólo el uso del espectro y el protocolo CSMA / CA, pero no obligan a ninguna modulación o sistemas de codificación [Galli y otros \(2011\)](#).

TWACS está compuesto por el sistema de información y la plataforma informática, que debe interactuar con los sistemas de información corporativos que comprende el Servidor, el equipo de Comunicación con la red WAN y los equipos de Comunicaciones en Subestación que a su vez tiene los siguientes componentes:

- Unidad de Control de Recepción (Control Receiving Unit (CRU))
- Transformador de Modulación (Modulation Transformes Unit (MTU))
- Unidad de Modulación de Salida (Outbound Modulation Unit (OMU))
- Unidad de Captura de Entrada (Inbound Pickup Unit (IPU))
- Equipos de comunicación remota (RCE), que comprenden todos los dispositivos que pueden comunicarse e interactuar a través del sistema TEACS (medidores residenciales y comerciales)

Algunas de las herramientas disponibles para los servicios públicos mediante el uso de la plataforma TWACS incluyen [ACLARA \(2014\)](#):

- Lectura precisa que va directamente a la facturación
- Capacidad para ofrecer servicios pre-pagados
- Conexión y desconexión remota de clientes
- Localización de fallas
- Monitoreo en tiempo real
- TOU (Time of Use)
- Lecturas en tiempo real y almacenamiento redundante de datos del medidor
- Notificación de eventos y la lectura del medidor en tiempo real
- Control de alumbrado publico Control

Como se describió anteriormente, la empresa de servicios EMCALI emplea la tecnología TWACS para infraestructura de medición avanzada de la compañía Aclara, desde el año 2009. El contrato inicial contemplo instalar esta tecnología en cinco subestaciones y 14.500 clientes, y tiene una disposición para duplicar el tamaño. La solución de Aclara proporciono a EMCALI una interfaz de servicio web personalizado que facilita el intercambio y la sincronización de la facturación prepago y datos de pago con una estación de facturación maestro. El sistema TWACS se ocupa de las soluciones de prepago y pérdidas no técnicas, además del conjunto completo de prestaciones que incluye lectura de medidor, gestión en caso de falta de electricidad, equilibrio de líneas, demanda global, calidad de tensión y otras soluciones para el ahorro de costos.

2.4.1.2. Turtle System

El TS (Turtle System), se utilizo en sus inicios en sistemas AMR con el nombre TS1 y permitían conectividad en un solo sentido; una versión bidireccional del Sistema TS llegó a estar disponible después de 2002 con el nombre de TS2. Este tipo de tecnologías es ampliamente utilizado especialmente en los EE.UU. para los sistemas AMI, automatización de los sistemas de distribución y otras aplicaciones.

El sistema TS2 proporciona una infraestructura que permite la entrega de las lecturas del medidor a un sitio de control específico, normalmente se encuentra en la oficina de servicios públicos. Cada transmisor TS2 tiene su propia frecuencia que permite a todos los puntos finales transmitir o recibir de forma continua y sin amenaza de una posible colisión.

El concentrador final instalado en cada lugar de medición almacena el uso de energía y los datos de interrupción y transmite los paquetes de datos con fecha y hora diaria para ser descargados por el Servidor Central. El punto final es también capaz de recibir órdenes desde el servidor central a través del controlador TS2. Cualquier configuración futura se puede realizar de forma remota a través de la línea de energía u otro tipo de tecnología (GPRS, RF) y con esto conseguir la eliminación de los viajes a campo [Cazacu y Balauta \(2012\)](#).

2.4.2. PLC Banda Ancha (BB-PLC)

Es un método de comunicación por línea de potencia que permite la transmisión digital de datos a alta velocidad a través de los cables de distribución de energía eléctrica instalados. BB-PLC tiene algunas diferencias frente a PLC que son descritas en la tabla [2-5](#). BB-PLC utiliza frecuencias que son parte del espectro radioeléctrico, por tanto, la prevención de interferencias en, y desde, estos servicios es un factor muy importante en el diseño de sistemas.

BB-PLC es una tecnología relativamente nueva que está ganando popularidad en los últimos años debido a que ofrece a los clientes otra alternativa de servicios de banda ancha de alta velocidad. Para el sector eléctrico, otras aplicaciones incluyen monitoreo remoto de subestaciones eléctricas, lectura automática de medidores (AMR), monitoreo del sistema de potencia, etc. Sin embargo, el factor más importante para el lanzamiento masivo de los sistemas BB-PLC es la interferencia electromagnética. El mayor aspecto técnico no resuelto hasta el momento es la

falta de un conjunto completo de estándares internacionales, regionales y locales que regulen los aspectos relacionados con emisiones electromagnéticas.

Tabla 2-5: Diferencias entre PLC y BPL

Características	PLC	BPL
Rango De frecuencia	8 kHz a 520 kHz	1.6 Mhz a 35 Mhz
Velocidad de Transmisión	9.6 Kbps	Superior a 145 Mbps
Aplicaciones	Lectura de contadores Control de cargas Localización de averías	Acceso a Internet Telefonía IP Creación de entornos LAN
Ejemplo	Sistema X10	HomePlug BPL
Observaciones	Las interferencias son reducidas, porque a la frecuencia que opera la longitud de onda es muy elevada con relación a la longitud del cable	Para transmitir los datos utiliza técnicas de espectro expandido (SS) y/o múltiples portadoras de datos (DMT)

Esta tecnología ha sido motivo de múltiples estudios y de acuerdo con la organización encargada de su análisis recibe diferentes nombres como se describe en la tabla 2-6. Los sistemas de comunicación forma parte de los medios de transmisión más prometedores en la actualidad.

Tabla 2-6: Denominación de la tecnología

Nombre	Significado	Organización
PLC	Power Line Communications	European Telecommunications Standar Institute ETSI
PLT	Power Line Transmission	
DPL	Digital Power Line	Federal Communications Commission FCC
BPL	Broadband over Power Line	

2.4.2.1. Caracterización

La red eléctrica, analizada desde el lado de las telecomunicaciones no es un canal continuo, sino que por el contrario esta seccionada por tramos de acuerdo a los diferentes niveles de tensión y en todo el transcurso presenta obstáculos en la transmisión de las señales de comunicación como lo son los transformadores. El tramo de la red eléctrica que mayor interconectividad ofrece es la de bajo tensión, esta es la razón por la cual casi todos los sistemas PLC estén enfocados en este nivel de tensión.

2.4.2.1.1. Funcionamiento. La arquitectura general de una red BPL, consiste en la superposición de una señal de alta frecuencia (1,6 a 30MHz) con bajos niveles de energía sobre la señal de la red eléctrica de 60 Hz. La señal se transmite a través de la infraestructura de la red eléctrica y se puede recibir y decodificar de forma remota. Así, la señal BB-PLC es recibida por cualquier receptor que se encuentra sobre la misma red eléctrica. Un acoplador integrado en la entrada del receptor elimina las componentes de baja frecuencia antes de que la señal sea tratada. Un modem de red eléctrica (PLM) convierte un dato binario en una secuencia de señales con características predefinidas (frecuencias, niveles) y viceversa, haciendo el proceso de MODulación/DEMODulación.

En la primera generación de la tecnología PLC se utilizaba modulaciones DSSSM (Direct Sequence Spread Spectrum Modulation) y GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), pero en esta última generación de BPL, la modulación más eficiente es OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) por su gran tolerancia al ruido y por la utilización de codificación adaptativa entre otros [Silva y Nuñez \(2008\)](#).

2.4.2.1.2. Frecuencia. Los sistemas BPL utilizan para su funcionamiento el espectro de onda corta ó HF (High Frequency), el cual está definido en la banda entre 3 y 30 MHz.

2.4.2.1.3. Velocidad de transmisión. La velocidad de transmisión en los sistemas BB-PLC dependen de la tecnología e infraestructura empleada. Con BB-PLC se logran velocidades entre 24 y 200 Mbps en Media Tensión y 205 Mbps en Baja Tensión.

En la primera generación de BB-PLC, se lograron velocidades de 1 a 4 Mbps, suficiente para cumplir con los requerimientos de transmisión de información de control de las empresas eléctricas. Con el paso de los años las necesidades aumentaron y la cantidad de señales que requerían enviarse también lo hicieron, por eso con una segunda generación se alcanzaron velocidades de 45 Mbps, de los cuales 27 Mbps en el sentido de red-usuario (Downstream) y 18 Mbps en el sentido usuario-red (Upstream).

El estándar [IEEE-Std-1901 \(2010\)](#), se desarrolló con el objetivo de tener un estándar para comunicación de alta velocidad en sistemas BPL. Este estándar se enfoca en el uso eficiente del canal de comunicaciones, especificando los mecanismos para la interoperabilidad entre dispositivos BB-PLC, mecanismos de calidad de servicio, de ancho de banda y mecanismos de seguridad. El estándar solo cubre las capas física y de enlace de datos (MAC) definidas en el modelo de referencia OSI. Según lo indicado en el estándar [IEEE-Std-1901 \(2010\)](#), podrá emplearse para la transmisión de información a tasas de transmisión de hasta 500 Mbps a distancias de hasta 1500 m.

La tercera generación nace de la iniciativa de varios proveedores para diseñar circuitos integrados que alcancen velocidades de 130 Mbps y algunos 200 Mbps.

2.4.2.1.4. Implementación. Los proyectos AMI de Corinex usan los medidores Landis + Gyr E350 Focus AD, incorporado un módulo de comunicación de BPL de Corinex: Corinex Smart Communication Module. Los datos del usuario son colectados y enviados a lo largo de los cables eléctricos a velocidades de banda ancha al concentrador SG200 Gateway, el cual está instalado al

costado del transformador. Los datos colectados por el SG200 se retornaran a la oficina central (NOC⁵). La comunicación de red de retorno se lleva a cabo a través de GPRS. El SG200 se conecta a un Cisco Integrated Services Router Generation 2 819 HG que proporcionan la comunicación GPRS.

Toda la información colectada por los medidores son recibidos en el NOC por el software Smart Grid Connect de Corinex. Corinex Smart Grid Connect (SGC) ofrece a los operadores, no sólo la capacidad de gestionar y controlar su red, sino también automatiza una serie de tareas complejas, tediosas y propensas a errores [Corinex \(2014\)](#).

2.5. Esquemas de modulación

La modulación en PLC cumple las mismas características y parámetros que otros medios de transmisión y esta definido por la siguiente expresión:

$$F(t) = A \text{Sen}(\omega t + \theta) \quad (2-1)$$

Donde: A es la Amplitud, ω la Frecuencia y θ es la Fase. Al igual que la mayoría de canales de comunicación, el canal PLC introduce atenuación y cambio de fase a las señales enviadas, debido a que este es un medio diseñado para distribución de energía eléctrica, además de afrontar eventos tales como operaciones de arranque y parada de equipos, operación de interruptores de diferentes tipos, cargas lineales y no lineales conectadas por periodos, etc, que hacen prácticamente imposible transmitir señales de información, por eso se establecen técnicas de modulación que permitan minimizar estos efectos. El diagrama de bloques del proceso de modulación se puede observar en Figura 2-2.

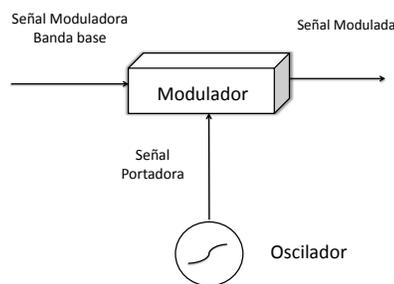


Figura 2-2: Diagrama de bloques del proceso de modulación de una señal

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 [Mendez \(2002\)](#).

⁵Network Operations Center, el Centro de Control de la Red (CCR) o Centro de Operaciones de Red, es uno o más sitios desde los cuales se efectúa el control de las redes de computación

El tipo de modulación depende de la señal a transmitir, la cual puede ser: Digital (voz y video digitalizados) ó Analógica (voz y video).

Las técnicas de modulación convencionales como ASK⁶, PSK⁷ y FSK⁸ normalmente son excluidos en PLC. Una posible solución para superar los problemas en un canal de comunicaciones de este tipo, es usar un método de modulación que pueda ocuparse de la atenuación desconocida, así como de los cambios de fase y simplificar el receptor. Uno de los métodos de modulación que cumplen con los requisitos es OFDM por su importancia y utilización en PLC.

2.5.1. Modulación por división de frecuencia OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Es un método de codificación de datos digitales en múltiples frecuencias portadoras con origen en aplicaciones de uso militar. OFDM se ha convertido en un esquema de modulación popular para la comunicación digital de banda ancha, ya sean inalámbricas o alámbricas, además en aplicaciones tales como la televisión digital, acceso a Internet DSL, redes inalámbricas, redes de líneas de alta tensión y las comunicaciones móviles 4G. [Maneerung y otros \(2011\)](#). La modulación PLC empezó con la modulación GMSK y DSSS que ofertaba velocidades de entre 1 y 4 Mbps pero ya en la segunda generación se empezó a introducir la modulación OFDM.

El concepto fundamental de OFDM, es que las subportadoras son ortogonales en frecuencia, lo cual se define por la siguiente ecuación:

$$\int_{T_0}^{T_0+t} f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot dt = 0 \quad (2-2)$$

Donde $f_1(t)$ y $f_2(t)$, son las frecuencias de las subportadoras. En modulación FDM convencional, la separación entre las subportadoras adyacentes es de $2/T$ y en OFDM esta separación es de $1/T$, mínimo para que dichas subportadoras sean ortogonales, tal como se muestra en la figura [2-3](#). Los datos son divididos en varios flujos o canales en paralelo, uno para cada subportadora y cada subportadora se modula con una técnica convencional como QAM o PSK a velocidades bajas.

Las señales QPSK/QAM producen un espectro en la frecuencia, cuyo ancho de banda se puede expresar como $BW = 2(1+\alpha)R_s$. En OFDM, las portadoras adyacentes pueden solaparse. Así, la suma de N portadoras, permite ahora transmitir N cadenas de transmisión sobre un ancho de banda de $BW = (N+1)R_s$. Esto supone una eficiencia espectral de $N/N+1$ por símbolo para el caso de N portadoras, creciendo con el valor de N , hasta conseguir una eficiencia espectral que es prácticamente el doble de la de las señales QPSK/QAM para valores grandes de N .

⁶Modulación Digital de amplitud, consiste en cambiar la senoide entre dos valores posibles, utilizados para comunicaciones ópticas

⁷Modulación digital de fase, no es usado directamente, es la base para entender otros sistemas de modulación de fase multinivel. Consiste en variar la fase de la senoide de acuerdo a los datos

⁸Modulación digital de frecuencia, consiste en variar la frecuencia de la portadora de acuerdo a los datos. Si la fase de la señal FSK es continua, es decir entre un bit y el siguiente la fase de la senoide no presenta discontinuidades.

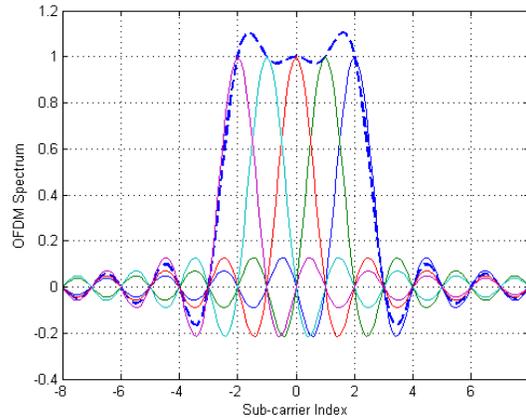


Figura 2-3: Representación frecuencial de la señal OFDM Maneerung y otros (2011)

Algunas de las ventajas de OFDM sobre otros esquemas son Crespo y Castaño (2008):

- Capacidad para hacer frente a algunas condiciones del canal como atenuación de las altas frecuencias
- La ecualización de canal se simplifica porque OFDM puede ser visto como el uso de muchas señales de banda estrecha moduladas lentamente en vez de una señal modulada de banda ancha rápidamente
- Eliminar la interferencia entre símbolos (ISI) y utilizar ecos y tiempo de dispersión (en la TV analógica éstos son visibles como imágenes fantasma y la borrosidad, respectivamente), insertando un intervalo de guarda entre los símbolos OFDM. Este intervalo de guarda se elige con duración mayor que el máximo retardo de todos los recibidos del mismo símbolo, de forma que las componentes debidas al retardo de un símbolo no interfieran en el siguiente
- Facilita el diseño de redes de frecuencia única (SFN), donde varios transmisores adyacentes envían la misma señal de forma simultánea a la misma frecuencia, ya que las señales de múltiples transmisores distantes se pueden combinar de forma constructiva, en lugar de interferir como lo haría normalmente
- Tiene menos interferencia entre símbolos que los sistemas monoportadora

2.5.1.1. Costos de la tecnología

Según análisis de mercado realizado por *EMCALI* con empresas proveedoras de las diferentes tecnologías, se estableció los costos:

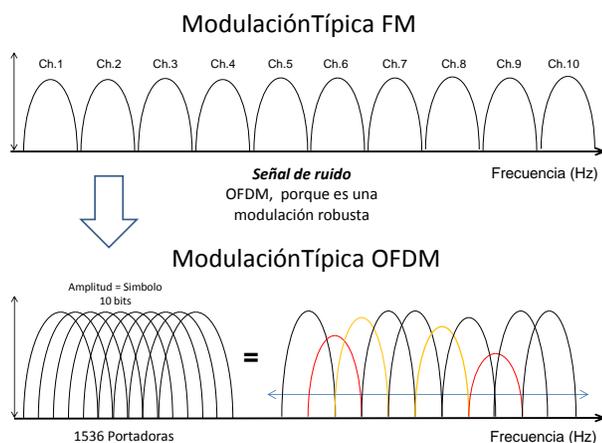


Figura 2-4: Comparación de modulación FM y OFDM

- **Costos de infraestructura de comunicación.** En los sistemas RF, la comunicación con los concentradores es siempre a través de la tecnología GPRS, que involucra la incorporación de una empresa adicional que preste el enlace de comunicaciones y que pueden derivar en costos adicionales no contemplados. En los sistemas que utilizan la red como medio de comunicación, esto es subsanado por ser el operador el propietario del medio de comunicación
- **Costo de la infraestructura básica;** se parte de un costo base para una cantidad de 20.000 medidores (en promedio) y los costos se incrementan al aumentar el número de puntos gestionados. La plataforma informática es *Oracle*, y permiten la integración con el sistema de información comercial del propietario.
- Costos de expansión del sistema
- Costos de los elementos de medida e integrabilidad con otros proveedores de equipos de medida.

De acuerdo con los criterios anteriores, se estimaron los costos y beneficios esperados de los sistemas, que se resumen en la tabla 2-7, los tiempos de suministro, costos de la plataforma y costo de los equipos de medida resultan parecidos, pero como se comentó anteriormente, las tecnologías RF involucran costos adicionales para la operación (comunicación) y requieren de algunos equipos adicionales, como equipos de comunicación que la tecnología PLC no requiere.

En PLC el costo de estas tecnologías disminuye en la medida que el sistema involucra un mayor número de usuarios y de acuerdo con la experiencia de *EMCALI*, la tecnología de más amplia utilización y con mejores prestaciones para las empresas del sector eléctrico corresponden a la tecnología PLC, que adicionalmente posibilita el crecimiento de la cobertura del sistema de manera gradual en el largo plazo, permitiendo atender a todo el espectro de clientes (urbanos, rurales, comerciales, industriales, residenciales) sin requerir de inversiones exorbitantes en el corto plazo. Adicionalmente, por las características del sistema de comunicación es factible que los

Tabla 2-7: Costos de implementación de PLC frente a RF Peña (2012)

Descripción	Tecnología PLC	Tecnología RF
Costos por equipo de medida monofásico, con corte	USD 160	USD 170
Costos plataforma tecnológica (HW, SW, Capacitación, integración, otros)	USD 150.000, FASE 1, USD 60.000 MASIVO	USD 140.000, FASE 1
Costos gestión comercial	0	USD 3/Mes por concentrador
Posibilidades integración varias marcas de medidor	Si	No
Tiempo de implementación	4 meses	4 meses

desarrolladores de medidores y ensambladores nacionales integren sus equipos a esta tecnología de comunicación, que fue adoptada por varias marcas de medidores Peña (2012).

2.6. La tecnología PLC y las Redes Inteligentes

2.6.1. Las Redes Inteligentes

Una red inteligente se puede definir como la integración entre la ingeniería eléctrica y las tecnologías de información y de comunicaciones, permitiendo que las áreas de protecciones, control, medida, etc., sean vinculadas en un único sistema de gestión, con el fin de utilizar eficiente y racionalmente la energía Caruso (2010). Usar la energía de manera eficiente, ayuda a reducir las emisiones de CO_2 y el calentamiento global, es por esto que muchos países alrededor de todo el mundo promueven desde hace varios años la transformación de las redes eléctricas convencionales con la inclusión de algún tipo de inteligencia en cada una de las etapas de generación, transporte y consumo, para controlar y enfrentar el calentamiento global mediante el uso de nuevas fuentes de energía, la disminución o mitigación de fallas en la red, eliminación de cortes prolongados del servicio eléctrico, monitoreo y control en tiempo real, uso eficiente de los activos y de la operación, además de la participación activa de los consumidores Bartels (2012).

Para que el concepto de redes inteligentes tenga sentido es necesario abordarlo desde diferentes puntos de vista tal como se muestra en la figura 2-5.

2.6.2. El papel de la tecnología PLC en las Redes Inteligentes

El papel de la tecnología PLC en las Redes Inteligentes aún esta en debate y sobre este existen varios criterios; mientras algunos abogan por que PLC es un excelente candidato para



Figura 2-5: Concepto general de una red inteligente

muchas aplicaciones en las Redes Inteligentes, otros expresan preocupaciones y argumentan que las soluciones inalámbricas son una alternativa más establecida. Sin embargo, no existe duda que la red inteligente explotará varios tipos de tecnologías de comunicación, que van desde la fibra óptica a la tecnología inalámbrica y de cable. Algunos sostienen que el PLC tiene un estado de normalización claro y que ofrece velocidades de datos que son demasiado pequeños; otros también sostienen que los módems PLC son todavía caros y que no está estudiado precisamente el tema de compatibilidad electromagnética (EMC).

Algunas de los aspectos claros en el análisis de implementación es que PLC es la única tecnología que tiene costo de implementación que puede considerarse comparable a la tecnología inalámbrica ya que las líneas están ya instaladas. Otro punto a favor que tiene el PLC es que ya ha salido de la fase experimental y es una tecnología madura para el despliegue.

NB-PLC tiene varias ventajas en comparación con BB-PLC para las aplicaciones AMR / AMI o Respuesta a la demanda que involucran operaciones de control y mediciones. A continuación, se resumen las principales ventajas **Galli y otros (2011)**:

- Facilidad de actualización para versiones futuras
- Estandarización: la única banda disponible para PLC en todo el mundo es la banda CE-NELEC
- Coexistencia: Redes NB-PLC pueden coexistir mediante FDM con redes BB-PLC
- Diseño optimizado: soluciones BB-PLC como IEEE 1901 o ITU-T G.hn no fueron diseñados para aplicaciones en redes inteligentes sino para aplicaciones en redes domésticas o de acceso a Internet, mientras los objetivos de las redes NB-PLC están explícitamente orientados a aplicaciones de Redes Inteligentes

Entre las ventajas anteriores, una que tiene gran impacto es la facilidad de actualización del hardware instalado ya que representan un gran valor significativo en el despliegue de una red PLC.

2.6.2.1. Avances en Colombia

En Colombia sólo se han conseguido algunos avances en cuanto a la utilización de la red para este tipo de propósitos, dentro de los que está la empresa de energía EMCALI y ELECTRICA-RIBE. Empresas Públicas de Medellín adelantan pruebas piloto con tecnología PLC de banda ancha para verificar la viabilidad de esta tecnología, ESSA (Empresa Electrificadora de Santander) en alianza con Endesa Network Factory desarrollan el proyecto llamado internet eléctrico, para masificar el uso del internet en poblaciones de bajos recursos económicos y CODENSA con un piloto en algunos puntos específicos de la red de Bogotá bajo el proyecto "Smart Metering.

XM filial de ISA conjuntamente con la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) han establecido a lo largo del Sistema de Transmisión Nacional una red de medidores sincrofasoriales a través del proyecto denominada iSAAC (Intelligent Supervision and Advanced Control System), proyecto continuación del proyecto SIRENA [León y Gomez \(2012\)](#).

En febrero de 2014, la Empresa de Energía de Bogotá creó una filial dedicada exclusivamente al desarrollo de proyectos de movilidad: Empresa de Movilidad de Bogotá S.A.S. E.S.P. cuyo objeto es el desarrollo del componente eléctrico para sistemas de transporte masivo, de pasajeros, de carga u otras modalidades. De esta forma, EEB tiene previsto participar en diferentes proyectos de movilidad eléctrica como Bogotá Elektrika (Electrificación parcial de troncales Transmilenio Fases I y II), Tren-Tram (Corredor Occidente: Estación de la Sabana-Facatativá; Corredor Sur: Estación de la Sabana-Soacha), Sistema de Metro Ligero de Bogotá (Tranvía de la Séptima), Transmilenio Avenida Boyacá, Tren de Cercanías del Norte, Metro de Bogotá.

2.7. ¿Cual es el mejor tipo de tecnología PLC para aplicaciones en una Red Inteligente?

Existen varios tipos de soluciones de PLC, UNB (Ultra Narrow Band), NB (Narrow Band), por ende la elección de la que la tecnología PLC se ajusta al escenario de aplicación no sólo en cuestiones técnicas, sino en los aspectos regulatorios y de negocios.

El ahorro en los costos por contar con la infraestructura, deben sopesarse contra el costo de despliegue de repetidores y acopladores. Aunque es difícil dar valores universales para la pérdida de trayectoria, ya que muchos factores influyen en ella (cables aéreos o subterráneos, tipo de cables, la carga, el tiempo, etc), los valores típicos de pérdida de trayecto para el canal de PLC en dB / km se encuentran en la tabla [2-8](#)

En Colombia, por ejemplo EMCALI seleccionó, entre varias tecnologías PLC, la denominada TWACS, perteneciente a la compañía americana ACLARA Power Line Systems Inc., que provee una comunicación única bi-direccional sobre las líneas de energía para recolectar, comunicar,

Tabla 2-8: Valores Típicos de pérdidas en dB/km

Nivel de Tensión	$f= 100 \text{ kHz}$	$f= 10 \text{ MHz}$
Baja Tensión	1,5 - 3	160 - 200
Media Tensión	0,5 - 1	30 - 50
Media Tensión (subterráneo)	0,5 - 1	30-50

analizar, y manejar información sobre el consumo de electricidad, agua y gas. La plataforma seleccionada permite la gestión comercial del sistema a través del sistema de información comercial de EMCALI, pudiendo la empresa definir y aplicar las políticas comerciales existentes y posibilitando el desarrollo e implementación de productos corporativos sin depender tecnológicamente del proveedor.

EPSA, ELECTRICARIBE, EPM y ESSA, entre otras empresas, han realizado despliegues iniciales con diferentes niveles de desarrollo de infraestructura de medición avanzada a través de PLC y otras tecnologías que han logrado muy buenos resultados en reducción de pérdidas de energía (y consecuentemente de emisiones de dióxido de carbono) además de la adopción de modelos que aseguran la interoperabilidad de tecnologías y sistemas de información. Igualmente han trabajado en el desarrollo de soluciones virtuales para los clientes y exploración de alternativas de vehículos eléctricos y de generación distribuida a partir de energía solar para clientes finales, siempre con énfasis en el uso eficiente final.

Codensa eligió para sus pilotos probar con la solución NB-PLC implementada en Europa por ENEL y Endesa, dicha solución ha sido reconocida por su despliegue en todas las empresas del grupo con muy buenos resultados.

2.8. Viabilidad de implementación de PLC según características Técnicas

PLC se enfrenta a varios inconvenientes tales como ruido, atenuación de la señal, efectos multitrayectoria, entre otros, que afectan considerablemente su óptimo desempeño. Por otro lado, la atenuación que sufre la señal de datos en las líneas de potencia es alta e impredecible en la mayoría de los casos. Adicionalmente, es muy difícil obtener un modelo significativo de este canal, debido a su drástica variación con el tiempo, por la constante conexión y desconexión de dispositivos.

2.8.1. Ventajas Técnicas

Existen algunas ventajas considerables de la tecnología PLC sobre otras y en cada una de ellas se consideran aspectos interesantes para la elección sobre otras. A continuación se presentan algunas ventajas considerables:

- La tecnología PLC utiliza como infraestructura de comunicación la red eléctrica, evitando costos adicionales por montaje
- El éxito de PLC en el entorno comercial es atribuible a tres factores clave. La combinación de la gama de frecuencias, potencia de procesamiento y rendimiento ofrecen mucha más agilidad que las tecnologías de red de banda estrecha
- Posibilita el crecimiento de la cobertura del sistema de manera gradual en el largo plazo, permitiendo atender a todo el espectro de clientes (urbanos, rurales, comerciales, industriales, residenciales) sin requerir de inversiones exorbitantes en el corto plazo
- Entre las aplicaciones que provee la tecnología PLC se encuentran - además del uso en medición inteligente - acceso a internet, telefonía integrada con datos, creación de redes privadas, aplicaciones multimedia (videoconferencia, televisión interactiva, radio y música, juegos en red) y domótica.

2.8.2. Limitaciones Técnicas

Como punto de partida en el análisis de las limitaciones esta que la red eléctrica no fue diseñada para uso en comunicaciones y esta condición conlleva a ser un ambiente hostil que no permite la propagación de las señales de comunicación de manera adecuada.

Una red PLC está sujeta a limitaciones relacionadas con la tecnología utilizada. Estas limitaciones hacen referencia a la velocidad de transmisión la cual, en la mayoría de los casos, no corresponde a la tasa esperada, debido a que la red PLC trabaja bajo el uso de un medio compartido, en donde el ancho de banda entre los usuarios disminuye a medida que aumenta la cantidad de estaciones activas en la red PLC. Un aspecto importante es que las estaciones que formarán parte de la red PLC deben estar en la misma fase de la red eléctrica.

Otros de los problemas que enfrenta esta tecnología son los niveles de ruido y de atenuación de la señal a las frecuencias de transmisión de la información. Los diferentes tipos de ruido ocurren a diferentes frecuencias y en cualquier momento y entre más ruido haya en las líneas más se limitará las velocidades de transmisión. La atenuación en las líneas de potencia muchas veces es alta e impredecible y por este motivo se dificulta la obtención de un modelo significativo que cumpla todas las condiciones de operación en el tiempo, dado que varía con la conexión y desconexión de cargas.

Algunos problemas técnicos adicionales que afectan la comunicación son:

- Mal estado de las redes eléctricas instaladas y conexiones. El deterioro de las conexiones hace que la comunicación no sea óptima
- Limitación en cuanto a la distancia de transmisión. Esta definida por el tipo de tecnología PLC implementada y además varía con respecto a muchos factores (impedancia, fluctuación de cargas, atenuación, relación de señal - ruido)

- Problemas relacionados con la interferencia, esta es provocada por varias fuentes, siendo una de las más importantes la generada mediante la inyección de datos en la red eléctrica en el proceso de modulación. Debido a que la red no se encuentra protegida contra las ondas de radio ni contra el ruido se producen interferencias, la causa más común del ruido en una línea eléctrica es la conmutación de las cargas conectadas a la misma. Una característica común a todos estos tipos de ruido es que su comportamiento depende de la frecuencia y el instante en que aparecen es impredecible
- La capacidad del ancho de banda disponible es compartido por todos los usuarios conectados. Los usuarios se conectan en cualquier momento, y el factor crítico de la capacidad de conexión es la coincidencia de muchos consumidores conectados intercambiando información en el mismo instante de tiempo
- Un problema de la tecnología PLC es la existencia de múltiples sistemas incompatibles entre sí

2.8.3. Análisis de la tecnología mediante matriz DOFA

La sigla DOFA define Fortalezas (factores críticos positivos con los que se cuenta), Oportunidades, (aspectos positivos que podemos aprovechar utilizando nuestras fortalezas), Debilidades, (factores críticos negativos que se deben eliminar o reducir) y Amenazas, (aspectos negativos externos que podrían obstaculizar el logro de nuestros objetivos).

Mediante la matriz DOFA se realizó un análisis de factibilidad de implementación de la tecnología para medición inteligente en las empresas de distribución eléctrica [Nacional \(2012\)](#).

2.9. Viabilidad de implementación de PLC en BT según marco regulatorio

Los organismos Internacionales que se destacan por su trabajo en formulación de proyectos, normas y estándares son los siguientes: CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), ETSI (European Telecommunications Standards Institute), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), NTIA (Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información), UPA (Universal Powerline Association), UPLC (United Power Line Council), Home Plug PowerLine Alliance, INELLON CEBus, OPERA, EIA (Electronics Industry Association), X10 Corporations y PLC FORUM.

Los productos PLC deben ser compatibles con las normas generales de regulación internacional, así como las especificadas por la FCC/CENELEC ARIB y comités en EE.UU. /Japón y la Unión Europea. Después de muchos estudios se encontró que hasta los 35 kHz aproximadamente se presenta un nivel de ruido muy alto por lo que se utiliza a partir de 35 kHz ó 40 kHz. Estas normas imponen restricciones severas en la comunicación de frecuencias utilizables por los nodos PLC y emisiones radiadas.



Figura 2-6: Análisis mediante Matriz FODA

2.9.1. Estandarización de PLC en Banda Ultra Angosta y Banda Angosta

La normalización ó estandarización no siempre ha sido una prioridad en los sistemas PLC. La prioridad de la tecnología PLC ha sido históricamente crear sistemas que logren trabajar en condiciones reales. Con el tiempo, algunas partes de los sistemas han promovido las normas, debido a la adopción o la influencia de los promotores de la tecnología. Un buen ejemplo de esta afirmación fueron los sistemas de control remoto, que tiene su origen en la década de 1950 **Dzung y otros (2011)**.

Varias normas se han desarrollado con el fin de garantizar una comunicación fiable y la interoperabilidad, especialmente para la red inteligente y redes para el hogar. Ejemplos de tales normas se evidencian en la tabla **2-9**.

Hasta ahora, el estándar G3-PLC se promociona como el esquema más robusta disponible. LonWorks⁹, (ANSI/EIA/Consumer Electronics Association e ISO / IEC 14908-1) es el resultado del sistema creado por Echelon y con el apoyo de la EIA y la CEA (Consumer Electronics

⁹LonWorks, (local operating network) es una plataforma de red creado específicamente para satisfacer las necesidades de aplicaciones de control. La plataforma está construida sobre un protocolo creado por Echelon Corporation para los dispositivos de red a través de medios tales como par trenzado, líneas eléctricas, fibra óptica y RF.

Tabla 2-9: Especificaciones de PLC Banda angosta

Estandar	Tecnología	Banda de frecuencia (kHz)	Velocidad (kbps)
G3-PLC	OFDM	36-90.6	5.6-45
PRIME	OFDM	42-89	21.4-128.6
IEEE 1901.2-2013	OFDM	9-500	
ANSI/EIA 709.1,.2	BPSK	86-131	3.6-5.4
KNX	S-FSK	125-140	1.2
IEC61334	S-FSK	CENELEC-A	2.4

Association), en principio para automatización industrial y de edificios. El estándar ANSI tiene cuatro partes, una para el protocolo de control de red ([EIA/CEA-709.1 \(2002\)](#)), y tres más para diferentes medios físicos ([CEA-709.2-A \(2000\)](#) es el dedicado a PLC).

La evolución de la segunda generación de sistemas de estandarización se desarrolla con la introducción de sistemas con modulación OFDM, siendo [PRIME \(2014\)](#) y [G3-PLC \(2014\)](#) las primeras instancias. Como se mencionó al principio de esta sección los esfuerzos se centraron inicialmente en la producción de una industria de sistemas capaz de funcionar en el campo, y que eventualmente podrían ser estandarizados. UIT-T inició en enero de 2010 el grupo de trabajo G.hnem (home networking aspects of energy management) con el objetivo de definir una norma NB PLC para aplicaciones de gestión de energía. En marzo de 2010, el grupo de trabajo P1901.2 en la IEEE, comenzó a trabajar en una norma NB PLC para aplicaciones Smart Grid (BT y MT). Tanto la UIT y la IEEE han completado sus normas, de acuerdo con las [IEEE-1901.2 \(2013\)](#) y [ITU \(2013\)](#).

[IEEE-1901.2 \(2013\)](#), define los requisitos de la tecnología PLC de banda estrecha de una red inteligente. Como se indica en el alcance de esta norma, esto puede incluir, por ejemplo, red con medidores, estación de vehículos eléctricos, iluminación, paneles solares, y otras aplicaciones. Esta norma define PLC de banda estrecha con frecuencias entre 10 kHz y 490 kHz. La figura 2-7 muestra, informativamente, las bandas de regulación actuales.

En la actualidad existe también un creciente en el interés en las soluciones de HDR¹⁰ NB-PLC que funcionan en las bandas CENELEC/FCC/ARIB y son capaces de proporcionar velocidades de datos más altas que LDR¹¹. Un ejemplo de esto es como se menciono anteriormente la solución [PRIME \(2014\)](#), que ha ganado el apoyo de la industria en Europa y ha especificado una solución HDR NB-PLC basado en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), que opera en la banda CENELEC-A, y es capaz de alcanzar velocidades de hasta 125 kbps. G3-PLC es una

¹⁰High Data Rate, tecnologías de múltiples portadoras capaz de alcanzar velocidades de datos que oscilan entre decenas de kbps y hasta 500 kbps

¹¹Low Data Rate, tecnologías de portadoras individuales capaces de alcanzar velocidades de unos pocos kbps

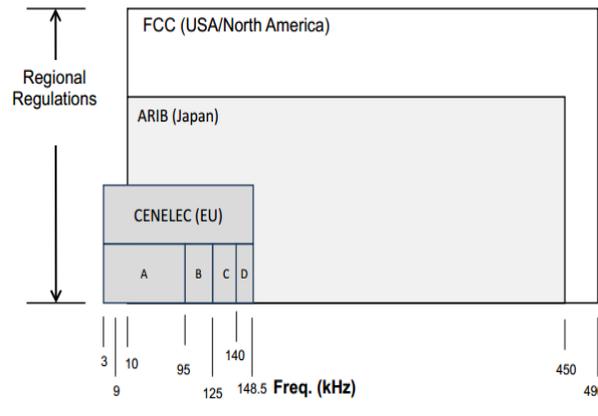


Figura 2-7: Mapa de regulación de frecuencia [IEEE-1901.2 \(2013\)](#)

solución similar a PRIME basada en OFDM que soporta el estándar IPv6 y que puede funcionar en la banda entre 10 - 490 kHz. Las especificaciones de PRIME y G3-PLC son especificaciones abiertas disponibles en línea.

2.9.2. Estandarización en PLC Banda Ancha

El primer estándar mundial de PLC Banda Ancha aprobado por ANSI es [TIA-1113 \(2008\)](#). La norma se basa en gran medida de las especificaciones HomePlug 1.0 basado en OFDM [Chung y otros \(2006\)](#). Las portadoras son moduladas con BPSK o QPSK, ya sea en función de la calidad del canal y la funcionalidad operativa. El control de acceso a medios (MAC) de HomePlug 1.0 se basa en un esquema CSMA /CA que cuenta con un mecanismo de gestión de tamaño de la ventana de adaptación junto con cuatro niveles de prioridad. Los productos basados en las especificaciones en el estándar [TIA-1113 \(2008\)](#) / [HomePlug \(2001\)](#) 1.0, han experimentado un buen éxito en los mercados industriales y hogar. La primera especificación HomePlug, HomePlug 1.0, ofrece un PHY-tasa máxima de 14 Mbit / s. Fue introducido por primera vez en junio de 2001 y desde entonces ha sido sustituido por HomePlug AV. El 28 de mayo 2008 Telecommunications Industry Association (TIA) incorpora la tecnología HomePlug 1.0 en el estándar internacional [TIA-1113 \(2008\)](#).

La especificaciones del HomePlug AV2 se introdujeron en enero de 2012, compatibles con el estándar [IEEE-1901 \(2010\)](#) e interoperable con dispositivos HomePlug AV y HomePlug GreenPHY. La primera generación se considera 20 % más rápido que HomePlug AV 500, que se vende a menudo como HomePlug 600. Devolo de Alemania ha hecho mejoras propietarias en la norma, y están utilizando el cable de tierra, además de la fase y neutro.

Las especificaciones del HomePlug Green es un subconjunto de HomePlug AV que se destina para el uso en las redes inteligentes. Cuenta con velocidades máximas de 10 Mbit/s, y está diseñado para entrar en los contadores inteligentes y aparatos más pequeños, tales como termos-

tatos de climatización, electrodomésticos y vehículos eléctricos, por lo que los datos pueden ser compartidos a través de una red doméstica. GreenPHY utiliza hasta un 75 % menos de energía que AV. El HomePlug Powerline Alliance trabajó con las empresas de servicios públicos y fabricantes de medidores para desarrollar esta especificación.

HomePlug access BPL, se refiere a una tecnología de acceso de banda ancha en el hogar. HomePlug Alliance formó el Grupo de trabajo HomePlug Access BPL, cuya primer objetivo era desarrollar el documento de requisitos de mercado para una especificación HomePlug access BPL.

El proyecto del estandar **IEEE-1901 (2010)**, se estableció en 2005 con el objetivo de desarrollar un estándar para la comunicación de alta velocidad (> 100 Mbps) utilizando dispositivos de frecuencias por debajo de 100 MHz y abordar tanto HAN y aplicaciones de acceso. La norma **IEEE-1901 (2010)** define el control de acceso al medio (MAC) y especificaciones del medio físico (PHY), e incluye dos tecnologías no interoperables diferentes: una FFT-OFDM basada en PHY/MAC y Wavelet-OFDM basada en PHY/MAC.

2.10. Viabilidad de implementación de PLC según normatividad Colombiana

El estudio de viabilidad de la implementación de los medidores inteligentes requiere de una revisión al marco regulatorio vigente, para identificar si existen reglamentos que potencialicen el uso de estos medidores. Adicionalmente, se necesita disponer de un marco normativo por medio del cual se estandaricen las especificaciones técnicas de los medidores.

En Colombia no existen normas que se refieran explícitamente al concepto de redes inteligentes, ni a conceptos relacionados. Sin embargo, como parte del programa Colombia Inteligente, algunas normas ya vigentes se encuentran en revisión por parte de los respectivos comités de normalización, con el fin de adaptarlas con miras a la implementación de las redes inteligentes en Colombia. La mayor parte de estas normas se refieren a medidores de energía y a protocolos de seguridad y comunicación. Un listado de esas normas vigentes en Colombia son:

- **NTC-4440 (2014)**. Equipos de medición de energía eléctrica. Intercambio de datos para la lectura de medidores, tarifa y control de carga. Intercambio de datos locales directos. Esta norma es una adopción de la norma IEC 62056-21. Contiene especificaciones del hardware y del protocolo de intercambio local de datos de los medidores, así como especificaciones referentes a la transmisión de datos. Entre los que integran el Comité 144 se encuentran: CODENSA, Centrales Hidroeléctricas del Cauca S.A E.S.P, EPM, Geiico S.A y la Universidad Autónoma de Occidente y busca a través del consenso de las empresas del sector eléctrico, desarrollar documentos normativos relacionados con medidores de energía y transformadores de medida, que posibilitan su acceso a los mercados nacionales e internacionales
- **NTC-5648 (2008)**. Es la traducción de la IEC 62055-31. Esta norma aplica a medidores de pago estáticos de energía eléctrica de reciente fabricación, con clases de exactitud 1 y 2 para conexión directa, para la medición de consumo de energía activa de corriente alterna a una frecuencia en el rango de 45 Hz a 65 Hz, que incluyen un interruptor de carga para

el propósito de interrumpir o restaurar la alimentación eléctrica a la carga de acuerdo con el valor actual de crédito disponible en el medidor de pago. No aplica a medidores de pago estáticos de energía activa en donde la tensión a través de los terminales de conexión exceda los 600 V (tensión entre líneas para medidores, para sistemas polifásicos).

- **NTC-5907 (2014)**. Mediciones De Electricidad. Sistemas De Pago. Especificación De Transferencia Estandar (STS). Protocolo de la capa de aplicación para sistemas portadores de códigos en una sola dirección. Esta norma especifica la capa de aplicación del protocolo STS para unidades de transferencia de crédito y otra información de gestión de un sistema desde un punto de venta (POS) a un medidor de pago STS en un sistema de portadores de código en una dirección.
- **NTC-5908 (2014)**. Medidores de electricidad. Sistemas de pago. Especificación de transferencia estándar (STS). Protocolo de nivel físico para portadores de código de tarjeta magnética.
- Resolución **CREG-172 (2011)**. Mediante esta resolución se ofrece un incentivo para la adopción de tecnologías de medición con algún tipo de inteligencia asociada con el objetivo de la reducción de las pérdidas no técnicas. Establece la metodología para la implementación de los Planes de Reducción de Pérdidas No Técnicas en los Sistemas de Distribución Local (SDL) y aplica a los operadores de red y comercializadores minoristas que atienden usuarios regulados y no regulados en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Los planes de reducción de pérdidas no técnicas son las actividades que deben desarrollar los Operadores de Red (OP) para reducir el índice de pérdidas en un sistema conforme al artículo 4 que establece que El OR que atienda un mercado de comercialización que presente pérdidas de energía en el Nivel de Tensión 1 (Tensión nominal inferior a 1kV), calculadas según lo establecido en el numeral 4.1.2 del anexo 4 de la presente resolución, superiores a las pérdidas reconocidas a la fecha de entrada en vigencia de esta resolución, debe someter para aprobación de la CREG el Plan que debe establecer como mínimo, lo establecido en el Anexo 1.
- Resolución **CREG-070 (1998)**. Adaptabilidad. Los Planes de Expansión deberán incorporar los avances de la ciencia y de la tecnología que aporten mayor calidad y eficiencia en la prestación del servicio al menor costo económico.

Desde el 2006 el ministerio de las TICs incluyo la tecnología PLC, WiMax, radio y televisión digitales como de estudio en el programa de tecnologías alternativas para la disminución de la brecha digital. Al igual que PLC, BPL es otra de las alternativas contempladas de comunicación en zonas rurales donde los métodos tradicionales no están presentes.

2.10.1. Análisis sobre políticas publicas sobre el uso de medidores inteligentes

En el estudio de la implementación de medidores inteligentes se requiere tener claro el marco regulatorio vigente en Colombia, además de verificar la existencia de un marco normativo que estandarice las especificaciones técnicas de los equipos. En Colombia, aún no han entrado en

vigencia normas que potencialicen el uso de medidores inteligentes, sin embargo, ya existe un borrador que se encuentra bajo revisión. También se encuentran en revisión normas vigentes como la NTC 4440 y la NTC-ISO/IEC 27001.

Algunas de las leyes sobre el uso de medidores inteligentes son:

- Ley 142 de 1994. 9.1 Obtener de las empresas la medición de sus consumos reales mediante instrumentos tecnológicos apropiados, dentro de plazos y términos que para los efectos fije la comisión reguladora, con atención a la capacidad técnica y financiera de las empresas o las categorías de los municipios establecida por la ley. En el artículo 9 se establecen los derechos del usuario a obtener de las empresas prestadoras del servicio la medición de su consumo y de esta forma se obliga que esta sea lo mas parecida a la realidad con instrumentos adecuados y apropiados para tal fin
- Artículo 144 de la Ley 142 de 1994. Hace referencia a los medidores individuales y se estipula los suscriptores o usuarios podrán adquirir los bienes y servicios respectivos a quien a bien tengan; y la empresa deberá aceptarlos siempre que reúnan las características técnicas. No será obligación del suscriptor o usuario cerciorarse de que los medidores funcionen en forma adecuada; pero sí será obligación suya hacerlos reparar o reemplazarlos, a satisfacción de la empresa, cuando se establezca que el funcionamiento no permite determinar en forma adecuada los consumos, o cuando el desarrollo tecnológico ponga a su disposición instrumentos de medida más precisos. Mediante este Artículo la empresa podría justificar el reemplazo del medidor convencional por uno con algún tipo de inteligencia que cuenten con prestaciones adicionales como la lectura frecuente (por intervalos) de los consumos de energía, envío de información que puede ser útil para la empresa (frecuencia, voltaje, corriente, factor de potencia, etc.).
- Resolución **CREG-108 (1997)**. La empresa podrá ofrecer la instalación de medidores de prepago a los suscriptores o usuarios que no sean beneficiarios de subsidios en los servicios públicos de energía y/o gas. Mediante este artículo ofrece una oportunidad para que la empresa prestadora de servicios públicos instale medidores prepago en los usuarios de los estratos 4, 5 y 6, quienes no reciben subsidios para el pago de los servicios públicos.

2.10.2. Beneficios Tributarios

En Colombia actualmente no se cuenta con beneficios tributarios para el tema de redes inteligentes. Sin embargo, se pueden encontrar beneficios tributarios en temas relacionados con las este, como generación distribuida, vehículos eléctricos, generación mediante fuentes de energía renovable, entre otros.

La reducción de pérdidas no técnicas (hurto de energía), la ampliación de la cobertura (asequibilidad) y la mejora de la confiabilidad han proporcionado la motivación para las acciones realizadas hasta el momento. Sin embargo, es urgente que en Colombia se inicie la discusión sobre la consideración de activos "smart grid" que agregan valor a toda la cadena de suministro de electricidad y que abren nuevas posibilidades y mejoras en la eficiencia y el costo de la energía y redundan en un menor impacto ambiental.

EMCALI, por ejemplo, presentó pérdidas del 23,43 % en el nivel de tensión 1 en Junio de 2013, superiores a las pérdidas reconocidas (9,56 % para el nivel de tensión 1, como se estipula en la Resolución CREG 167 de 2009 para EMCALI), razón por la cual, EMCALI ha implementado el sistema TWACS como Plan de Reducción de Pérdidas No Técnicas

El Artículo 144 de la Ley 142 de 1994 es un incentivo regulatorio por el que la empresa puede exigir al suscriptor el reemplazo del medidor convencional por uno inteligente. Sin embargo, el tema de la sustitución del medidor involucra la oposición por parte del suscriptor, quien puede justificar la no sustitución del medidor siempre y cuando éste cumpla con las características técnicas exigidas por la empresa y se verifique el buen funcionamiento del mismo. Además, los usuarios de estrato 1, 2 y 3 muy probablemente no pueden asumir el costo del medidor, por lo que existe una barrera de tipo social frente a la implementación de estos medidores en dichos estratos.

La Ley 1715 del 13 de mayo de 2014 "por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, ya que no ha sido suficiente el avance a partir de la Ley 697 del 3 de octubre de 2001 "mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas reglamentada por el decreto 3683 de 2002. Esta ley incentiva la inversión en proyectos de fuentes no convencionales de energía, como fomento a la investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía y contempla que los obligados a declarar renta que realicen directamente inversiones en este sentido, tendrán derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años siguientes al año gravable en que hayan realizado la inversión, el 50 % del valor total de inversión realizada.

2.11. Conclusiones

La tecnología PLC no es un desarrollo nuevo, es una alternativa que ha venido analizándose e implementándose desde hace algunos años, además de fortalecerse por medio de pruebas de campo y estudios investigativos hasta ser un producto comercial en varios lugares en el mundo. Su crecimiento ha sido moderado de acuerdo a las zonas de influencia de la tecnología y a las alianzas de grupos empresariales que intentan que todas sus empresas en el mundo cuenten con los mismos desarrollos. PLC resulta ser una tecnología atractiva y una alternativa para el acceso a servicios adicionales de comunicación, además de ser un complemento para las demás tecnologías ya desplegadas y con más años de madurez.

En búsqueda de aprovechar los nuevos avances tecnológicos, se planean soluciones en el sector eléctrico mencionados anteriormente que se pueden implementar a nivel nacional para tener un suministro de energía limpio, sostenible y seguro, teniendo en cuenta los desarrollos en energías renovables, medidores inteligentes, vehículos eléctricos, transmisión DC, medición sincrofásica entre otros, tecnologías que pueden generar una mejora considerable en la gestión del sistema eléctrico.

Es importante tener muy claro los inconvenientes que posee la red eléctrica, ya que desde su génesis no fue diseñada para la transmisión de datos, sin embargo, para las aplicaciones instaladas

se han escogido soluciones probadas, con pruebas comerciales de funcionamiento, encriptación y detección de errores, modulación, etc. Con la técnica de modulación OFDM se ha garantizado el funcionamiento óptimo de los sistemas de comunicación y presenta grandes ventajas frente a otras técnicas de modulación utilizadas en los principios del PLC.

La implementación de la tecnología PLC no puede ser considerado como el reemplazo de las tecnologías existentes, sino como una solución complementaria que trabaja en conjunto con otras tecnologías de comunicación en busca de una solución mas óptima. Es así, como PLC surge como alternativa tecnológica viable económicamente, la cual hace uso de la red eléctrica domiciliaria, brindando la posibilidad de implementar una red de área local a bajo costo y utilizar infraestructura de cableado ya existente, lo cual es una gran ventaja frente a otras tecnologías; permitiendo llegar a diferentes sitios donde otros medios de transmisión no llegarían tan fácilmente.

El creciente interés de la tecnología PLC en Colombia, desde el punto de vista académico y empresarial se ha ido consolidando a partir de los últimos años, donde se ha contado con el apoyo del Estado y la empresa privada.

Caracterización de la red eléctrica

Resumen

Este capítulo describe las características de las redes PLC usando la red eléctrica de baja tensión como medio de transmisión. Las características de las redes PLC están definidas por los parámetros propios de la red de baja tensión. Debido a que la red eléctrica no está diseñada para este tipo de propósitos se realiza un análisis de la topología de la red, características específicas del medio de transmisión PLC, problemas de emisión electromagnética y características de ruido que causan perturbaciones en las redes PLC.

3.1. Topología de la red

La topología de una red de acceso PLC, está dada por la topología de una red eléctrica de baja tensión usada como medio de comunicación, sin embargo se puede organizar de diversas maneras tratando de optimizar la operación de la red. De acuerdo con esto se realizara en este capítulo la discusión de varias configuraciones de la red PLC, el comportamiento de la señales en distintas topologías y la influencia de ésta en la transmisión de información y el impacto causado por el uso de elementos adicionales en la red.

Debido a que las redes dispuestas en la transmisión de energía eléctrica son compartidas para un número finito de usuarios determinado por la capacidad de los transformadores instalados en el sistema, resulta un reto el análisis la forma como se envían y reciben datos desde diferentes lugares y por diferentes medidores de energía.

Otro factor importante dentro del análisis es la transmisión de datos, ya que es muy sensible a las pérdidas y distorsión de la señal, que dependen de variaciones de la carga y la compensación de potencia reactiva en cada parte del sistema eléctrico. La presencia de dispositivos para compensación de potencia reactiva como los bancos de condensadores ocasionan una disminución en la intensidad de la señal.

3.1.1. Topología de la red de baja tensión

Las redes de distribución eléctrica no fueron diseñadas para la transmisión de datos y en el diseño de estas existen gran cantidad de configuraciones que varían desde aspectos físicos como calibres, tipos de cables, aislamiento utilizado, etc y se instalan de acuerdo a normas definidas

de acuerdo a cada país. Otros de los factores que diferencian una red PLC depende de algunos factores descritos a continuación:

- Diseño de la red. Las redes de baja tensión generalmente están diseñadas en forma radial y con diferencias en la cantidad de ramales como de usuarios
- Longitud de la red. La longitud varia de acuerdo a las áreas (rural ó urbana) de instalación de la red
- Diferencia de usuarios. De acuerdo al tipo de usuario (comercial, industrial ó residencial), cambian el tipo de cargas
- Densidad de usuarios por transformador

Generalmente en los circuitos de distribución existen varias ramas que conectan los Gateway conectados en los transformadores con los usuarios. Cada una de estas ramas tienen diferentes topologías dependiendo del número de usuarios conectados a cada transformador y a la longitud de cada uno de los tramos. Cada una de estas diferencias hace que cada red tenga una topología particular, por lo cual se hará una aproximación de una red típica para PLC con algunos valores característicos.

3.2. Estructura de las redes de acceso PLC

La red de baja tensión esta compuesto por un transformador y un número de acometidas que suministran energía a los usuarios finales. Un sistema de transmisión PLC utiliza la red de baja tensión como medio de transmisión.

Las redes de acceso PLC están conectadas a las redes principales de comunicación WAN por una estación maestra, usualmente colocada en el transformador que funciona como un concentrador de datos. Para contrarrestar el problema de la transmisión de información a través de los transformadores, se utilizan acopladores inductivos y capacitivos de acuerdo al tipo de instalación (subterránea o aérea, figura 3-1), estos dispositivos inyectan y extraen la señal de comunicaciones a la red eléctrica. Algunos de los acopladores existentes en el mercado se describen a continuación:

- Acopladores inductivos, no requieren conexión física, por lo que son útiles para aplicaciones tales como subestaciones subterráneas
- Acopladores capacitivos, ofrecen transmisión de señal de alta frecuencia sin riesgo para la red eléctrica, este puede ser conectado a la red eléctrica directamente por medio de un fusible de protección

Los Gateways situados en cada uno de los transformadores se encargan del manejo de la información de los clientes asociados a este circuitos, además es el equipo que interconecta dos redes de diferentes protocolos y arquitecturas, en este caso la red de baja tensión con media tensión, para transmitir la información recolectada, tal como se ve en la figura 3-2.

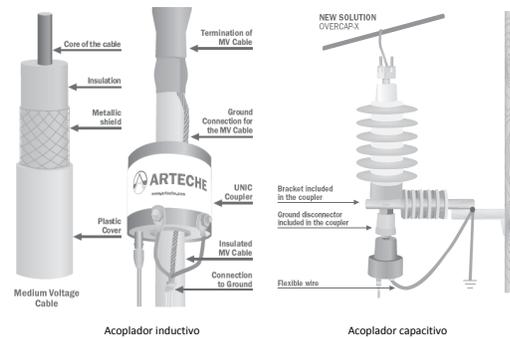


Figura 3-1: Acopladores Inductivo y capacitivo PLC Artech (2014)

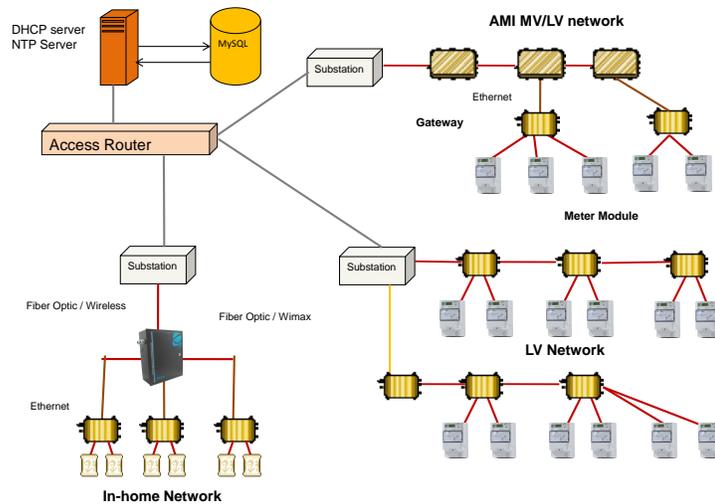


Figura 3-2: Topología de una red PLC de baja tensión Corinex (2014)

El lugar de integración del sistema eléctrico y de comunicación se da en el transformador o en la subestación de distribución. Aquí se produce el acoplamiento de la red eléctrica con equipos complementarios que en un extremo se enlazan a una conexión de alta velocidad instalada en la subestación, donde llegara la información obtenida de cada usuario de la red eléctrica y de esta forma esta se convierte en una central de control donde se analizarán los datos obtenidos.

El último tramo de comunicación entre los Gateways de MT hasta los centros de control se hace utilizando otro tipo de tecnologías como la fibra óptica ó GPRS, tecnologías que resultan ser mucho más utilizadas por la capacidad de enviar los datos a través de distancias más largas.

3.2.1. Conexión de acceso domestico PLC

Al tratarse de un entorno mucho más pequeño y controlado, la transmisión de datos para uso domestico resulta mucho más estable y presenta menor cantidad de interferencias, utilizando el mismo principio de transmisión en redes de baja tensión externas. En este tipo de redes también es utilizado un Gateway que funciona como maestro y diferentes dispositivos receptores que funcionan como esclavos. El primer componente recoge la señal proveniente del equipo Cabecera del sistema Outdoor y el segundo componente se comunica con la parte terminal del Repetidor e inyecta la señal.

Actualmente, los servicios de automatización son cada vez más populares por su uso en el sector industrial, empresarial y dentro de edificios, además del uso en sistemas de vigilancia, control de temperatura, etc.

3.2.2. PLC en vehículos

El uso de la aplicación PLC en automóviles es similar con su uso como LAN (Local Area Network) en interiores. En los dos casos, la estructura de la red tiene una topología radial, además de existir acoples de impedancias por el cambio de calibres y uniones de cables que provocan reflexiones de la señal, dando lugar a propagación multitrayecto, y por tanto a una respuesta en frecuencia con atenuaciones [Cañete \(2002\)](#).

3.3. Elementos de una red PLC

En general, PLC está compuesto por: el sistema de información y la plataforma informática, que debe interactuar con los sistemas de información (sistema de información comercial, técnico, SCADA y sistema de información geográfico), que comprende el Servidor, el equipo de Comunicación con la red WAN y los equipos de comunicaciones en la Subestación.

3.3.1. Redes Eléctricas

El principal elemento de una red PLC, es la red eléctrica que sera el canal de comunicación, este sera analizado desde el punto de las comunicaciones en capítulos siguientes.

Para usar la red de distribución eléctrica de baja tensión como un sistema de comunicación digital es necesario un acondicionamiento de la infraestructura eléctrica. Estas redes normalmente pueden transmitir señales de baja frecuencia a 60 Hz y señales con frecuencias superiores a 1 Mhz sin que ambas frecuencias interfieran una de la otra.

3.3.2. Transformadores

Cada transformador distribuye 3 líneas de baja tensión, con una longitud aproximada de 250 m que suministra energía eléctrica aproximadamente 50 clientes.

En el esquema general de una red PLC, al transformador llega un acceso de banda ancha a través de fibra óptica, GPRS u otro tipo de tecnología suministrado por un ISP (Internet Service Provider), donde se instalan un Gateway que se encarga de distribuir los datos a los diferentes usuarios que comparten dicho circuito y como se menciono anteriormente son utilizados acopladores (3-1) para evitar que las señales sean enviadas a través del transformador.

3.3.3. Modem de Cabecera (Gateway)

El Gateway convierte los datos de la red PLC de baja tensión al estándar de Internet, que se encarga de interconectar las diferentes redes de servicio con la línea de baja tensión y garantiza una conexión a alta velocidad. Desde este punto se conecta con el proveedor de servicios (ISP). Las empresas interesadas en prestar servicio mediante este tipo de tecnología deberá instalar en el transformador de distribución un Módem o Cabecera PLC de recepción y distribución de datos, que se conecta a la red por medio de un nodo que tiene acceso a Internet a través de un Backbone de fibra óptica, Inalámbrico, etc.

Existen dos tipos de versión de Gateway: Media Tensión (MT) y Baja Tensión (BT). Para MT la distancia máxima es 600m y en BT 300m. Estos equipos emite señales de baja potencia, por lo general menores de 100mW.

3.3.3.1. Medidor Inteligente

Un medidor inteligente es generalmente un dispositivo electrónico que registra el consumo de energía eléctrica en intervalos definidos por el usuario y comunica esa información a través de algún tipo de tecnología de comunicación (PLC, GPRS, 3G, etc.) por lo menos diariamente, para fines de seguimiento y facturación. Los contadores inteligentes permiten la comunicación bidireccional entre el cliente y el sistema control, además pueden recopilar datos para la presentación de informes remoto.

El Medidor E34A de Landys + Gyr utilizado en el despliegue de la red piloto en la ciudad de Bogotá, puede a través de sus interfaces de comunicación, integrarse a los módulos de comunicación remota Gridstream IHD RF, Gridstream RF o Gridstream PLC Landys+Gyr (2014).

Gridstream es la solución de red inteligente E2E de Landis+Gyr preparada para el futuro que combina la medición, comunicaciones, gestión de red, software, aplicaciones de red y consumo, y servicios profesionales en una única plataforma segura e integrada.

3.3.4. Repetidor

Cuando las distancias entre el Modem de cabecera y los usuarios finales es demasiado larga, son utilizados equipos que funcionen como repetidores, estos dividen a una red PLC en segmentos con longitudes diferentes de acuerdo a la topología y diseño del sistema. Dependiendo del método de transmisión y modulación aplicado, este dispositivo puede incluir funciones de modulación y demodulación de la señal transmitida.

La utilización de los repetidores puede extender las distancias de una red PLC, sin embargo, también aumentan los costos de la solución, por eso el número de repetidores dentro de la red tiene que ser ubicada de manera óptima. Un esquema de ubicación en una red PLC se puede verificar en la figura 3-3.

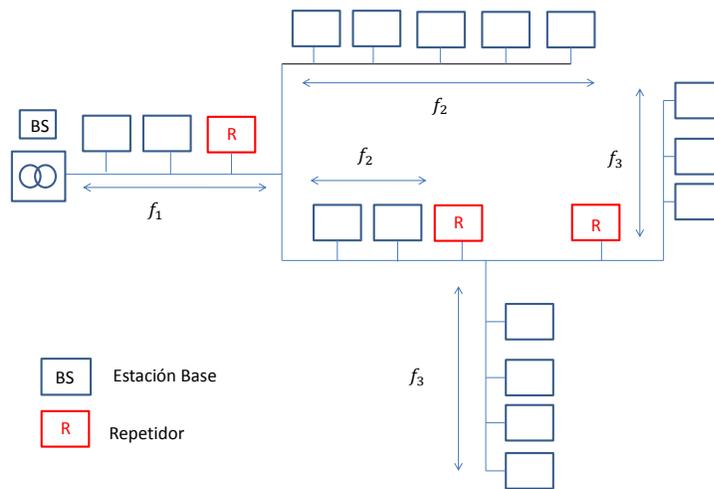


Figura 3-3: Red PLC con repetidores

3.4. Acoplamiento de la señal

Para la transmisión de información en la red eléctrica con una frecuencia superior a 60 Hz, se debe inyectar o extraer las señales, además se debe eliminar armónicos lejanos de esa frecuencia y transitorios, como impulsos, con suficiente amplitud como para dañar los equipos instalados en los extremos del enlace.

En el acoplamiento de la señal a la red eléctrica existe una separación galvánica. La separación galvánica más común es capacitiva asociada a un transformador con una característica de filtro pasa alto para asegurar la separación de la tensión de línea y la mayor parte de sus armónicos de la información, además permite evitar daños al receptor o al transmisor.

El acoplamiento de la señal puede ser en serie o en paralelo. Normalmente el acoplamiento

se implementa en paralelo, entre una fase y el neutro, en un sistema exterior o interior, o entre dos fases en sistemas exteriores de media tensión entre las estaciones transformadoras y las subestaciones. El caso del acoplamiento en serie se utiliza fundamentalmente en las estaciones transformadoras o subestaciones, pero implican un mayor costo de implementación y mantenimiento. En los acoplamientos en paralelo no se puede prevenir cierta cantidad de inducción magnética debida a la corriente de 60 Hz, lo cual es una desventaja y en contraposición al acoplamiento en serie, no depende de la corriente de carga que fluya en la línea.

El transmisor necesita un acoplamiento fuerte para transferir a la red una señal con la máxima amplitud permitida, ya que esta será atenuada en la red, mientras que el receptor necesita un acoplamiento débil de manera que ayude a filtrar interferencias.

En ambos extremos del enlace se debe implementar un circuito que presente un corto circuito en las frecuencias de los datos para poder capturarlas y entregarlas al receptor.

El transformador de acoplamiento debe tener una fuerte característica de filtro pasa alto para evitar que la tensión de red pase a la etapa del transmisor, pero esto no es problema porque hay una gran separación entre la frecuencia de la red y la de operación [García \(2008\)](#).

En el estándar CENELEC [EN-50065-1 \(1991\)](#), que regula el uso del rango de frecuencia entre 3 KHz a 148,5 KHz y los niveles de señal admisible para comunicación por la red eléctrica en ese rango de frecuencias, se establece un circuito acoplador con protección por medio de diodos Zener como se muestra la figura [3-4](#).

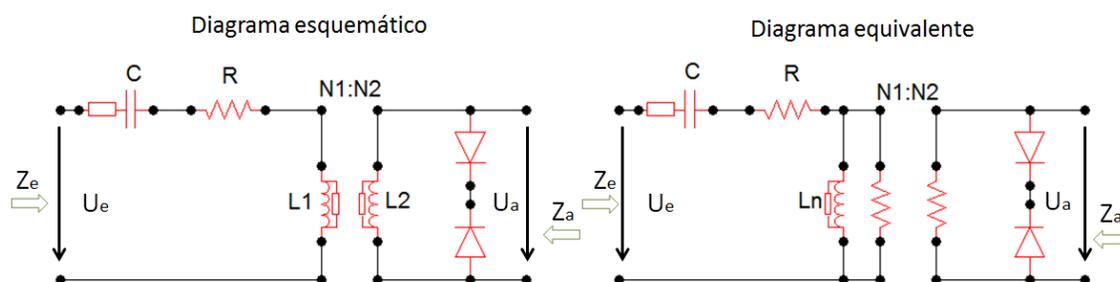


Figura 3-4: Circuito de protección de transitorios y equivalente. CENELEC [EN-50065-1 \(1991\)](#)

En la figura [3-4](#), se observa el circuito mediante el cual se separa la tensión de 220 VAC del resto del circuito con la utilización del condensador, la resistencia de la parte del transmisor debe ser muy pequeña, por ejemplo menor a 1Ω , valor de resistencia que es prácticamente el valor de la resistencia del bobinado y de esta forma mejorar el acoplamiento de la señal. Los diodos Zener se utilizan para transformar rápidamente la energía alta en calor sin dañarse y dar una rápida respuesta a las frecuencias. En este circuito, se presentan algunas desventajas cuando se aumenta la frecuencia, por que los diodos presentan una alta capacidad y atenúan la señal, para este tipo de casos se utiliza puente de diodos Schottky. El receptor tiene una resistencia con un valor alto mayor a la impedancia de línea con valores de 150Ω para cables subterráneos.

Mediante la relación entre las tensiones de entrada y salida se logra transferir la mayor amplitud de la señal del transmisor en la red eléctrica. Por lo general la relación esta en el orden de $1/2 - 1/4$. Los transformadores con bobinados sobre núcleos en forma de anillos de ferrita ofrecen

un mejor rendimiento, mayor campo magnético con menores pérdidas.

3.5. Dificultades de la transmisión por las líneas de potencia

La red eléctrica posee diferencias de otros medios de comunicación por cable, ya que los niveles de interferencia y ruido son mucho más grandes, debido a que se encuentran en ella muchas derivaciones, transformadores, malas conexiones, impedancias variables, etc. Para el caso de los transformadores, estos por poseer bobinas, producen una alta impedancia cuando aumenta la frecuencia. La corriente y el voltaje a alta frecuencia se atenúan de manera crítica con el aumento de la frecuencia tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$Z_L * (j\omega) = Lj\omega \quad (3-1)$$

Las redes PLC son sensibles a las distorsiones debido a la limitada potencia de la señal por lo que no asegura una capacidad de transmisión a largas distancias. Existen distorsiones causadas por otros agentes, por ejemplo, perturbaciones ocasionadas por motores que se conecten a la red o que puedan encontrarse cerca de una red PLC, el swicheo de televisores o monitores, etc. Algunas fuentes de poder, especialmente fuentes con un mal diseño de conmutación también introducen ruido en las líneas eléctricas en las frecuencias de trabajo. Algunas otras investigaciones realizadas por empresas como Intellon, notaron que las uniones con corrosiones eléctricas presentan un efecto de semiconductor cuya no-linealidad genera ruido en cada medio ciclo de potencia.

Además de las distorsiones producidas por agentes externos, el cableado eléctrico como canal de comunicación también presenta sus propias perturbaciones. Aquí se incluyen las pequeñas o grandes variaciones de fuentes de ruido, cambios de impedancia y los efectos de multitrayecto [Suarez y Cardenas \(2011\)](#).

En general, el ruido y la interferencia limitan el ancho de banda, distorsionan y atenúan la señal transmitida. Estos factores se deben examinar y valorar de acuerdo con el efecto que tengan sobre los datos transmitidos, y aquellos que se destaquen deben incorporarse en un modelo del canal con el fin de evaluar las limitaciones del medio para garantizar el ancho de banda efectivo y calidad de servicio.

El ancho de banda del medio y la relación señal a ruido son dos factores de interés en PLC, por que con estos se determinan la capacidad del canal. El ingeniero *Claude Elwood Shannon*¹, demostró que se puede transmitir con una probabilidad de error tan baja como se quiera y a una velocidad binaria tan alta como se quiera, siempre y cuando la velocidad de los datos esté por debajo de la capacidad del canal [Paz \(2008\)](#).

Al igual que en cualquier entorno de comunicación, la atenuación, múltiples derivaciones y el ruido son los tres factores de distorsión, que desempeñan un papel importante en el rendimiento de los sistemas de comunicación a través de líneas eléctricas.

¹ Claude Shannon, (Michigan, 30 de abril de 1916 - 24 de febrero de 2001) fue un ingeniero electrónico y matemático estadounidense, recordado como «el padre de la teoría de la información» (desarrolló la entropía de la información).

3.5.1. Ruido

Ruido, es generado por todos los aparatos eléctricos conectados a la red y por el acoplamiento de las emisoras de radio que transmiten sus señales en el mismo rango de frecuencia de emisión de PLC. Cuanto más alto sea el nivel de ruido, más difícil es de detectar la señal recibida. Se expresa como relación del nivel de la señal a ruido (SNR). SNR es una medida para cuantificar la cantidad de la señal ha sido corrompida por ruido y calculado como:

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left[\frac{P_{señal}}{P_{ruido}} \right] \quad (3-2)$$

Sin embargo, cuando la señal y el ruido se miden en voltios o amperios, deben elevarse al cuadrado como se muestra a continuación:

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left[\left(\frac{A_{señal}}{A_{ruido}} \right)^2 \right] = 20 * \log_{10} \left(\frac{A_{señal}}{A_{ruido}} \right) \quad (3-3)$$

En sistemas de comunicación convencionales, el ruido normalmente se modela como Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN²).

Un análisis del ruido en el tiempo permite determinar entre otros los siguientes parámetros característicos de una señal:

- Valor pico
- Duración
- Tiempo de llegada
- Número de pulsos
- Factor de atenuación
- Tiempo entre llegada de las señales

Un análisis en el dominio del tiempo se observa en la figura **3-5**

Por otro lado, en el dominio de la frecuencia se pueden determinar entre otros los siguientes aspectos:

- Densidad espectral de potencia
- Frecuencia principal o fundamental

El ruido en sistemas PLC se puede clasificar en tres categorías principales que son ruido de fondo de color, ruido de banda angosta, y el ruido impulsivo.

²Additive white Gaussian noise (AWGN), es un modelo de ruido básico utilizado en teoría de la información para imitar el efecto de muchos procesos aleatorios que ocurren en la naturaleza.

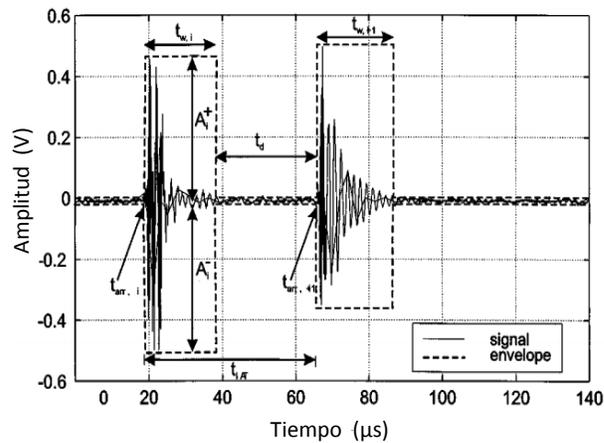


Figura 3-5: Parámetros característicos de una señal en el dominio del tiempo Zimmermann y Dostert (2002)

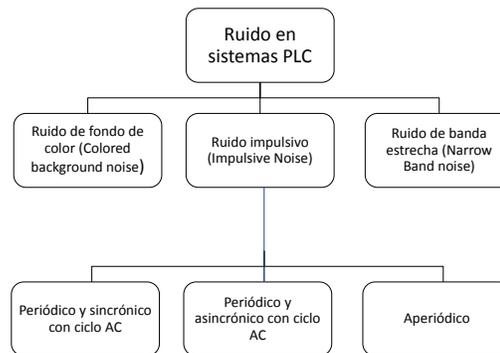


Figura 3-6: Tipos de Ruido observado en Sistemas PLC

A continuación la explicación de cada uno de los tipos de ruido y su origen Guzelgoz y otros (2010):

- *Ruido de fondo de color*. Es la suma de diferentes fuentes de ruido de baja potencia presente en la red y por lo general se caracteriza con una densidad espectral de potencia (PSD) que disminuye con la frecuencia. Este tipo de ruido presenta las siguientes características: una densidad de potencia espectral baja que disminuye con la frecuencia, origen debido a la superposición de diversas fuentes de ruido de baja intensidad, fuerte dependencia de la frecuencia y variación de sus parámetros en diversos momentos del día
- *Ruido de banda angosta*. Se deriva de la existencia de estaciones de radiodifusión de rangos de onda larga, media y corta. La mayoría de las veces tiene una forma sinusoidal, con

amplitudes moduladas. Este tipo de ruido ocupa varias sub-bandas, que son relativamente pequeñas y continúan a lo largo del espectro de frecuencias. Su amplitud generalmente varía a lo largo del día, empezando a ser considerado por la noche, cuando las propiedades de reflexión de la atmósfera son más fuertes

- *Ruido impulsivo*. Generado principalmente por los aparatos eléctricos, es el más importante entre los tipos de ruido antes mencionados. Se considera como la razón principal detrás de los errores en la transmisión de datos a través de los canales del PLC. El análisis del ruido impulsivo propone que se puede clasificar como: 1) periódico asincrónico a un ciclo de la red eléctrica alterna, generado principalmente por fuentes de alimentación conmutadas y presenta una forma de impulsos con una tasa de repetición entre 50 y 200 kHz. 2) periódico sincrónico con la frecuencia fundamental de la red eléctrica, generadas por los diodos rectificadores utilizados en algunos de los aparatos eléctricos, son impulsos con una frecuencia de 50 o 100 Hz y 3) asincrónico, causada por motores eléctricos, taladros, etc.

El ruido de fondo de color, el ruido de banda angosta y el ruido impulsivo periódico asincrónico, presentan un comportamiento estacionario por largos periodos de tiempo (segundos, minutos e incluso horas), por esta razón estos tres pueden ser agrupados en un solo tipo de ruido denominado “Ruido de fondo generalizado”. El ruido impulsivo periódico sincrónico y ruido impulsivo asincrónico se presentan en algunos milisegundos o microsegundos y pueden ser clasificados en un tipo de ruido denominado “Ruido impulsivo” y debido a su amplitud en un momento dado en el tiempo pueden ocasionar errores en un proceso de comunicación dentro del rango promedio utilizado en aplicaciones PLC. Un modelo general del ruido presente en PLC se puede observar en la figura 3-7

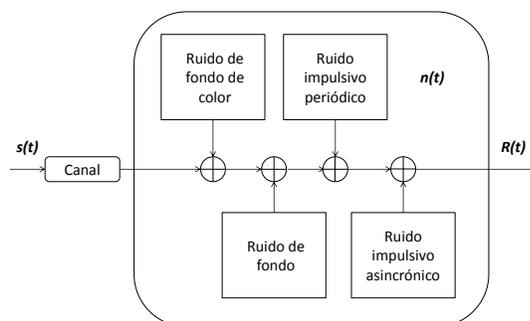


Figura 3-7: Representación de un modelo en un canal PLC

La expresión que describe el comportamiento del ruido de fondo generalizado se describe a continuación [Hrasnica y otros \(2004\)](#)

$$N_{CBN}(f) = N_0 + N_1 * e^{-\frac{f}{f_1}} [dB\mu V/Hz^{1/2}] \quad (3-4)$$

Donde N_0 corresponde a una constante de densidad de ruido, N_1 y f_1 son parámetros de la función exponencial.

Después investigaciones y practicas experimentales en redes residenciales e industriales, fue posible encontrar los valores aproximados de cada uno de los parámetros propuestos en el modelo anterior. Las expresiones para cada uno de los casos respectivamente son según [Carcele \(2006\)](#):

$$N_{CBN}(f) = -35 + 35 * e^{-\frac{f[MHz]}{3,6}} [dB\mu V/Hz^{1/2}] \quad (3-5)$$

$$N_{CBN}(f) = -33 + 40 * e^{-\frac{f[MHz]}{3,6}} [dB\mu V/Hz^{1/2}] \quad (3-6)$$

Entre los aspectos que se deben tener en cuenta para establecer las características estadísticas de los parámetros de ruido, se encuentran la distribución de probabilidad del ancho del pulso y el tiempo entre dos impulsos sucesivos. La expresión matemática para representar el ruido impulsivo es:

$$n_{imp}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i * p * \left[\frac{t - t_{a,i}}{t_{w,i}} \right] \quad (3-7)$$

Una aproximación del modelo anterior corresponde a un tren de pulsos con un ancho de pulso t_w , amplitud de pulso A , tiempo de llegada t_a y una función generalizada de pulso $p(t/t_w)$ por unidad de amplitud [Guillen y otros \(2008\)](#). El 90 % de los valores de amplitud se encuentran entre 100 y 200mV y menos del 1% alcanza un voltaje máximo de 2V. El tiempo t_w presenta valores inferiores a $500\mu s$ y el tiempo de separación entre pulsos es inferior a $200ms$ [Vesga \(2008\)](#).

3.5.2. Atenuación

Atenuación, es la pérdida de la potencia de la señal durante su propagación y depende en la longitud física del canal y la banda de frecuencia de transmisión. Se puede calcular mediante

$$Atenuación(dB) = 20 * \log \left[\frac{V_{Transmitido}}{V_{Recibido}} \right] \quad (3-8)$$

La atenuación teóricamente incrementa linealmente con respecto a la distancia y a la frecuencia. Hay muchas fuentes de atenuación y distorsión de las señales PLC en las líneas eléctricas. A continuación un resumen de los factores más comunes:

- *Impedancia de la carga conectada a la red eléctrica* - En la mayoría de los rangos de frecuencia, la impedancia de carga muestra un comportamiento inductivo o capacitivo, pero las cargas resistivas también puede causar valores de baja impedancia. La impedancia no solo varia con la frecuencia sino también con el tiempo, gracias a la conexión y desconexión permanente

- *Múltiples fases* - Las señales PLC que se transmiten normalmente entre una fase y neutro tienen que viajar de una fase a la otra a través del transformador de distribución o algunas cargas de fase a fase son generalmente muy atenuadas
- *Transformadores* - Los transformadores de distribución de energía causan alta atenuación de la señal cuando los dispositivos PLC se encuentran en lados primario y secundario, por ejemplo, en la comunicación entre los medidores de la línea de baja tensión y un concentrador conectado en el lado de media tensión
- *Perdidas por longitud de la línea*
- *Propagación multitrayecto*- La propagación de la señal en varias rutas y la reflexión de la señal debido a desajustes de impedancia en los puntos de ramificación puede generar distorsión de atenuación de señales PLC. Este fenómeno es menos observado a bajas frecuencias de comunicación (por debajo de 150 kHz), ya que la longitud de onda de la señal es bastante largo (más de 1 km).

Las mediciones llevadas a cabo en ambientes interiores y exteriores reportados en la literatura han demostrado que la atenuación de la señal puede variar desde 15dB a 60 dB o más. Si bien la atenuación depende de la topología de la red, la localización de emisores de PLC y cargas conectadas, también depende del tiempo y de la frecuencia. Además, se ha observado que la atenuación de la señal tiende a aumentar con la frecuencia [Anatory y otros \(2008\)](#).

3.6. Conclusiones

La topología de una red PLC, esta dada por la topología de la red eléctrica utilizada que para el caso de análisis de este trabajo fue la de Baja Tensión, por lo tanto el éxito de un sistema de transmisión de información a través de un ambiente complejo como la red eléctrica, exige el desarrollo y diseño de una capa física robusta que sea capaz de controlar los problemas de ruido, atenuación y poseer una modulación lo suficientemente avanzada para eliminar los problemas de multitrayecto, además de conseguir una alta eficiencia espectral de transmisión y requerir la menor potencia de transmisión posible y obtener una tasa de error de bit pequeña.

El comportamiento del cableado instalado es un aspecto que afecta el desarrollo de las redes PLC ya que fueron diseñados con el propósito de transporte de señales eléctricas y no para comunicaciones por lo cual se consideran como fuentes principales de distorsión, por lo tanto se requiere mecanismos de control de acceso al medio y técnicas de modulación que garanticen que las señales transmitidas puedan llegar a su destino de forma confiable.

Análisis de pruebas en la red eléctrica

Resumen

Este capítulo describe el proyecto Smart Metering de Codensa implementado en la ciudad de Bogotá, la arquitectura del sistema, características técnicas de los equipos y descripción de la comunicación utilizada. También se describe la metodología de análisis de la red eléctrica a través del proyecto piloto de medidores inteligentes, mediante la medición, análisis y procesamiento de los datos obtenidos, la simulación de la red y los resultados alcanzados. Además, este capítulo dará una visión general de los problemas potenciales relacionados con la lectura remota a través de la red eléctrica. Se muestran dos ejemplos de casos prácticos (casos de estudio) en los que se analiza la red como medio de comunicación.

4.1. Introducción

El proyecto "Smart Metering" de Codensa, tiene como objetivo emplear y evaluar los medidores inteligentes, así como mostrarle a los clientes y al regulador los beneficios de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) en cuanto a la eficiencia energética, la calidad del suministro de energía eléctrica, el control de pérdidas, la gestión remota de los medidores (lectura, suspensión, reconexión, balances de energía y reporte de eventos) y la capacidad de intercambio de información técnica. En diciembre del 2013 finalizó el proceso de nacionalización de los equipos y se realizó la instalación de 46 medidores inteligentes y un concentrador, además se realizó la instalación y configuración del sistema de gestión remota de los medidores y se brindó el entrenamiento a personal de la Compañía sobre procedimientos técnicos y procesos comerciales a través del SMM Web.

Gracias a la colaboración de Codensa y bajo el proyecto Smart Metering se realizaron las pruebas de campo en el centro de entrenamiento de Codensa y en uno de los circuitos piloto del proyecto Smart Metering. Las mediciones fueron realizadas con el apoyo de personal de Codensa y con el apoyo del Grupo de Investigación PAAS-UN (Programa de Análisis y Adquisición de Señales) de la Universidad Nacional de Colombia. Para las mediciones fue utilizado el equipo DEWE 3020, equipo portable multifunción que consta de 8 canales independientes aislados cada uno con ancho de banda de 2 MHz, 4 para tensión con aislamiento de 1000 V y 4 canales para instalación de sensores de corriente, además de un analizador de redes para el análisis de la red en diferentes periodos de tiempo.

Antes de describir los casos de estudio y la implementación de la tecnología PLC por Codensa para medición inteligente, es necesario conocer como se clasifican por niveles los sistemas de Transmisión Regional y/o Distribución Local en función de la tensión nominal de operación definidos por la CREG ¹:

- Nivel 4: Sistemas con tensión mayor o igual a 57.5 kV y menor a 220 kV
- Nivel 3: Sistemas con tensión mayor o igual a 30 kV y menor a 57.5 kV
- Nivel 2: Sistemas con tensión mayor o igual a 1 kV y menor a 30 kV
- Nivel 1: Sistemas con tensión menor a 1 kV

Las redes de media y baja tensión pueden considerarse conjuntamente, ya que las soluciones PLC adoptadas abarcan ambas redes. La red de baja tensión constituye lo que en el dominio de las comunicaciones se llama “última milla”, que se extiende desde el transformador hasta lo medidores tal como se muestra en la figura 4-1

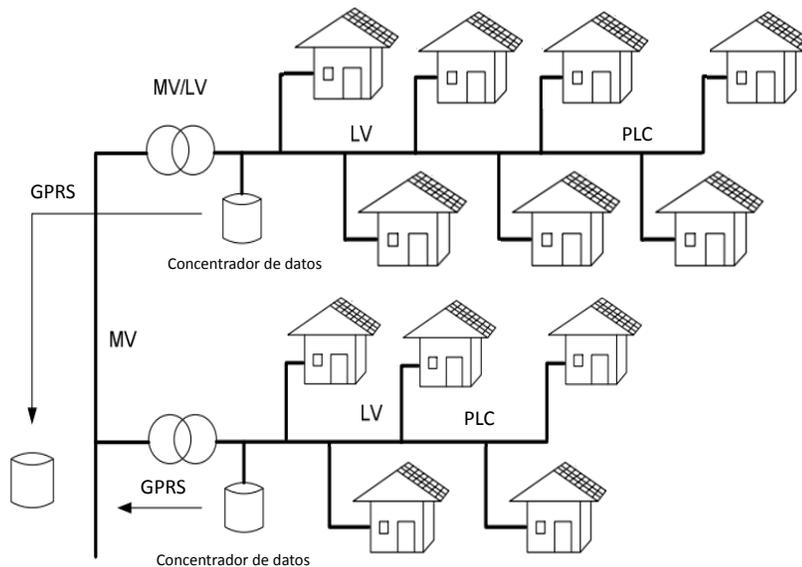


Figura 4-1: Topología red eléctrica

En Colombia, se tiene un sistema con cargas típicas conectadas entre la fase y neutro (120V), con frecuencia de operación de 60 Hz. Por lo general, se conectan de 5 a 40 clientes a cada transformador de distribución en áreas urbanas.

¹Comisión de Regulación de Energía y Gas, regula la prestación de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica, gas combustible y servicios públicos de combustibles líquidos, de manera técnica, independiente y transparente

4.2. Medición

Para el análisis de la red eléctrica, se realizaron varias mediciones de las señales PLC y ruido. Las medidas fueron realizadas en dos diferentes lugares, momentos y frecuencias. Además, se agruparon de acuerdo a tipo de instalación (aérea o subterránea), tipo de clientes (comercial, industrial, residencial), etc. Las principales razones de esta agrupación son los diferentes tipos de líneas de distribución utilizados, los diferentes tipos de equipos conectados, y los diferentes tiempos de uso.

En cuanto al análisis del tiempo, los datos se registraron en intervalos regulares. Tres tipos de intervalos fueron considerados: corto plazo, mediano plazo y largo plazo. Los intervalos de corto plazo fueron mediciones con intervalos de algunos segundos (entre 10 y 60). Un ejemplo de la necesidad de realizar mediciones con un corto intervalo de tiempo es el medir el ruido generado por un ascensor, el funcionamiento de fuentes conmutadas, etc. Las mediciones con intervalos de mediano plazo fueron de algunos minutos (1-20 minutos). Las mediciones de largo plazo se realizaron durante algunas semanas para determinar algunos datos de variación de cargas de acuerdo con temporadas del año, cargabilidad y realizar un estudio de calidad de energía. Durante las mediciones realizadas en la época de diciembre se pudieron medir las variaciones de carga debido a la conexión de alumbrado navideño en el circuito de estudio.

Es posible enumerar escenarios para los comportamientos de ruido medidos en el circuito descritos a continuación:

- Ruido con picos en puntos específicos de la red. Este tipo de ruido esta asociado a clientes con cargas específicas que ocasionan perturbaciones en la red de comunicación. Este tipo de problemas son solucionables mediante el uso de filtros o la configuración de los equipos en otras frecuencias donde los niveles de ruido no interfieren
- Ruido con picos en frecuencias específicas. Esto comportamiento de ruido significa que hay fuentes localizadas que se pueden solucionar como en el caso anterior a través de filtros o mediante la eliminación de las mismas fuentes
- Ruido constante en toda la red: el problema es generalizado y la situación debe ser analizada en detalle con el fin de averiguar su origen en frecuencias específicas

4.2.1. Arquitectura del sistema

“Smart Metering” es un sistema compuesto por diferentes equipos electrónicos. Generalmente la arquitectura del sistema METERS AND MORE,² esta compuesto por lo siguientes equipos:

- Concentrador de datos, conectado en cada transformador de distribución para recolectar la información registrada en cada uno de los medidores. ApSystems M3C-CB10, es el con-

²METERS AND MORE, es una asociación sin animo de lucro creada por Enel Distribuzione SpA y Endesa Distribución SA. La Asociación opera y promueve los nuevos protocolos de comunicación de los medidores: desde su constitución, más de 40 nuevas empresas se han unido a la Asociación

centrador de comunicaciones de datos que permite el intercambio de datos M2M sobre diferentes redes tales como la red pública inalámbrica y comunicación a través de la línea eléctrica mediante PLC [Apsystems \(2014\)](#)

- Medidor inteligente, registra el consumo de energía eléctrica en intervalos definidos por el usuario y comunica esa información a través de algún tipo de tecnología de comunicación (PLC, GPRS, 3G, etc). El Medidor utilizado en el despliegue del proyecto es E34A de Landys + Gyr integrado con la tarjeta de comunicación desarrollada por ENEL [Landys+Gyr \(2014\)](#)
- Centro de Control, para gestionar el sistema, mediante la recopilación y el envío de datos desde y hacia los concentradores, gestiona la adquisición de datos de medición y el operaciones contractuales.

Los datos se transmiten desde los medidores al concentrador a través de la red de baja tensión y la comunicación entre el concentrador y el sistema central se hace a través de una red GSM pública tal como se muestra en la figura 4-2.

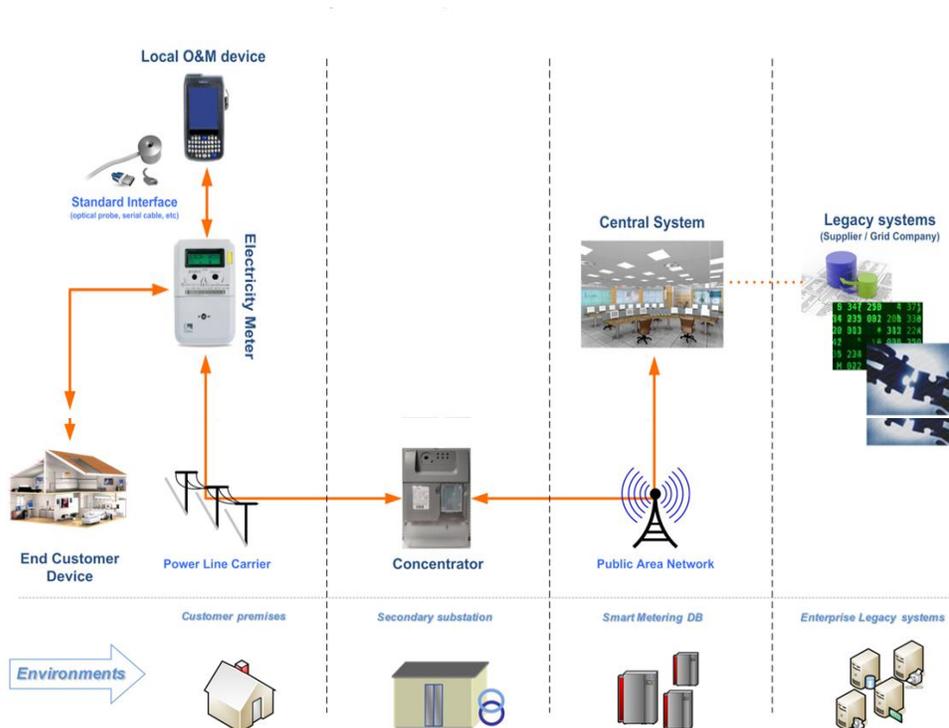


Figura 4-2: Componentes e interface del sistema AMI [Meters y More \(2014\)](#)

Los principales criterios que han llevado al desarrollo de METERS AND MORE son la eficiencia, robustez y seguridad de las comunicaciones, que son asegurados por las siguientes características:

- Intercambios de mensajes muy cortos, optimizados para líneas de alta tensión de banda estrecha y de comunicaciones inalámbricas
- Uso de una modulación B-PSK que permite la comunicación para llegar a una tasa de bits codificada de 4.800 bps
- Optimización de rutas de comunicación
- Apoyo a un alto nivel de cifrado y autenticación
- Configuración de red y gestión automática
- Retransmisión

Las especificaciones de protocolo llamado SMITP ³ (Smart Metering Information and Telecommunication Protocol), están definidas en CLC/prTS 50568-4 y CLC/prTS 50568-4. CLC / prTS 50568-4 especifica las capas físicas B-PSK y de enlace de datos para las comunicaciones en red de Baja Tensión entre un nodo principal (el concentrador de datos) y uno o más nodos esclavos (medidores inteligentes). CLC / prTS 50568-8 especifica los perfiles de comunicación:

- SMITP sobre el perfil B-PSK. Se refiere a las especificaciones de un sistema de medición inteligente definido antes de la disponibilidad de la DLMS/COSEM sobre el perfil SMITP B-PSK
- SMITP sobre el perfil IP, la comunicación en una red pública entre el Sistema Central y el concentrador
- SMITP sobre el perfil IEC 62056-21.

Dentro de los trabajos preliminares para el proceso de normalización de CENELEC, el protocolo METERS AND MORE evoluciono con el fin de incluir un perfil COSEM/DLMS sobre la modulación SMITP B-PSK, además (y como una alternativa posible) para el perfil original SMITP.

4.2.2. Características Técnicas de los equipos

En Estados Unidos, la banda de frecuencia de 0 a 500 kHz se utiliza para las comunicaciones por línea eléctrica (120V/60Hz) y en Europa la norma CENELEC sólo permite utilizar frecuencias entre 3 kHz y 148,5 kHz para la red pública de energía eléctrica y para fines de domótica en hogares y en edificios públicos. Algunas de las especificaciones definidas en el estándar **EN-50065-1 (1991)** son los niveles de tensión máximos de la señal correspondientes a 134 dB μ V (equivalente a 5 V - 0dB) especificado en 9 kHz, y de 120 dB μ V (equivalente a 1V) especificado en 95 kHz. Otro parámetro importante que fija la norma, es el nivel de potencia máxima de transmisión, el cual no debe exceder de 500 mW.

³Protocolo para la transferencia simple de correo electrónico, es un protocolo de red utilizado para el intercambio de mensajes de correo electrónico entre computadoras u otros dispositivos (PDA, teléfonos móviles, etc.)

La siguiente lista resume las principales características técnicas de los medidores inteligentes instalados por CODENSA:

- Medidor polifásico electrónico de aplicación en consumidores residenciales y comerciales.
- Autodiagnóstico sobre los componentes y funciones principales
- Medición de energía y potencia activa de acuerdo con CEI EN 62053-21 Clase 1
- Medición de energía y potencia reactiva de acuerdo con CEI EN 62053-23 Clase 2
- Tecnología de medición tipo DFS (Direct Field Sensor), que dispone excelente características de medición, incluyendo curva de carga plana, alta estabilidad y buena protección contra interferencia
- Interruptor de circuito con umbral de potencia, programable electrónicamente entre 0,1 kW y, o bien 10 kW (monofásico) o 30 kW (multi-fase).
- Interface de comunicación (RS232, RS485, PLC ó RF)
- La tecnología Gridstream PLC TS1 y Gridstream PLC TS2, es utilizada en los medidores comerciales de Landys + Gyr. Para los proyectos del grupo ENEL se utiliza un desarrollo propio de Endesa desarrollado mediante el proyecto Cervantes.

La tarjeta de comunicación instaladas en los equipos (concentrador y medidor) tiene las siguientes características:

- Modulación B-PSK o modulación por desplazamiento de fase o PSK (Phase Shift Keying) es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos. El esquema de modulación BPSK es una tecnología abierta
- Banda de frecuencia de envío de señales: 86 kHz (≥ 5 kHz)
- El concentrador puede manejar hasta 2048 medidores en una red de Baja Tensión

4.2.3. Caracterización de Comunicación en redes de Baja Tensión

La configuración de la capa física en la red de BT se considera como una conexión multi-punto de nodos. Por lo tanto, se requieren normas de acceso para evitar colisiones. Además, se tiene que tener en cuenta que la red de Baja Tensión no puede ser tratada como un medio de difusión normal por los fenómenos de ondas estacionarias y sobre todo atenuación de la señal pueden hacer que la comunicación directa entre el par de nodos sea imposible.

A fin de obtener una comunicación prácticamente directa, entre cualquier par de nodos, las funcionalidades de protocolo debe prever la técnica de repetición. La Figura 4-3 muestra el esquema de referencia de una porción de la línea de baja tensión, que se identifica como sección de comunicación. Una red de baja tensión controlada por un concentrador está compuesto por un conjunto de ramales conectados entre si **OPEN-Meter** (2011b).

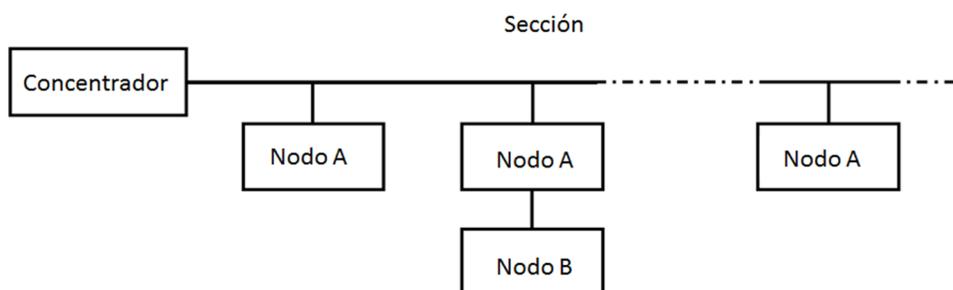


Figura 4-3: Sección de Comunicación en una línea en BT

4.2.3.1. Capa de aplicación y Nivel de enlace

Proporciona el conjunto de mensajes intercambiados entre los nodos presentes en la red de baja tensión. Se prevén tres tipos de nodos:

- Concentrador
- Nodo A: es una unidad periférica que puede comunicar con el concentrador (en este caso actúa como esclavo) o con un Nodo B-asociado (en este caso actúa como maestro). Los nodos A son típicamente los medidores.
- Nodo B: es una unidad periférica que puede comunicarse con el concentrador o con un asociada Nodo A; siempre actúa como esclavo. Por lo general son los dispositivos de los clientes finales.

La capa de aplicación proporciona los servicios para la gestión de los medidores y dispositivos de los clientes finales: parámetros de actividad de programación, intercambio de datos, recibos de solicitud o acciones, ejecución remota de comandos, cifrado, autenticación y servicios para gestión de la red.

El nivel de enlace se compone de 2 sub-capas: el control de acceso (MAC) y la lógica Enlace de Control (LLC). La subcapa MAC controla el acceso al medio físico y ofrece direccionamiento. Proporciona repetición y funcionalidades de interfaz física. La subcapa LLC, conectada con la capa de aplicaciones en la parte superior y la subcapa MAC en el lado inferior; es responsable de la ejecución de los procedimientos de cambio de extremo a extremo para garantizar un procedimiento de acceso correcto que evite cualquier posible colisión en la red [OPEN-Meter \(2011a\)](#).

4.2.3.2. Procesos de aplicación

El concentrador inicia el procedimiento de envío del mensaje de difusión de la red con un mensaje ADDRESS.REQ (090). Los medidores que reciben un mensaje 090, responden con un mensaje de ADDRESS.RESP (091), enviando sus direcciones al Concentrador. Si el concentrador utiliza cualquier filtro para seleccionar el porcentaje de respuesta a ser recibido (con el fin de

disminuir el número de medidores que responden simultáneamente y la probabilidad de colisiones), se puede iterar este paso con el fin de cubrir el 100 % de los medidores alcanzados directamente (sin utilizar repetidores).

Las colisiones de los mensajes de respuesta se gestionan indirectamente; el concentrador intentará llegar a los medidores de nuevo en la próxima ronda de ADDRESS.Req (090) o REQADDR.REQ (094). Dentro de ADDRESS.RESP (090) se tiene la información de carga útil y calidad de comunicación (nivel de señal, SNR) por lo que se puede utilizar para descartar baja calidad y evitar el silenciamiento de esos nodos. Al final de la primera etapa, el concentrador conoce las direcciones de todos los contadores instalados que puede alcanzar sin utilizar repetidores [OPEN-Meter \(2011a\)](#).

4.2.3.3. Modulación

El esquema de modulación BPSK se utiliza para la transmisión de datos de medidores de energía a través de líneas de la red eléctrica. En esta técnica de propagación, la señal ocupa un ancho de banda mínimo necesario para el envío de información.

Resultado de la simulación se tiene que la ganancia de procesamiento (PG) debe ser 45 dB o superior y la señal del receptor a ruido (SNR) de 28 dB, la sensibilidad del receptor 110dB y la potencia de la señal transmitida de 10 mW con un ancho de banda de canal de 5 kHz, que es la mitad de la velocidad de datos. La potencia de transmisión de las portadoras que pueden utilizarse esta limitada por ley a -50dBm/Hz.

La capa física proporciona la interfaz entre el equipo y el medio de transmisión físico. Transporta información binaria desde el origen al destino. En la transmisión se lleva a cabo la codificación y la encapsulación de la carga útil en una trama física y la modulación de fase en (B-PSK) a 4.800 bps. En la recepción se realiza la demodulación de la trama, la decodificación de la información útil, además de estimación de SNR.

En el sistema "Smart Metering", el Concentrador inicia la comunicación con los medidores que han sido detectados por el mecanismo de descubrimiento. El concentrador está conectado a las tres fases que son gestionadas de forma independiente para las comunicaciones y desde que se conoce la fase del medidor, se establece comunicaciones para cada medidor con esta fase específica.

Debido a que la red se gestiona siguiendo una política esclavo maestro, el Concentrador (que es el maestro de la red) mantiene el control de todo el procedimiento. Cada concentrador gestiona sólo los medidores que están presentes en su tabla de direcciones, establecidos durante el procedimiento de descubrimiento, y no otros, por lo que nunca va a tratar de llegar a un medidor que está fuera de su dominio. De esta manera la diafonía (que siempre es posible en una red de líneas de alimentación) no introduce ningún problema de interferencia entre un concentrador y un medidor vinculado por otro [OPEN-Meter \(2011a\)](#).

4.2.3.4. Evaluación y gestión del rendimiento y Sincronización del tiempo en los medidores

El rendimiento de comunicación relacionada con un medidor se evalúa mediante un concentrador, por ejemplo contar el porcentaje de respuestas del medidor a las peticiones del Concentrador. Si el porcentaje de respuestas se encuentra bajo un umbral determinado, depende del Concentrador encontrar un mejor camino para llegar a él.

Para el correcto funcionamiento del sistema, todos los contadores registrados deben estar sincronizados con una referencia temporal externa que proviene del Sistema Central. Los concentradores almacenan esta referencia para su propia sincronización y que deben ser enviados periódicamente a los medidores [OPEN-Meter \(2011a\)](#).

4.2.4. Características de las mediciones

En primer lugar se midió las señales presentes en cada uno de los circuitos de prueba para identificar las bandas de emisión y amplitud de las señales PLC y el nivel de ruido, luego en algunos puntos estratégicos del sistema (puntos alejados del concentrador), para comprobar la señal medida en cada medidor y comprobar el nivel del receptor (dB/Hz), además de analizar los cambios en las características de la red en la ruta desde el concentrador a los medidores de acuerdo con el esquema de medición presentado en la figura 4-4, configurando el equipo DEWETRON 3020 con una resolución de 64 k y analizando el espectro (FFT) en las bandas comprendidas entre 60 kHz y 120 kHz tomando muestras de forma continua.

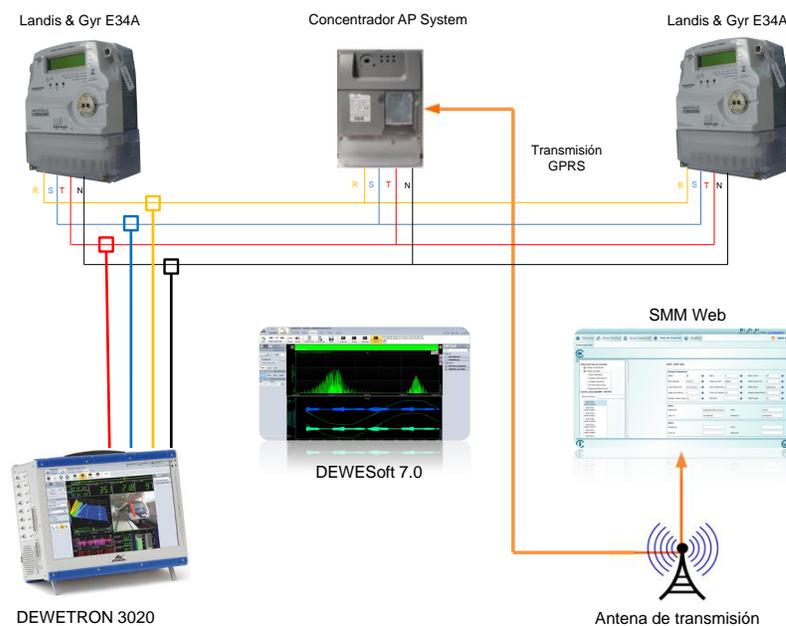


Figura 4-4: Esquema general de medida

El software DEWESoft convierte el DEWETRON en un potente sistema de adquisición de

datos e importantes características para acortar el tiempo de configuración de medición, gestión de datos y análisis, para permitir el aumento de la prueba y la eficiencia de medición. Su nueva estructura permite visualizar, navegar y hacer zoom en grandes archivos de datos sin retrasos.

Una de las muchas ventajas del software DEWESoft es la posibilidad de configurar que las señales adquiridas tengan un tratamiento matemático. En este caso, se utilizó un filtro tipo Butterworth⁴ pasa banda de orden 4 con frecuencias de corte de 50 y 100 kHz tal como se muestra en la figura 4-5, para visualizar las bandas donde existe transmisión de las señales PLC.

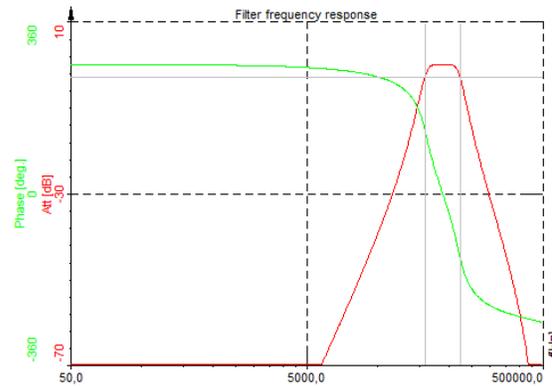


Figura 4-5: Filtro Butterworth pasa banda

Mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT⁵) se identificaron las bandas y amplitudes de las señales presentes en cada uno de los casos de estudio.

La detección de bandas de emisión se llevó a cabo sobre la base de la resolución del sistema de medición. Se asumió como banda de emisión un grupo de componentes espectrales cercanos que tienen una magnitud no despreciable y un criterio por ende es el bajo nivel de la señal. Sin embargo, un gran número de componentes de emisión aisladas de cualquier banda aparecieron, por lo que los próximos criterios fue "grupos", es decir, definir el límite de frecuencia por debajo del cual un componente se puede asociar a una banda de emisión. Este método se comparó con el método espectrograma (dominio de frecuencia-tiempo), y en la gran mayoría de los casos las bandas detectadas se encuentran dentro de bandas de emisión del espectrograma, como se puede ver en la tabla 4-4. Las bandas de emisión fueron identificados en cada dispositivo probado. Después de eso, se encontraron bandas de emisión común de mismos dispositivos de tecnología, significa bandas de emisión común entre dispositivos CFL, dispositivos LED, etc. Finalmente, se obtuvieron bandas de emisión común, que significa bandas en común entre todos los dispositivos.

⁴Filtro de Butterworth diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte, es decir, la salida se mantiene constante casi hasta la frecuencia de corte, luego disminuye a razón de 20n dB por década.

⁵La FFT, es una herramienta fundamental en el procesamiento digital de señales. La FFT no es una nueva transformada sino que se trata de un algoritmo para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Su importancia radica en el hecho que elimina una gran parte de los cálculos repetitivos a que está sometida la DFT, por lo tanto se logra un cálculo más rápido

4.2.5. Estudios de Caso

4.2.5.1. Caso 1. Centro De Entrenamiento Bossanova (Codensa)

El Centro de Entrenamiento Bossanova, capacita empleados de Codensa y trabajadores de empresas contratistas, cuenta con espacios para actividades tanto teóricas como prácticas bajo un ambiente controlado y supervisado. Se recrean cada uno de los escenarios para realizar maniobras en todos los niveles de tensión y tiene siete zonas de práctica exterior en cajas de maniobras, estructuras de redes aéreas, subestación de frente vivo o local, cámaras de inspección, etc. Además cuenta con cuatro zonas de práctica interior como celdas para subestaciones encapsuladas, módulo de reconectores, tableros de medidores y equipos utilizados en los pilotos de Smart Metering. En este espacio de formación los operarios pueden realizar jornadas técnico-operativas y de conocimiento del negocio, mediante la recreación de escenarios y elementos de situaciones reales, para que practiquen antes de realizar en terreno las maniobras de media y baja tensión y las pruebas de verificación y funcionalidad de los equipos instalados en campo. El centro de entrenamiento esta ubicado en la Carrera 71 C No. 57B - 03 Sur, en él fueron realizadas las primeras mediciones.

Mediante las mediciones realizadas en el centro de entrenamiento se identificaron con exactitud la banda de frecuencia donde se realiza la transmisión de datos desde el concentrador al medidor y viceversa y se realizaron mediciones de ruido, además de identificar la forma de conexión de los equipos, la configuración de la red y un acercamiento con el web server (SMM WEB - Smart Metering Management ENEL) con el que se realizan las labores administrativas del sistema, operaciones de lectura de medidores, información de interrupciones de clientes, etc.

El Centro De Entrenamiento dispone de una red de baja tensión con un concentrador y dos medidores Landis + Gyr iguales a los instalados en el circuito piloto de baja tensión con sistemas de blindobarras que conectan el concentrador con los medidores tal como se muestra en la figura [4-4](#)

4.2.5.2. Caso 2. Circuito de Baja Tensión Codensa

Las mediciones fueron realizadas en un circuito urbano ubicado en la ciudad de Bogotá de la empresa Codensa. Dicho piloto cuenta con un Concentrador ubicado cerca al transformador MT/BT que distribuye la energía a 44 usuarios distribuidos de acuerdo con la figura [4-6](#). Esta zona esta caracterizada por la presencia de usuarios comerciales (restaurantes, tiendas, etc.), una universidad, un edificio escolar y algunos parqueaderos públicos.

Durante la puesta en marcha del circuito piloto y las operaciones de lectura/escritura se detectaron problemas de acceso remoto y comunicación en algunos medidores, motivación para la realización de este estudio de caso y la verificación de viabilidad de la tecnología para medición inteligente en este tipo de redes.

El circuito de Baja Tensión esta compuesto por una red radial que cumple con las normas de construcción de Codensa, la longitud de la línea mas larga desde el concentrador hasta el usuario mas lejano es alrededor de 210 mts.



Figura 4-6: Mapa de ubicación circuito implementación piloto Yahoo (2014)

Los conductores utilizados en el circuito de Baja Tensión aérea es calibre menor o igual a 4/0 AWG (95 mm²) cobre o aluminio desnudo. La distancia entre conductores se encuentra especificada en las normas Codensa de Construcción de Redes Aéreas y Subterráneas. Las propiedades del cable 4/0 AWG de cobre son: diámetro 13,3 mm, resistencia ‘por unidad de longitud 0,1703 Ω/Km . El circuito también cuenta con un tramo subterráneo que va desde el concentrador hasta el primer poste. El cable utilizado para este tramo es 250 mcm de Aluminio. El circuito esta compuesto de 16 postes según norma LA 302 (Red abierta existente - circuito secundarios sencillo), con una altura aproximada de 10 mts y con 5 conductores (3 Fases, 1 Neutro y 1 alumbrado publico).

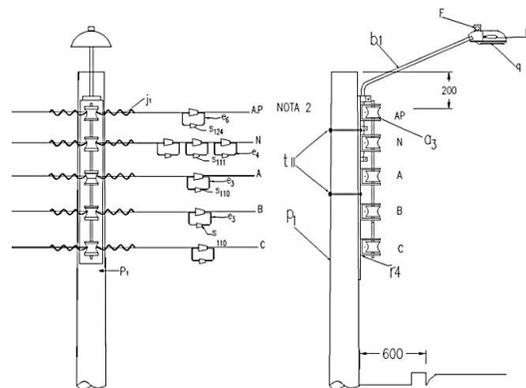


Figura 4-7: LA 302 Red abierta existente - circuito secundarios sencillo Codensa (2014)

Se entiende por acometida, la parte de la instalación eléctrica que se construye desde las redes de distribución, hasta las instalaciones del usuario, y está conformada por los siguientes componentes: punto de alimentación, conductores, ductos, tablero general de acometidas, interruptor general, armario de medidores o caja para equipo de medición, los cuales se muestran en la Norma AE 200. El conductor utilizado para las acometidas de los usuarios es en conductores aislados XLPE de aluminio para las fases y 1/0 AWG (50 mm²) AAAC para el neutro [Codensa \(2014\)](#).

4.2.6. Medición y resultados

4.2.6.1. Impedancia

Hasta la fecha, se han realizado investigaciones importantes sobre medición de impedancia en sistemas de comunicación a través de la línea de potencia. Los experimentos anteriores se pueden resumir de la siguiente manera: [Malack y Engstrom \(1976\)](#) realizaron mediciones en sistemas comerciales de distribución de energía a 50Hz AC en seis países europeos y de Estados Unidos. Estas mediciones muestran que la impedancia de las líneas de energía residenciales aumenta con la frecuencia y están en el intervalo de aproximadamente 1,5 a 80 ohmios a 100 kHz. [Vines y otros \(1985\)](#), presentan las mediciones y análisis de la impedancia de los circuitos de distribución de energía residenciales en las frecuencias de 5 a 20 kHz con valores de 1-12 ohmios. [Cavdar \(2004\)](#) presentó algunos datos empíricos sobre las líneas en el hogar en Turquía. [Cavdar y Karadeniz \(2008\)](#), presentan el estudio y las mediciones de la impedancia de línea eléctrica en redes de distribución de energía. Las mediciones se llevaron a cabo durante 24 horas en un día, y se repitieron para los diferentes días en redes urbanas, rurales e industriales en Trabzon, Turquía. Todos los anteriores estudios son presentados en el libro de referencia de Dostert en donde además él presenta sugerencias y comentarios muy útiles para los investigadores en sistemas de comunicación a través de la línea de potencia. La impedancia esta compuesta por la combinación de las siguientes impedancias parciales :

- Impedancia de la parte secundaria del transformador
- Impedancia de la red de energía eléctrica, incluyendo todas las bifurcaciones
- Las cargas conectadas a la red eléctrica, y principalmente sus filtros EMC

El transformador de alimentación y la red eléctrica tienen un comportamiento en estado estacionario, mientras que las cargas conectadas a la red eléctrica varían en el tiempo. Un filtro EMC no hace distinción entre las señales de interferencia y las señales de comunicación. Por tanto, el aumento del número de filtros EMC es, por sí mismo, una amenaza para la comunicación en la red de energía, principalmente mediante la reducción del nivel de impedancia en el canal de comunicación que van desde 9 hasta 95 kHz. En el caso de señales de interferencia, el problema a veces se puede resolver utilizando software, pero la solución de atenuación de este modo es prácticamente imposible.

La impedancia de línea se mide entre el conductor de fase L y el neutro en sistemas monofásicos, mientras que en uno trifásico se mide la impedancia entre dos fases tal como se muestra en

la figura 4-8.

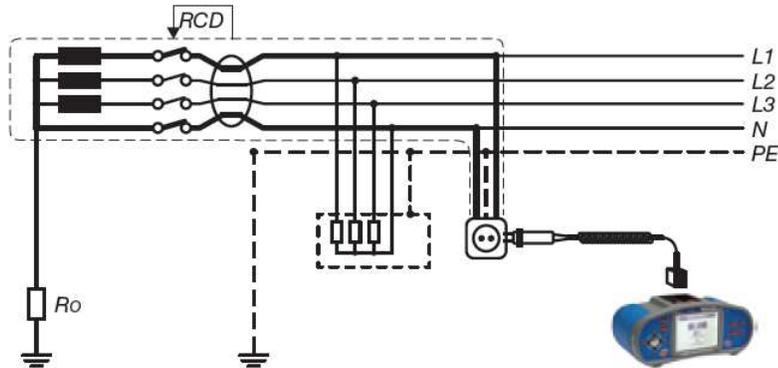


Figura 4-8: Medición de impedancia mediante Eurotest Metrel

Los resultados obtenidos de las mediciones de impedancia en la banda CENELEC para líneas eléctricas urbanas y rurales se muestran en las figuras 4-9 y 4-10 respectivamente. Las mediciones de impedancia se repiten con pasos de frecuencia de 10 kHz a partir de la 10 kHz hasta 170 kHz para cada hora en un día. Las mediciones se clasifican como valores mínimos, máximos y medios. La razón de esta clasificación es que la impedancia cambia con el tiempo en la misma frecuencia, como se menciona anteriormente debido al cambio de cargas en el circuito. Los valores medidos en líneas urbanas están entre 1 y 21 ohms y en líneas rurales entre 3 y 17 ohms y presentados en Cavdar y Karadeniz (2008).

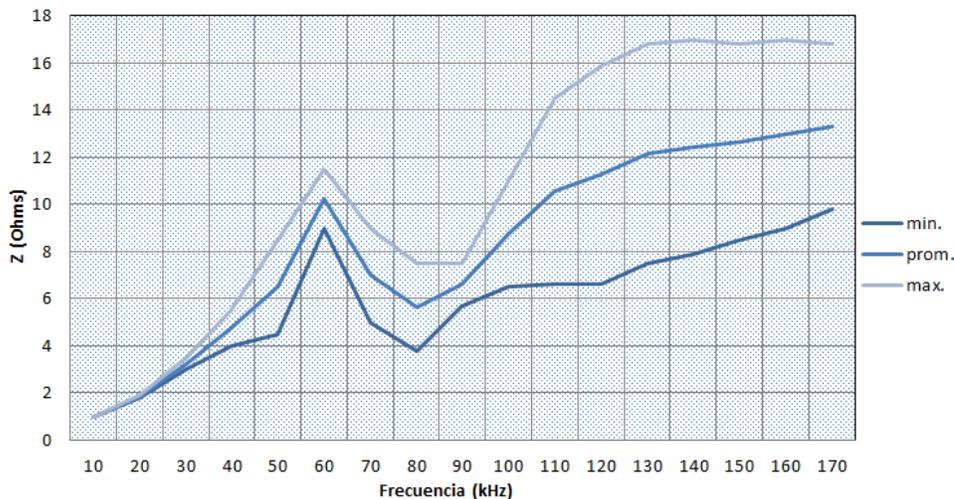


Figura 4-9: Impedancia vs frecuencia en la banda CENELEC - Circuito Urbano

El cambio del valor de impedancia en frecuencia efecto de algunos electrodomésticos como lampara fluorescente de 80 W, TV, plancha de 1300 W y una lavadora de 1200 W se ve en la figura 4-11.

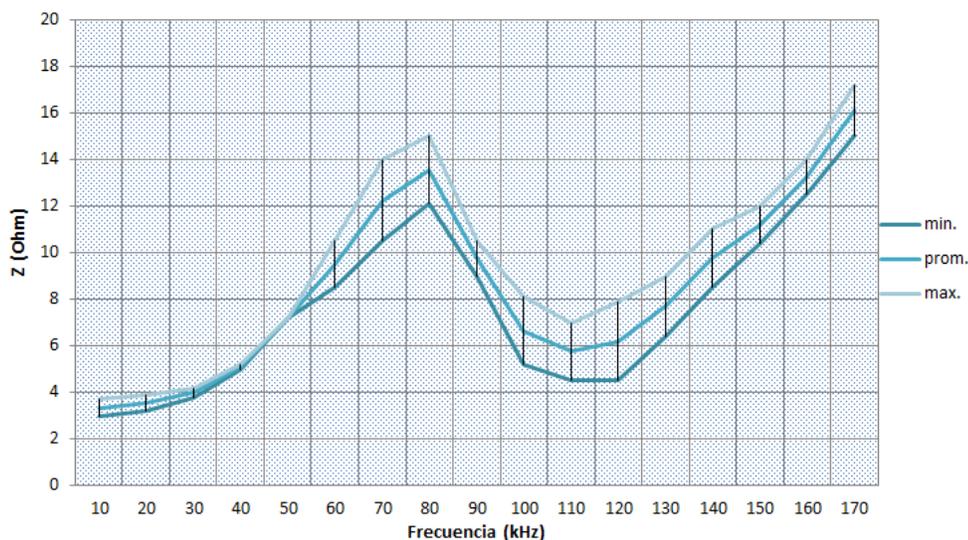


Figura 4-10: Impedancia vs frecuencia en la banda CENELEC - Circuito Rural

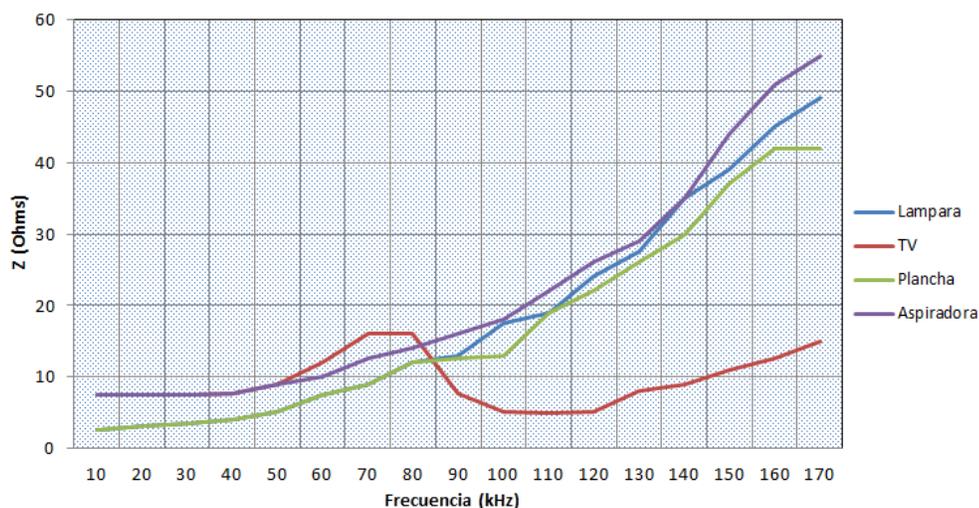


Figura 4-11: Efectos de algunos electrodomésticos en la impedancia

De acuerdo con lo anterior, la impedancia es dependiente de la frecuencia y esta determinada por las cargas conectadas a la red además de la impedancia del transformador de distribución y la impedancia de las líneas. Tiende a disminuir en las frecuencias más bajas, pero algunos máximos y mínimos se pueden mostrar en cualquier punto según lo mostrado anteriormente. La impedancia para este tipo de aplicaciones debe ser mayor a 5Ω . Los valores típicos hasta 100 kHz son de hasta 10Ω , y en la región HF (de 1 a 30 MHz) un mínimo de 10Ω con un valor típico de algunas decenas. Según mediciones realizadas por Codensa, en todas las áreas del piloto no se presentaron problemas de impedancia, la cual parece lo suficientemente alta como para que los dispositivos tengan una buena comunicación.

La variación del valor de impedancia en redes es uno de los problemas que afectan la comunicación en las redes PLC. Estas variaciones surgen cuando diferentes cargas eléctricas se conectan y/o desconectan a la red eléctrica en diferentes momentos. Para que la transmisión de señal sea eficiente, la impedancia de la fuente de señal y del canal deben ser iguales, por lo cual el conocimiento previo del valor de la impedancia en una red implica la posibilidad de transmisiones eficientes y con mayor alcance [Haykin \(2000\)](#).

4.2.6.2. Atenuación

La atenuación es y será probablemente el desafío más serio de la red de energía en el futuro, esta se define como una disminución de la amplitud de la señal, o la diferencia entre el nivel de señal en la salida y la entrada del canal de comunicaciones tal como se describió en el capítulo 3. La atenuación del canal de comunicación depende principalmente del nivel de impedancia. Se puede calcular mediante:

$$\text{Atenuación}(dB) = 20 * \log \left[\frac{V_{Salida}}{V_{Entrada}} \right] \quad (4-1)$$

Varios casos han sido identificados donde fue imposible la comunicación. Ciertos tipos de equipos de usuario final causan una gran atenuación de la señal de comunicación, de modo que no es posible comunicar.

Algunas cargas, tales como computadores, utilizan filtros EMC para cumplir con los requisitos establecidos por las normas de EMC. Estos filtros EMC, al conectarse en una red PLC causan resonancia. Si se produce resonancia en el filtro, bloqueará cualquier intento de envío de señales. La atenuación aumenta con la frecuencia, alcanzando niveles bastante altos en las frecuencias de interés.

El aumento de la longitud de la línea entre el transmisor y el receptor provoca cambios rápidos en las respuestas de fase. Según los estudios realizados por [Anatory y otros \(2008\)](#), los bits transmitidos no se desfasan ni se distorsionan; sin embargo según los resultados de atenuación en las pruebas y otras experiencias registradas se incrementa el desvanecimiento selectivo de frecuencia de la señal propagada; es decir se limita el ancho de banda disponible en el canal para la comunicación.

PLC también es afectado por el fenómeno multitraectoria como los canales de comunicación inalámbricos.

4.2.6.3. Ruido

El ruido se puede considerar como la suma de perturbaciones o energía no deseada de fuentes naturales y a veces de fuentes artificiales: por lo general se puede derivar a partir de los componentes electrónicos, el ruido térmico de las resistencias, las señales de interferencias externas, etc, tal como se describió en el capítulo 3.

De acuerdo con la experiencia de [Corinex \(2014\)](#) para la instalación de proyectos PLC, un valor típico de ruido de piso -110 dB y las pérdidas asociadas por longitud es de 4 dB por cada 30 metros. Mediante este análisis también se comprueba la posibilidad de incluir repetidores en puntos estratégicos para poder llegar con un nivel de señal mejor a los usuarios extremos. En Italia el valor de ruido es de aproximadamente 50 dbuV, y en general tiene que ser menor de 80 dbuV para fines de comunicación.

El valor de la medición de ruido en el circuito piloto del centro de entrenamiento Bossanova son presentadas en la tabla [4-1](#)).

Tabla 4-1: Valores de ruido medidos - Circuito Codensa

Número de medición	Ruido de piso (dB)
1	-39,678
2	-40,285
3	-40,349
4	-40,349
Promedio	-40,165

El valor de la medición de ruido del circuito piloto de Codensa son presentadas en la tabla [4-2](#)).

Tabla 4-2: Valores de ruido medidos - Circuito Codensa

Número de medición	Ruido de piso (dB)
1	-45.179
2	-45.469
3	-44.804
...	...
9	-47.647
10	-46.226
Promedio	-46.348

Teniendo en cuenta la medición de ruido del circuito piloto y utilizando algunos parámetros de diseño implementados por [Corinex \(2014\)](#) se tuvieron las siguientes consideraciones iniciales:

- Ruido de piso en PLC medido: -46.348 dB
- Pérdidas por longitud: 2dB por cada 30.48 mts

- Potencia del transmisor: -50dB/Hz

De acuerdo con los parámetros anteriores se realizó el análisis de SNR en puntos específicos de la red donde se tienen problemas de comunicación. Dichos puntos son los extremos de cada tramo del circuito. A continuación se mencionan las ecuaciones utilizadas para calcular el SNR en cada uno de los medidores del circuito:

- Pérdidas por bifurcaciones (dB) = $10 \cdot \log(N)$ donde (N) es el número de ramas
- Pérdidas por transmisión (dB) = (longitud (mts) * 2 dB perdidas por metro) / 30.48
- Pérdidas totales (dB) = Pérdidas por bifurcaciones - Pérdidas por transmisión
- Nivel del Receptor = Potencia señal del transmisor - Pérdidas totales
- SNR (dBm/Hz) = Nivel del Receptor - Ruido de piso

Los resultados obtenidos de pérdidas por bifurcaciones, pérdidas por transmisión, pérdidas totales y SNR en el receptor de cada uno de los medidores extremos se presenta en la tabla 4-3 (la tabla completa de mediciones de cada uno de los medidores es presentada como anexo de este trabajo).

Tabla 4-3: Resultados de mediciones en medidores con problemas de comunicación - Circuito piloto Codensa

Nodo A	Nodo B	L. (mts)	Pérdidas bifurcaciones (dB)	Pérdidas transmisión (dB)	Pérdidas totales (dB)	Nivel del receptor (dB,/Hz)	SNR
Conc.	17002	166,73	12,552	10,94	23,49	-34,19	13,16
Conc.	17013	239,91	9,542	15,74	25,285	-36,091	10,13
Conc.	17028	147,95	6,989	9,71	16,70	-46,196	-1,19
Conc.	17029	243,91	11,139	16,00	27,144	-37,25	9,095

De acuerdo con la información de la tabla 4-3, se puede evidenciar que el problema de comunicación en los medidores extremos se debe a que el SNR es menor al exigido para la comunicación. Este problema se debe a varios factores como ruido y atenuación que se analizaron durante este trabajo y se presentan en este capítulo.

4.2.6.3.1. Mediciones Centro de entrenamiento Bossanova. Los resultados de las mediciones realizadas en el centro de entrenamiento de Bossanova fueron caracterizados en 9 puntos de análisis de acuerdo con la figura 4-12. El registro presenta la medición mediante en momento que se reinicia el concentrador y se puede visualizar el comportamiento de comunicación con los diferentes medidores existentes.

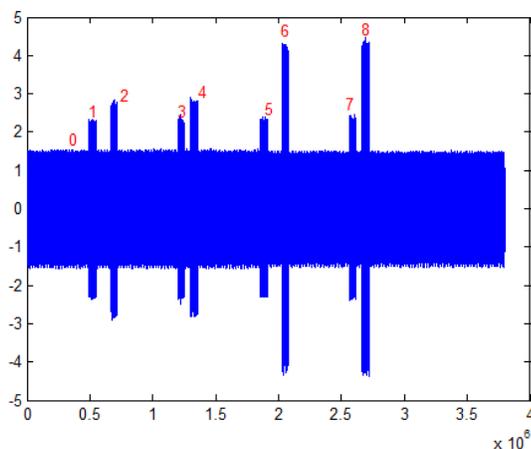


Figura 4-12: Medición inicial - Bossanova

El análisis de algunos de los puntos que representan las mediciones iniciales son presentados en la tabla 4-4, donde se muestra las bandas de frecuencia, la gráfica PSD (Power Spectral Density) y el espectrograma de una señal con emisión y sin emisión de señales PLC. Las mediciones pueden ser agrupadas de acuerdo con los dos estados expuestos en la tabla 4-4, sin presencia de señal PLC (para medir amplitud de señales presentes en la red) y con señales de comunicación para verificar amplitud de las señales enviadas y recibidas por el concentrador y los medidores.

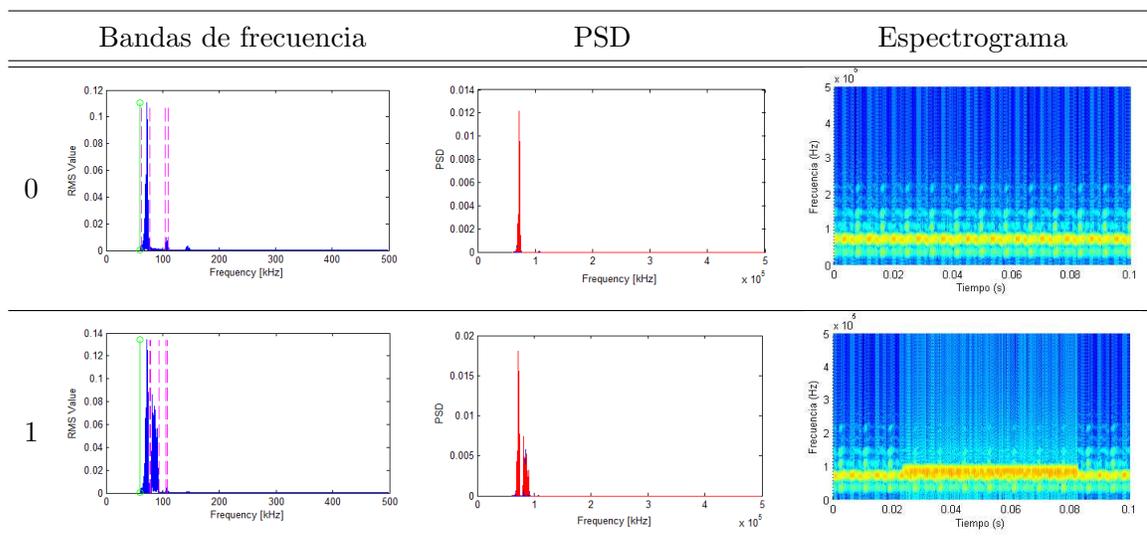


Tabla 4-4: Espectrograma señales - Centro de entrenamiento Bossanova

De acuerdo con la la tabla 4-4, en el espectrograma 0, cuando no se tiene envío de señales en la banda de emisión de las señales PLC (86 kHz (≥ 5 kHz)) se tiene señales con valores de -47,51 y -66,17 dB, respectivamente en cada uno de los extremos de las bandas y en la frecuencia central se tiene -54,68dB. Cuando se tiene envío de señales se tienen señales con valores de -37,16 y -40,77 dB respectivamente y un valor en la frecuencia central de -37,37 dB.

Mediante el software DEWESoft, se determinaron la señal filtrada en el tiempo (parte inferior) y la FFT de la señal medida (parte superior). De acuerdo con esta medición se puede comprobar los niveles de señal medidos en la banda de interés (86 kHz (\pm 5kHz)) para comprobar que no se existen señales con magnitudes comparables a las emitidas por los equipos PLC, esta es la razón por la cual el sistema fue configurado en esta banda de frecuencia.

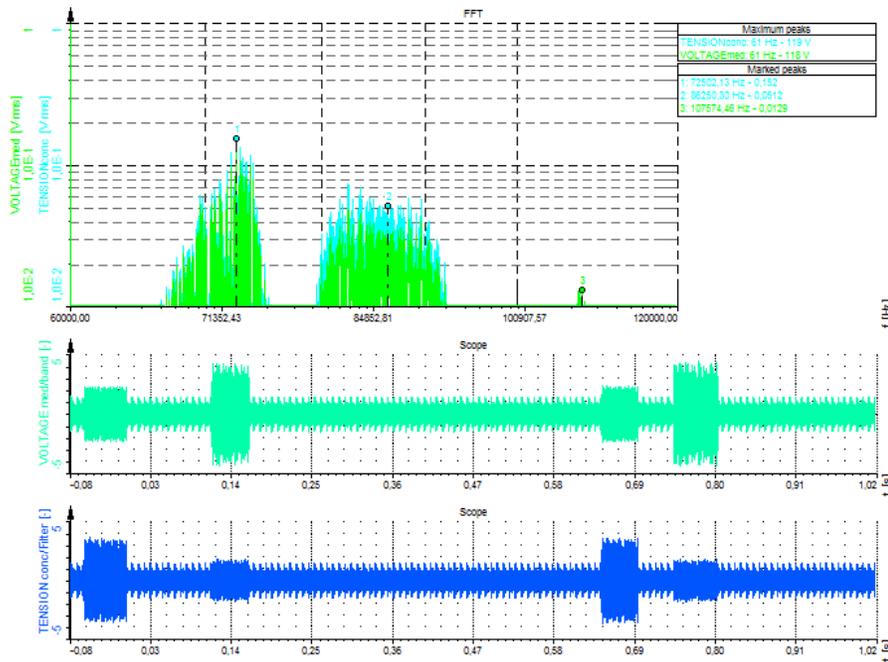


Figura 4-13: FFT - Voltaje en el medidor y el concentrador con señal emitida

Los resultados de las bandas de emisión se presentan en la tabla 4-5, seleccionadas de acuerdo con los criterios definidos anteriormente. De acuerdo con la tabla 4-5 se puede observar los niveles de amplitud de la señal PLC en la banda de 78 - 93 kHz de 119,463 dBuV. Se tienen presentes siempre señales en la banda de 60 - 78 kHz con nivel de 115,031 dBuV.

Tabla 4-5: Caracterización de bandas de frecuencia - Bossanova

Punto de prueba	Inicio de banda [kHz]	Fin de banda [kHz]	Emisión Banda [dBuV]
0	60	78	115,031
	104	112	97,813
	137	152	105,022
1	60	77	115,602
	78	93	119,463
	105	110	94,971

Los resultados obtenidos de la caracterización del circuito de entrenamiento de Bossanova durante las mediciones realizadas en el reinicio general del sistema (apagado del concentrador), se encuentran en la tabla 4-6. En esta se muestran: I. el procesamiento de las señales medidas mediante un filtro pasa bandas II. el procesamiento de las señales medidas utilizando un filtro pasabanda y III. el resultado de las mediciones realizadas en el medidor utilizando un filtro pasabanda (según figura 4-5). De las mediciones obtenidas se tiene: Tensión RMS : 120.48273 V, $vTHD$: 2.6511 %, Frecuencia Fundamental: 60.000 Hz, Valor RMS Armónico Fundamental: 120.441 V, Potencia Activa: 14516.1045 W. La amplitud de la FFT durante la transmisión de las señales PLC es aproximadamente 0,0512 Vrms y en las frecuencias 72,5 kHz y 107,5 kHz se tienen valores de 0,152 Vrms y 0,0129 Vrms respectivamente, similares a los valores obtenidos durante la anterior medición (Medición sin señal de transmisión). Estas señales están siempre presentes en la red.

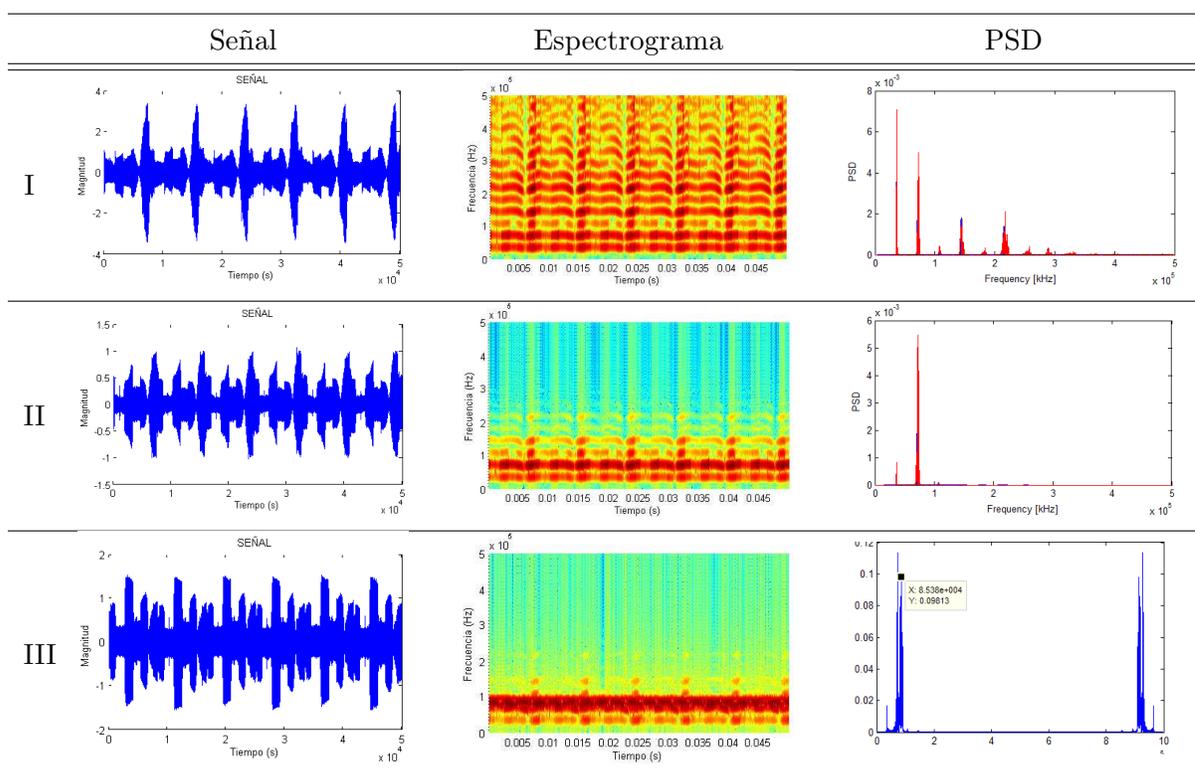


Tabla 4-6: Mediciones en concentrador y medidor - Centro de entrenamiento Bossanova

4.2.6.3.2. Mediciones circuito piloto Codensa. Los resultados de las mediciones realizada en el circuito piloto de Codensa fueron caracterizados en 3 puntos de análisis de acuerdo con la figura 4-14.

El análisis de los puntos medidos de la figura 4-14 son presentados la medición de tensión y corriente y los respectivos espectrogramas de cada una de las señales medidas en la tabla 4-7. Adicionalmente en este circuito se midió corriente en los medidores y concentrador.

Al igual que en el análisis realizado en el centro de entrenamiento se tiene que mediante el

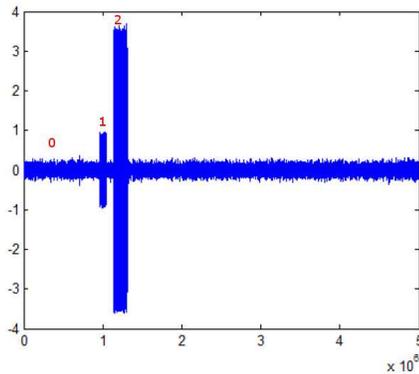


Figura 4-14: Medición inicial - Circuito piloto Codensa

Señal		Espectrograma	
Tensión	Corriente	Tensión	Corriente

Tabla 4-7: Análisis medición circuito piloto

espectrograma de las señales medidas puede verse claramente la banda de emisión de señales PLC en la red y también ver las bandas de señales presentes en la red en todo tiempo. En el circuito piloto se pudo evidenciar que cuando no se tiene transmisión de señales PLC se tienen algunas bandas de emisión diferentes en amplitud y frecuencia a los presentados en el centro de entrenamiento. Dichas bandas se encuentran en 69,99 y 109,947 kHz con amplitudes de 0,00516 y 0,00271 Vrms respectivamente.

Los resultados de las bandas de emisión son presentados en la tabla 4-8 caracterizadas en tres instantes de medición de la señal presentada en la figura 4-14. El punto 0 describe la señal medida sin presencia de señal PLC y la 1 y 2 emisión y recepción de señales medidas en el concentrador.

De acuerdo con la información de la tabla 4-8 se puede observar que en las partes de la medición donde se tiene emisión ó recepción de señales PLC (puntos de prueba 1 y 2) se tiene una emisión de 109,642 y 103,387 dBuV respectivamente en la banda 86 kHz (± 5 kHz). Mediante esta practica se pudo comprobar con bastante exactitud las bandas de emisión cuando se tiene presencia de señales en la red y cuando no para determinar señales presentes todo el tiempo en la red. Además mediante la medición de corriente también se pudo caracterizar las bandas de emisión utilizando el método descrito anteriormente.

Tabla 4-8: Caracterización de bandas de frecuencia - Bossanova

Punto prueba	Banda [kHz]	iTHD [%]	Emisión [dBuA]	Banda [kHz]	vTHD [%]	Emisión [dBuV]
0	[60-94]	6,051	67,472	[149-151]	712.586,625	76,361
1	[60-94]	6,894	68,599	[79-93]	53.970.572	109,642
2	[60-117]	8,551	70,473	[79-93]	4.287.472	103,387

Codensa logro medir el nivel de ruido en las 3 fases del concentrador del circuito piloto y realizar algunas mediciones sobre los medidores con el fin de analizar posibles variaciones en las características de la red para ubicar o establecer posibles fuentes de ruido en el circuito. Según la información de ENEL, para este tipo de aplicaciones el nivel de ruido debe ser menor a 80 dbuV para obtener buenos resultados en la comunicación de los equipos. Las medidas realizadas cerca al concentrador muestran un nivel de ruido con valores mayores a 80 dbuV según la figura 4-15, particularmente en la fase T. Mediciones similares fueron realizadas por Codensa en un circuito piloto instalado en un edificio con valores de ruido inferiores a 80 dbuV con muy buenos resultados en la transmisión de datos, probablemente debido a la naturaleza residencial del sector.

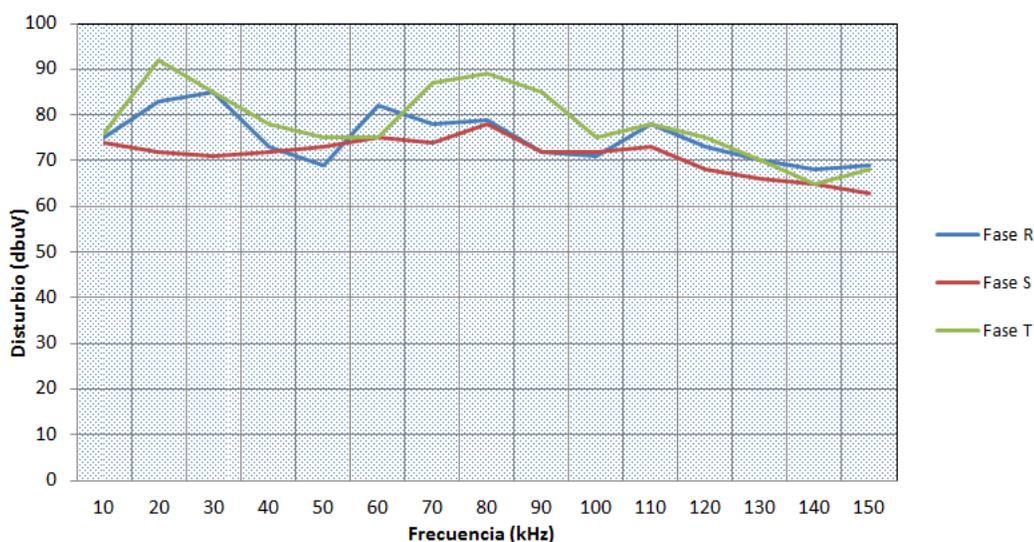


Figura 4-15: Medición de ruido en el concentrador

4.2.6.3.3. Ruido generado por cargas eléctricas. A través de investigaciones se han podido medir las características de ruido de varios tipos de dispositivos eléctricos. Estos dispositivos son los siguientes: dimmer, aspiradora, TV, monitor LCD, cargador portátil y lavadora entre otros. El ruido generado por los dispositivos eléctricos se ha cuantificado considerando dos parámetros, excursión pico y la tasa máxima de cambio de PSD (Power Spectral Density) instantánea que se denota como P_e y R_c , respectivamente. P_e indica el valor máximo cambio de potencia durante un ciclo AC entre todas las frecuencias, y R_c revela el cambio de potencia máximo en T_r a lo largo del mismo eje de frecuencia en un ciclo de corriente alterna como se muestra en. Algunas conclusiones importantes con respecto a las características de ruido de los dispositivos se pueden observar en la tabla 4-9 [Guzelgoz y otros \(2010\)](#):

Tabla 4-9: P_e y R_c de cargas eléctricas

Dispositivo	P_e (dB)	R_c (dB)
Computador	61,26	17,43
Dimmer	45,61	36,83
Cargador Laptop	23,47	21,12
Monitor LCD	30,32	21,68
Lavadora	40,81	26,72

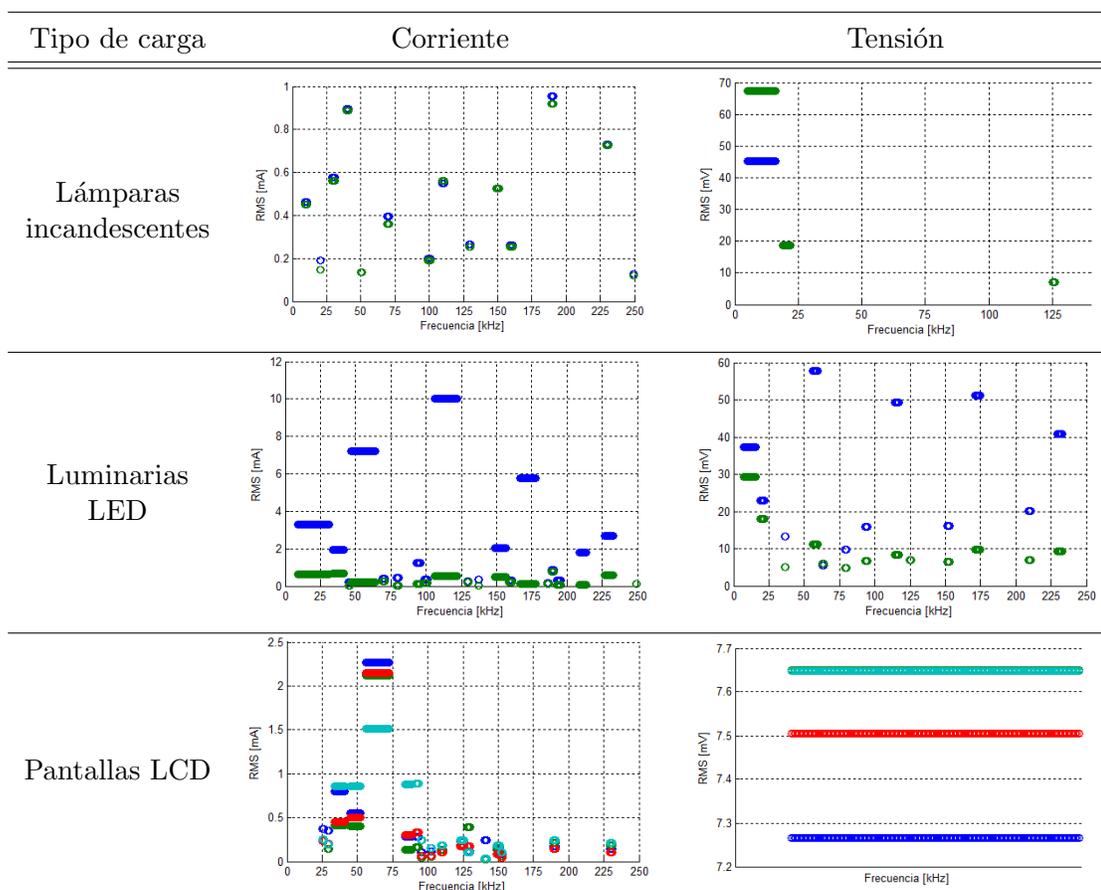
De acuerdo con la anterior información el ruido producido por las cargas es uno de los principales retos en la comunicación de redes PLC viables. Por lo tanto, el diseño de sistemas PLC requiere una muy buena comprensión de las características del ruido. El ruido impulsivo esta presente en los sistemas PLC, generado por electrodomésticos conectados a la red y es objeto de estudios de investigación. Mediante la medición se pude hacer medición de ruido generalizado presente en la red. Este estudio puede ser considerado como una base para futuros estudios en este campo.

En cada uno de los casos de estudio fueron realizadas mediciones iniciales para verificar niveles de ruido y bandas de emisión de las señales para identificar y asociar las bandas de ruido con algunas cargas caracterizadas como lamparas incandescentes, LED y CFL y pantallas de computadores LCD presentadas en la tabla 4-10. Las señales de tensión y corriente se midieron directamente tal como se muestra la figura 4-4, sin filtros o cualquier otras etapas. Los datos adquiridos contienen señales de tensión y corriente en dominio de tiempo sin un número entero de periodos, por lo que era necesario fijar las señales a analizarlos de una manera adecuadamente. Algunos de los resultados obtenidos en la realización de estas mediciones son presentados en la tabla 4-11, además se obtuvieron las bandas de emisión común, que significa bandas en común entre todos los dispositivos medidos.

Mediante el trabajo realizado por [Agudelo y Pavas \(2015\)](#), se identificaron supraharmónicos en dispositivos de iluminación domésticos (LED, CFL, lámparas incandescentes) por debajo de 60 W de potencia nominal, computadores de escritorio de la pantalla (LCD) y CFL 85 W de potencia nominal (CFLPOW).

Tabla 4-10: Comparación de distorsión de la señal en diferentes cargas

Equipo	U_n [V]	P_n [W]	I_n [mA]	I_{nfund} [mA]	THD_i	$TLHD_i$ [≤ 2.5 kHz]	$TSHD_i$ [2.5 - 250 kHz]
Incandescente	127	60	-	460,7079	3,79	3,76	0,45
CFL	90-130	5-15	-	58,3839	99,85	99,16	11,8
LED	85-265	2,5-3	-	34,879	117,5	110,25	41,4
LCD	100-240	-	0,4-1,5	272,5576	107,05	107,05	0,9

Tabla 4-11: Emisión de Supra-Armónicos de diferentes cargas [Agudelo y Pavas \(2015\)](#)

Las lámparas LED (Light Emitting Diode) llegaron al mercado como alternativas eficientes de energía para tener un 68 % de ahorro de energía en comparación con las lámparas halógenas, además de inyectar ruido sobre la red eléctrica con efectos perjudiciales sobre el canal de comunicaciones. Las lámparas LED para las frecuencias superiores a 150 kHz tienen una mayor emisión actual en comparación con todos los dispositivos probados. Las lámparas incandescentes tienen

los niveles de emisión más bajos. Además, las pantallas LCD presentan casi todas sus emisiones supra-armónicas entre 9 y 122 kHz en contraste con otros dispositivos [Agudelo y Pavas \(2015\)](#).

Las lámparas de plasma producen ruido en la banda de 150 kHz - 30MHz, como el nivel de ruido y el nivel de la señal PLC se rigen por las mismas normas de EMC a menos que se revise e intente que las señales del PLC puede exceder el límite de EMC, las señales de PLC tendrán que competir con las señales de ruido. También producen ruido en la banda CENELEC de 3 kHz - 150KHz, pero el nivel de interferencia es 60dB - 70dB más bajo que el nivel de la señal PLC permisible y por lo tanto no representan riesgos para las comunicaciones de línea eléctrica [Emleh y otros \(2013\)](#). Las lamparas flourescentes producen ruido en la banda CENELEC de 3kHz - 150kHz, pero el nivel de interferencia is 20 dB - 40dB, más bajo que el nivel de la señal permisible en PLC y por lo tanto no representan riesgos [Emleh y otros \(2014\)](#).

4.2.7. Influencia de armónicos en la comunicación

Debido al aumento de cargas no lineales debido a la demanda siempre creciente de la industria y el comercio, acompañadas del desarrollo de electrónica de potencia han producido un aumento del nivel de armónicos presentes en las redes. Los armónicos son distorsiones en las ondas senosoidales de tensión y/o corriente, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- Amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico,
- Orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$. El orden el armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia del fundamental (60 Hz)

Un efecto de la presencia de armónicos es la reducción del factor de potencia total. Los armónicos ocasionan perturbación sobre la red y causar algunas algunos problemas como calentamiento de motores, cables y transformadores, así como el sobrecalentamiento de capacitores y mal funcionamiento de dispositivos electrónicos.

La influencia de los niveles totales de armónicos expresada a través de los coeficientes de distorsión armónica total para corriente (THD_i) y para voltaje (THD_v), sobre las transmisiones de paquetes es considerable, mientras más se incrementa el nivel de THD mayor es la pérdida de paquetes y mayor es el tiempo de viaje [Carrasquillo y Arias \(2000\)](#).

Durante la realización de este trabajo se realizo un estudio de calidad de energía para determinar los valores de armónicos (Valor promedio RMS del armónico de voltaje individual cada 10 minutos) asociados a la red de estudio y se presenta en los anexos de este trabajo, también se

presentan los límites establecidos para las Armónicas individuales de tensión en sistemas o redes eléctricas.

4.2.8. Compatibilidad electromagnética

La compatibilidad electromagnética (EMC), es la capacidad de un dispositivo o de un sistema de funcionar satisfactoriamente en un ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones intolerables a otro sistema en ese ambiente. Un método para clasificar las perturbaciones de señales, se basa en los métodos de acoplamiento de energía electromagnética de la fuente al receptor:

- Acoplado inductivamente (campo magnético)
- Conducido (corriente eléctrica)
- Acoplado capacitivamente (campo eléctrico)
- Irradiado (campo electromagnético)

Otra forma de clasificar las perturbaciones electromagnéticas esta en base a los parámetros de duración, tasa de repetición y ciclo (periodo). Las perturbaciones de corta duración se pueden dividir en tres clases: ruido, impulsos y transitorios. Según el espectro ocupado pueden clasificarse como se muestra en la figura 4-16.

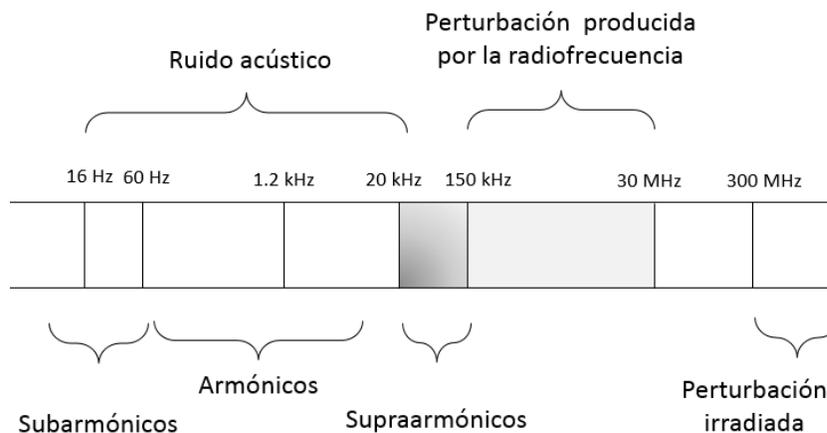


Figura 4-16: Clasificación de las perturbaciones de EMC según el espectro ocupado

La inyección de señales de comunicación en las redes eléctricas puede asemejarse a la radiación electromagnética ocasionada por una antena en el ambiente. Dicho campo puede ser considerado como perturbación para el ambiente y por ende no debe superar algunos límites establecidos. La compatibilidad electromagnética, exige que el sistema PLC funcione en un ambiente sin provocar perturbaciones a otros sistemas aledaños.

Las posibles soluciones a los problemas de compatibilidad electromagnética relacionados con PLC dependen de la causa del problema. En todos los casos de interferencia se debe verificar que los aparatos estén intactos y correctamente instalados. Defectos de instalación son una causa importante de problemas, especialmente en el caso de convertidores de frecuencia. Aunque los filtros disponibles actualmente están diseñados principalmente para frecuencias superiores a 150 kHz, su atenuación en el extremo superior de la banda CENELEC (60 ... 95 kHz) utilizado por la mayoría de los sistemas PLC modernos es generalmente lo suficientemente alta como para resolver el problema EMC Pakonen y otros (2013).

CISPR-22 (2006), define los principios de medición, información de los equipos y los valores límite correspondientes que permiten el funcionamiento adecuado de los sistemas PLC y ofrecer al mismo tiempo una protección suficiente a los servicios de radio sensible y / o en otros medios. Tiene dos enfoques:

- Tipo 1, es una categoría de dispositivo PLC que requiere la implementación de medidas de protección adicionales para reducir la probabilidad de interferencia tales como "Notching", tal como se muestra en la figura 4-17
- Tipo 2, es una categoría de todos los demás módems PLC

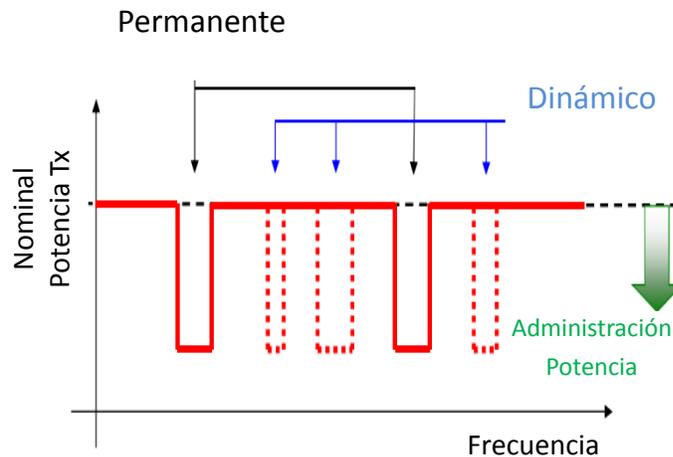


Figura 4-17: Implementación de medidas de protección adicionales Pagani y otros (2010)

4.2.8.1. Límites de emisión

Algunos ensayos de PLC fueron monitoreados por la Agencia de Radio-comunicaciones en Londres, para tener medir las emisiones causadas por esta tecnología. La agencia a través de MPT-1570 (2003), especifica los límites de radiación y las especificaciones para medición para sistemas de telecomunicaciones en el rango de frecuencias de 9 kHz a 300 Mhz. La intensidad del

campo magnético, medido en el rango de frecuencias de 9 kHz a 150 kHz, no debe exceder de $49 - 20 \log * f(kHz) [dB\mu A/m]$.

El Campo Eléctrico puede expresarse mediante la ecuación

$$\vec{E} = 20 * \left(\frac{dB\mu V}{m} \right) - 7,7 * \log \left(\frac{f}{MHz} \right) \quad (4-2)$$

Los límites de \vec{E} para PLC, TV, xDSL a un distancia de 3 metros se muestran en la tabla 4-12.

Tabla 4-12: Límites de radiación para PLC

Bandas de Frecuencia	Límites \vec{E} (pico)
0,009 MHz - 1 MHz	$40 \text{ dB}(\mu V/m) - 20 * \log_{10}(f/MHz)$
1 MHz - 30 MHz	$40 \text{ dB}(\mu V/m) - 8,8 * \log_{10}(f/MHz)$
30 MHz - 1 GHz	27 dB($\mu V/m$)
1 MHz - 3 GHz	40 dB($\mu V/m$)

4.2.8.2. Interferencias

Generalmente existen dos tipos de emisiones que causan interferencia: emisiones radiadas y emisiones conducidas. Las emisiones radiadas producen energía radiada desde la fuente hacia el exterior provocando la degradación en el funcionamiento de otros equipos electrónicos. Las emisiones conducidas son longitudes de onda que viajan a lo largo de las líneas eléctricas de potencia o a través de otro medio de transmisión degradando la operación de otros dispositivos. La interferencia puede ser definida como el efecto de energía no deseada, debido a la combinación de una o más emisiones, radiaciones o inducciones electromagnéticas recibidas en un sistema de radiocomunicación, que se manifiesta por medio de la degradación del funcionamiento o pérdida de información del sistema. Por esta razón, existe una gran preocupación en relación a la interferencia de radiofrecuencia producida por los sistemas PLC.

IEC-61000-4-19 (2013) se refiere a los requisitos de inmunidad y métodos de prueba para equipos eléctricos y electrónicos, las perturbaciones de modo diferencial y la señales en el rango de 2 kHz a 150 kHz a ac puertos de alimentación. El objeto de esta norma es establecer una base común y reproducible para el ensayo de los equipos eléctricos y electrónicos con la aplicación de las perturbaciones de modo diferencial y señalización de puertos de alimentación AC.

Estas pruebas tienen por objeto demostrar la inmunidad de los equipos eléctricos y electrónicos que funciona a una tensión de alimentación de la red hasta 280 V (de fase a neutro o fase a tierra, si se utiliza sin neutro) y una frecuencia de 50 o 60 Hz cuando se someten a perturbaciones de modo diferencial como los precedentes por sistemas de comunicación línea eléctrica (PLC).

4.3. Modelado

Las características de una línea de transmisión están determinadas por sus propiedades eléctricas y físicas. Para la caracterización y el modelado del canal de comunicación, se deben determinar y analizar la inductancia, resistencia, capacitancia y conductancia. Algunos de estos parámetros varían con la frecuencia como la resistencia; sin embargo, los valores de inductancia y capacitancia son prácticamente independientes de la frecuencia. La impedancia de red eléctrica está fuertemente determinada por la corriente, que no es constante y está determinada por la variación de las cargas. La transmisión de datos es sensible a las pérdidas eléctricas y la distorsión de forma de onda, que a su vez depende de la carga y la demanda de potencia reactiva en cada parte del sistema. Los dispositivos como los bancos de condensadores pueden perjudicar gravemente la intensidad de la señal. Además, existen otros parámetros secundarios: impedancia características (Z_L) y constante de propagación (γ), ambos parámetros dependen de la frecuencia y de los parámetros primarios.

La impedancia característica se puede calcular por la siguiente ecuación,

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R + j2\pi f L}{G + j2\pi f C}} \quad (4-3)$$

La constante de propagación esta expresada como

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4-4)$$

Donde:

R = representa la resistencia por unidad de longitud

G = fugas de conductancia por unidad de longitud

L = inductancia por unidad de longitud

C = Capacitancia por unidad de longitud

Los valores de α [Nepers] y β [radianes por unidad de longitud] son llamados *constante de atenuación* y *constante de fase*, respectivamente y se calculan mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{R}{2Z_L} + \frac{GZ_L}{2} \quad (4-5)$$

$$\beta \approx \omega\sqrt{LC} \quad (4-6)$$

Existe una variedad de conductores utilizados en las redes de baja tensión, lo que implica que los valores de atenuación e impedancias características serán muy disperso. En el desarrollo de este trabajo, fueron empleadas algunas de las topologías típicas de uso común en Colombia.

Configuración trifásica con neutro concéntrico utilizado en instalaciones subterráneas y para interiores con calibres 6, 8, 10, 12 y 14 AWG, tanto para fase como neutro, normalmente instalado a través de una tubería de PVC de media pulgada ($\frac{1}{2}$ in) de diámetro, en acuerdo con la Norma técnica Colombiana [NTC-2050 \(2014\)](#).

4.3.1. Caracterización de las líneas subterráneas de baja tensión

Esta configuración consiste en tres conductores circulares con aislamiento individual y envueltos por un cable de neutro como se puede ver en la figura 4-18. Con alimentación simétrica la diferencia de voltaje entre cada fase y el neutro es cero. Debido al arreglo y terminación simétrica, la diferencia de voltaje entre los conductores de fase a lo largo de la línea permanece sin cambios; como consecuencia, el espacio entre conductores es un área libre y un campo radial eléctrico se forma hacia el conductor externo. Esto significa que el campo eléctrico está radialmente orientado entre conductores. Debido a la similitud de este tipo de cables a los cables coaxiales, la capacitancia y la inductancia se puede calcular con las ecuaciones inherentes a este.

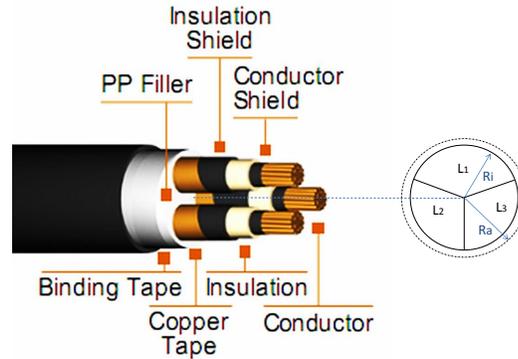


Figura 4-18: Conductor trifásico con neutro concéntrico externo utilizado en instalaciones subterráneas

Así, la capacitancia y la inductancia de un cable coaxial está dada por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\frac{r_a}{r_i}} \quad (4-7)$$

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\frac{r_a}{r_i} \quad (4-8)$$

La resistencia por unidad de longitud está dada por

$$R = \frac{1}{\sigma a} \left[\frac{1}{2\pi r_a} + \frac{1}{2\pi r_i} \right] \Rightarrow R = \frac{1}{\sigma a} \sqrt{\frac{f\mu_o}{k\pi} \left[\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_i} \right]} \quad (4-9)$$

A alta frecuencia, la resistencia por unidad de longitud R , es determinado por el “efecto piel”, donde la densidad de corriente es mayor cerca de la superficie del conductor y disminuye con la profundidad. La corriente eléctrica fluye principalmente en la superficie del conductor, entre la superficie exterior y un nivel llamado profundidad. A 60 Hz en cobre, la profundidad es de unos 8.5 mm. A altas frecuencias la profundidad es menor. La profundidad de penetración a , está dada por la siguiente ecuación y depende de la frecuencia y la conductividad de los alambres σ .

$$a = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_o}} \quad (4-10)$$

Las pérdidas en conductancia por unidad de longitud G de una línea pueden ser calculadas si se multiplican las pérdidas de capacitancia por el factor $\tan \delta$:

$$G = 2\pi f C * \tan \delta \quad (4-11)$$

Dado que para altas frecuencias $R \ll \omega L$, porque R aumenta proporcionalmente con la raíz cuadrada de la frecuencia. Para los materiales de aislamiento más frecuentemente utilizados tales como el PVC a altas frecuencias, también es posible asumir que $G \ll \omega C$. Por último la atenuación $L(f,l)$ puede ser calculada a partir del factor de atenuación $\alpha(f)$ en función de la longitud L en dB:

$$L(f,l) = 20 * \log_{10}(e^{\alpha(f)l}) = 8,686 * \alpha(f)l \quad (4-12)$$

La constante dieléctrica ϵ_r , depende de la frecuencia, pero su variación no es muy grande. Las pérdidas por el factor $\tan \delta$ del PVC muestran también una aproximación lineal sobre el eje en escala logarítmica con un valor de 0,05 a 1 MHz y va decreciendo hasta aproximadamente 0,01 a 20 MHz. la impedancia característica Z_L para este calibre y disposición de conductor específicos se mantiene en el rango de los 5.6 a 6.4 Ω Bastidas y otros (2011).

4.3.2. Caracterización para instalaciones internas

Para el caso de instalaciones eléctricas residenciales según la NTC-2050 (2014) los calibres que deben ser utilizados son: 6, 8, 10, 12 y 14 AWG. En la mayor cantidad de instalaciones el calibre más utilizados para los circuitos de tomas eléctricas es el 14 AWG tanto para fases como para el neutro, instalados dentro de tuberías de PVC de 1/2 pulgada. Teniendo en cuenta que la distancia de separación entre los cables es menor de 10 veces el radio de los conductores se pueden usar las siguientes ecuaciones para determinar C , L y R .

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\text{Cosh}^{-1} \frac{D}{2r}} \quad (4-13)$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \text{Cosh}^{-1} \frac{D}{2r} \quad (4-14)$$

$$R = \frac{1}{\pi r \sigma_c a} \quad (4-15)$$

Para instalaciones internas el material mas utilizado es el cobre cuyo valor de conductividad es $\sigma_c = 5,8 * 10^{-7} S/m$. Por lo tanto al reemplazar (4-8) en (4-13), se tiene:

$$R = \frac{1}{\pi r \sigma_c * 0,066} * \sqrt{f} \quad (4-16)$$

De acuerdo con lo anterior, se tiene que para un conductor calibre 14 AWG que tiene un radio de 8 mm y asumiendo una separación de $D = 1,25 * 2r$. El valor de impedancia característica es mayor que los cables anteriores, con un valor calculado de $Z_L = 42,64\Omega$ para una frecuencia de 1Mhz y la atenuación por unidad de longitud es $19,45dB/km$ Bastidas y otros (2011).

4.3.3. Modelo del canal de comunicación

Aunque existen algunos modelos de canal de PLC en las redes de distribución de energía de baja tensión, todos han sido en frecuencias en BB-PLC Surekha y otros (2009), no existe muchos estudios en las frecuencias de 9 kHz a 490 kHz. Esto se debe a que el enfoque de la investigación en el pasado se debió principalmente a la red PLC en interiores y en la banda de alta frecuencia aplicable para acceso de banda ancha de alta velocidad.

La principal diferencia entre la teoría de circuitos y la de líneas de transmisión es la dimensión. El análisis de circuitos presume que las dimensiones físicas de una red son mucho menores que la longitud de onda eléctrica, mientras que las líneas de transmisión pueden ser una fracción significativa de una longitud de onda, en tamaño. Por lo tanto, una línea de transmisión es una red de parámetros distribuidos, en el que las tensiones y corrientes varían en amplitud y fase en toda su longitud. Para obtener los parámetros del modelo de una línea de transmisión, un trozo de línea de longitud infinitesimal puede ser considerado como un circuito discreto que está descrito por parámetros concentrados, asumiendo que los parámetros eléctricos del circuito (resistencia, capacitancia, inductancia) se encuentran confinados a una región pequeña del espacio y que están conectados en un circuito mediante hilos perfectamente conductores. En general, un modelo de parámetros concentrados es un método que simplifica el análisis de un sistema real espacialmente distribuido, mediante la creación de una topología de elementos discretos que aproximan el comportamiento de los componentes distribuidos reales bajo ciertas restricciones. Para el modelamiento de la red de Codensa se utilizó parámetros concentrados ya que la longitud de onda de las señales es mucho mayor que 10 veces la longitud de los segmentos.

Los dos parámetros de la línea para el modelado de la línea de transmisión mediante parámetros concentrados son la constante de propagación y la impedancia característica Z_o . La constante de propagación esta expresada como

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4-17)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R + j2\pi f L}{G + j2\pi f C}} \quad (4-18)$$

Los algoritmos de modelado típicos utilizados son la matriz de transmisión **Meng y otros (2004)**. Mientras que la matriz de transmisión relaciona las tensiones y corrientes totales en los puertos de una red de dos puertos, tal como se muestra en la figura 4-19. La matriz de transmisión se utiliza para encontrar la función de transferencia que es básicamente V_2/V_1 .

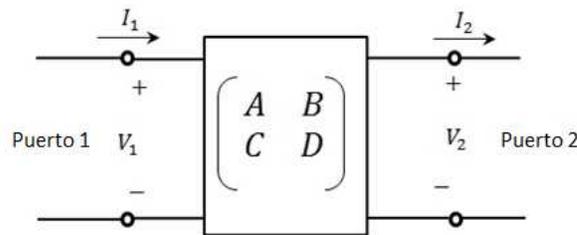


Figura 4-19: Matriz de transmisión de una red de 2 puertos

La teoría de redes de dos puertos sugiere que cada parte de una red, pueda ser modelado por una red de dos puertos adecuado. En la Figura 4-19, la relación entre las cantidades (V_1 y I_1) y las cantidades (V_2 y I_2), usando la matriz ABCD, como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_o \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_o} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

Donde l es la longitud de la línea de transmisión. De acuerdo con lo anterior, la función de transferencia de un modelo simple de la línea de alimentación puede calcularse como:

$$H = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_S + DZ_s} \quad (4-20)$$

Las redes de distribución consisten en derivaciones de diferentes longitudes de cable y de tipos de cable para formar una red hecha de varias secciones. Para una red de línea de energía con varias secciones, la función de transferencia de nuevo se calcula con base en la anterior ecuación.

La matriz ABCD se puede calcular multiplicando las matrices ABCD para las distintas secciones de la red para obtener la matriz ABCD general. En la Figura 4-20 se observa una red con una conexión de derivación y la red equivalente.

La red equivalente se puede dividir en cuatro sub-circuitos designados por matrices ϕ_0, ϕ_1, ϕ_2 y ϕ_3 . Por lo tanto, la matriz ABCD para el cálculo de la función de transferencia global se puede escribir como:

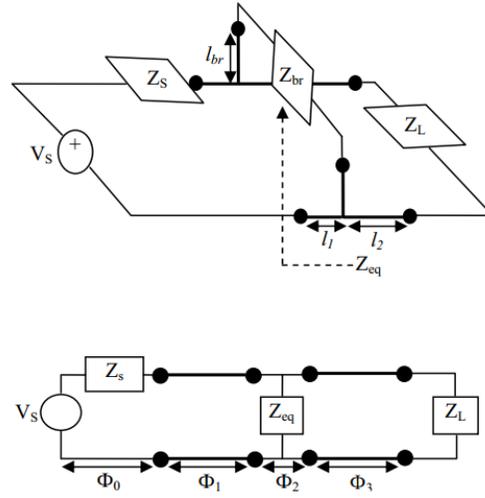


Figura 4-20: Circuito con una derivación y circuito equivalente [Korki y otros \(2011\)](#)

$$[\phi_0] = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

$$[\phi_1] = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l_1) & Z_{0l_1} \sinh(\gamma_1 l_1) \\ \frac{1}{Z_{0l_1}} \sinh(\gamma_1 l_1) & \cosh(\gamma_1 l_1) \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

$$[\phi_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{eq}} & 1 \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

$$[\phi_3] = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 l_2) & Z_{0l_2} \sinh(\gamma_2 l_2) \\ \frac{1}{Z_{0l_2}} \sinh(\gamma_2 l_2) & \cosh(\gamma_2 l_2) \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{i=0}^3 \phi_i = \phi_0 + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \quad (4-25)$$

Donde Z_{0l_1} y Z_{0l_2} son las impedancias características y γ_1, γ_2 las constantes de propagación. Por último para circuitos incluyendo varias líneas, cada uno compuesto de diferentes longitudes de cable y tipo de cable, se tiene

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{i=0}^n \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

Donde A_i, B_i, C_i y D_i , son los componentes de la matriz ABCD [Korki y otros \(2011\)](#).

4.3.4. Simulación

Para la simulación se utilizó el software Electromagnetic Transients Program - Alternative Transient Program (ATP-EMTP⁶) como se muestra en la figura 4-21, este software es ampliamente utilizado para el análisis de transitorios de sistemas de energía, es también aplicable a la simulación de sistemas PLC.

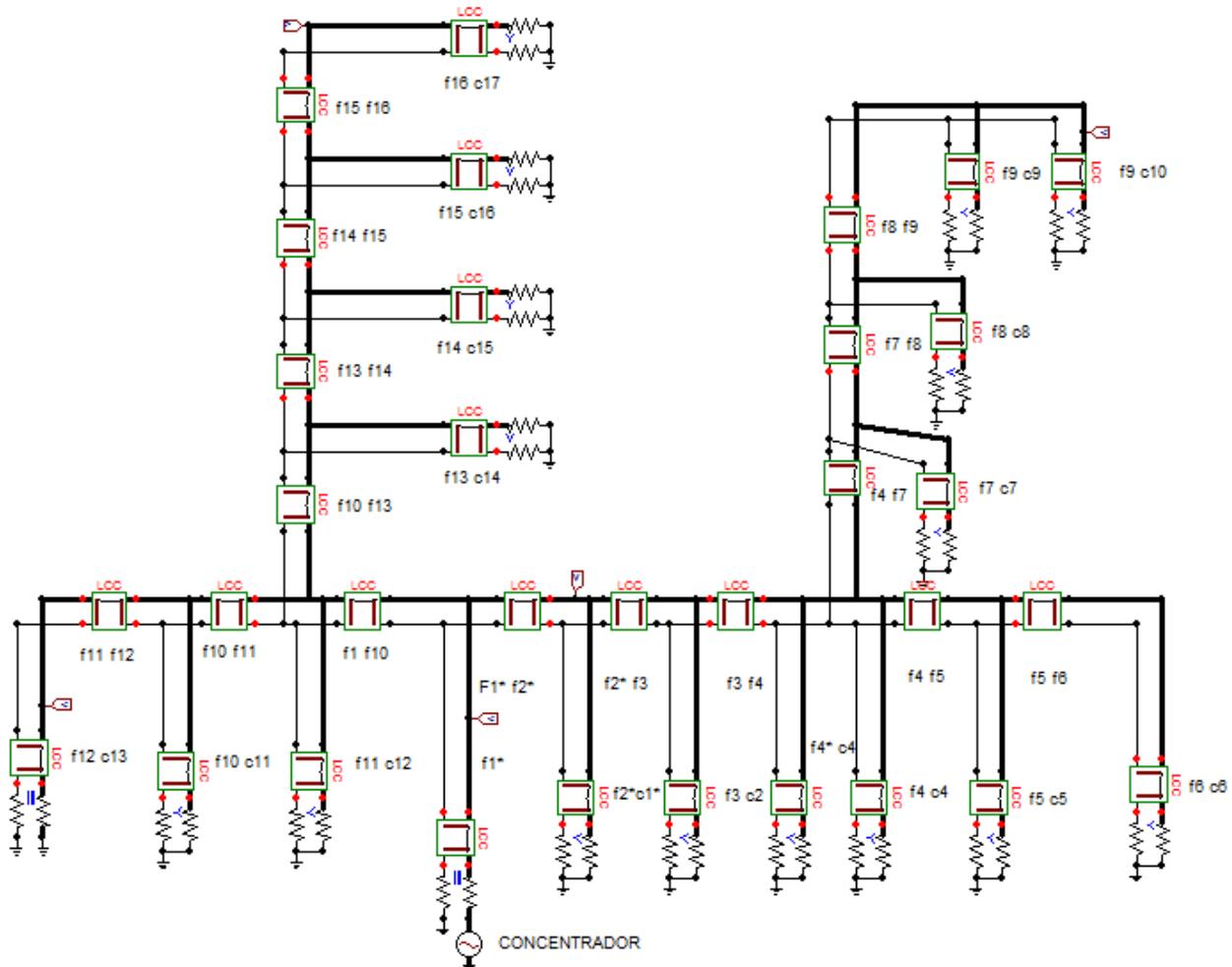


Figura 4-21: Esquema general circuito Codensa - (ATP-EMTP)

⁶ATP, es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia. Fue desarrollado por Scott Meyer.

En la simulación se utilizó el modelo PI para representar las líneas trifásicas del circuito utilizando el cuadro de distribución de medidores en el circuito de Codensa con las respectivas longitudes y calibres. Para representar los medidores se utilizó el modelo RLC. El cálculo de parámetros por unidad de longitud de los cables subterráneos se utilizó la rutina «Cable Parameter» y para el cálculo de los parámetros por unidad de longitud de los cables aéreos se utilizó la rutina «Line Constants». El componente LCC de ATP Draw permite elegir el modelo de línea y automáticamente calcular sus parámetros partiendo de la geometría y de las propiedades del conductor.

Mediante ATP-EMTP se realizó un barrido en frecuencia en el rango de 80 kHz a 95 kHz con pasos de 500 Hz, con la función Scan Frequency inyectando tensión trifásica igual a 1 V para cada uno de los nodos F_1 -concentrador, F_2 , F_9 , F_{12} y F_{16} y se midió la magnitud de la tensión de la fase R en los demás puntos donde se encuentran los medidores. Para el análisis se tuvieron en cuenta 4 casos de estudio dependiendo de la configuración de la fuente para simular los cambios en el tiempo que se tiene en la red en puntos extremos y determinar la atenuación de la señal inyectada en el nodo F_1 -concentrador, 1. circuito abierto, desconectado la fuente de alimentación, 2. Aterrizando el final de la línea, desconectado la fuente de alimentación, 3. dejando la fuente de alimentación conectada, pero sin la resistencia que tiene aterrizada y 4. Fuente de alimentación conectada sin cambios. Por último se realizó una simulación con algunos medidores pares del circuito con una resistencia de 5Ω y los impares con resistencias de 150Ω , esto con el fin de verificar el comportamiento de atenuación en algunos puntos específicos cuando se tiene una variación en la carga.

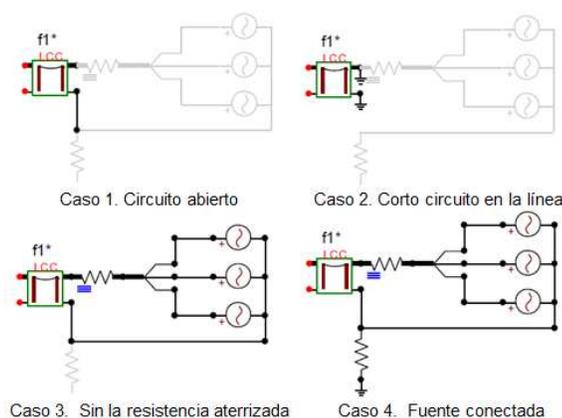


Figura 4-22: Casos de estudio - simulación (ATP-EMTP)

4.3.4.1. Resultados

La corriente y la tensión de la señal se atenúan con el aumento de la frecuencia, esto se puede apreciar con la definición de impedancia inductiva descrita a continuación

$$Z_L(j\omega) = j\omega L \quad (4-27)$$

De los resultados obtenidos de la simulación inyectando 1 V en el concentrador (punto de simulación F_1 -concentrador), se puede observar que la atenuación de la línea eléctrica se incrementa con la distancia y con la frecuencia tal como se describió anteriormente y que se presenta en la tabla 4-13.

Tabla 4-13: Datos simulación - Inyección en F_1 -concentrador

Frecuencia [kHz]	F_{12} [V]	F_9 [V]	F_{16} [V]
81	0,953	0,916	0,941
86	0,951	0,911	0,937
91	0,947	0,905	0,933

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 4-13 se comprobó que efectivamente cuando se tiene un máximo de atenuación en F_9 , debido a que este nodo representa el medidor que esta mas alejado del concentrador a una distancia aproximada 245 m y esta varia efectivamente con la frecuencia. Como se mencionó en el capitulo 3 la atenuación, es la pérdida de la potencia de la señal durante su propagación y depende en la longitud y la frecuencia de transmisión. Se puede calcular mediante

$$Atenuación(dB) = 20 * \log \left[\frac{V_{Transmitido}}{V_{Recibido}} \right] \quad (4-28)$$

Teóricamente la atenuación incrementa linealmente con respecto a la distancia y a la frecuencia. La tabla 4-14 presenta los datos de atenuación y la figura 4-23 el comportamiento de la atenuación con respecto a la frecuencia de la simulación realizada inyectando en F_1 , y realizando un barrido de frecuencia en la banda de interés.

Tabla 4-14: Atenuación - Inyección en F_1 -concentrador

Frecuencia [kHz]	F_{12} [dB]	F_9 [dB]	F_{16} [dB]
81	0,411	0,758	0,524
86	0,441	0,811	0,562
91	0,471	0,862	0,599

Una de los factores que mayor incrementa la atenuación en PLC es la reflexión a causada por las bifurcaciones o ramas y presentado en el análisis de las mediciones presentadas en la tabla 4-3. Dado que el número de bifurcaciones o ramas y la distancia varían en la configuración real de las redes, la reflexión se produce en varias frecuencias. Cuando éstos coinciden, una gran cantidad de atenuación de la señal inesperada se producirá en ciertas frecuencias. Aproximadamente la velocidad de transmisión de la señal dentro de la línea es de aproximadamente 60 % de la velocidad de la luz, una pérdida de retorno se producirá a 450 m cuando la frecuencia de la señal es de 100 kHz. Del mismo modo, una pérdida de retorno se producirá en el 4,5 m cuando

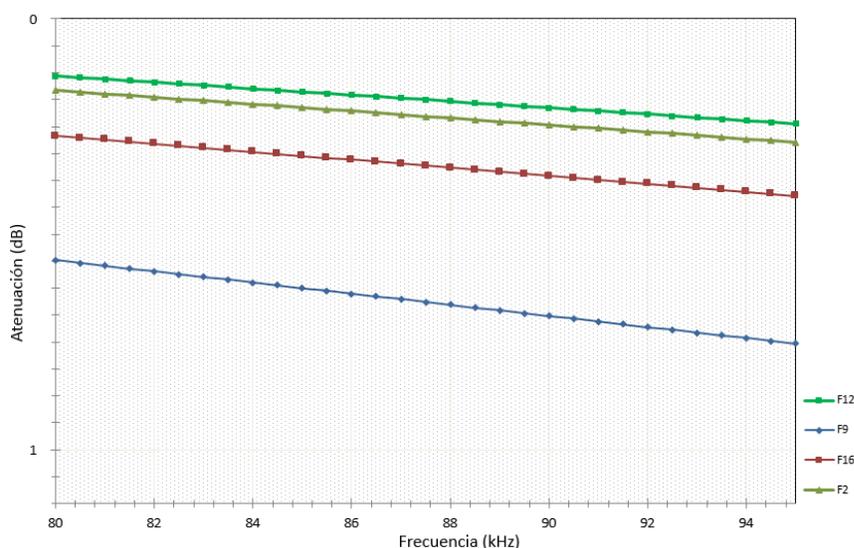


Figura 4-23: Atenuación vs Frecuencia - Simulación Inyección F1

la frecuencia de la señal es de 10 MHz, por lo tanto, se supone que se produce atenuación de la señal más fácilmente en una banda de MHz que en una banda de kHz, debido a la reflexión [Maenou y Katayama \(2006\)](#). Algunas estimaciones típicas de atenuación son 0.05 db/Km a 9 KHz y 1.5db/Km a 95 KHz. Tanto la conexión y desconexión como la variación en las cargas producen alta distorsión (fase y amplitud) [Echeverri y Madera \(2008\)](#).

4.4. Análisis

En esta sección se presenta el análisis de la información técnica consultada, los datos obtenidos de mediciones y de simulaciones además de datos calculados, y de esta forma presentar una valoración de la red eléctrica analizada y verificar la viabilidad de implementación de la tecnología PLC. También se presenta el análisis de las características de atenuación debido a la longitud de las líneas, las ramas o bifurcaciones del sistema, el efecto en la comunicación causado por el ruido presente en la red y la comparación de las medidas realizadas con las simulaciones.

En la figura 4-24 se muestra el mapa general de la ubicación de la red, los medidores, el concentrador y los puntos de medición del circuito piloto utilizado en el siguiente análisis. Algunos medidores están marcados con el numero de marcación de la empresa. Se presentan las líneas de tensión y la ubicación de postes, del concentrador y de las acometidas de cada cliente. Un tramo de línea ubicado desde el concentrador hasta el primer poste esta punteado indicando el tramo de línea subterráneo.



Figura 4-24: Circuito piloto Codensa

4.4.1. Características de atenuación de la señal debido a la longitud

El primer criterio de rendimiento de cualquier sistema de comunicaciones responde a la pregunta "¿Puede el receptor entenderse o comunicarse correctamente con el emisor?". Los niveles de señal en el receptor son una función de la potencia del transmisor y de la atenuación de trayecto entre el transmisor y el receptor. La entrada para el receptor debe ser mayor que la sensibilidad mínima del receptor con margen suficiente por encima del nivel de ruido ambiente.

Como se menciona en la sección 4.2.6.2, uno de los problemas a los cuales se ve enfrentado el uso de la tecnología PLC es la atenuación presente en el canal de distribución debido a la longitud. La atenuación del trayecto se puede determinar mediante la adición de las pérdidas de cada sección de la línea. Para el análisis de atenuación debido a la longitud se realizó la clasificación de acuerdo a la distancia de cada medidor hasta hasta el concentrador presentada en la tabla 4-15.

De acuerdo con la clasificación de la tabla 4-15, se presenta la gráfica 4-25 de longitud vs SNR con el fin de examinar el comportamiento de atenuación de la señal debido al efecto de la longitud. De acuerdo con la clasificación se puede visualizar áreas o zonas de menor o mayor nivel de atenuación. El gráfico muestra que evidentemente la atenuación de la señal es más significativo cuando la longitud de línea de alimentación es más largo y los puntos mas distantes tienen problemas de comunicación.

Tabla 4-15: Rangos de evaluación de longitud

Icono	Rango de evaluación	Comentarios
●	Longitud ≥ 200 [m]	No se puede establecer comunicación entre el concentrador y el medidor - SNR < 15
●	200 [m] $<$ Longitud ≥ 150 [m]	Se desconoce si pueda establecerse una comunicación entre el concentrador y el medidor - SNR < 20
●	150 [m] $<$ Longitud ≥ 50 [m]	Se puede establecer comunicación entre el concentrador y el medidor - SNR ≥ 20
●	Longitud [m] < 5	Margenes buenos - Se puede establecer enlaces entre el concentrador y el medidor - SNR ≥ 20

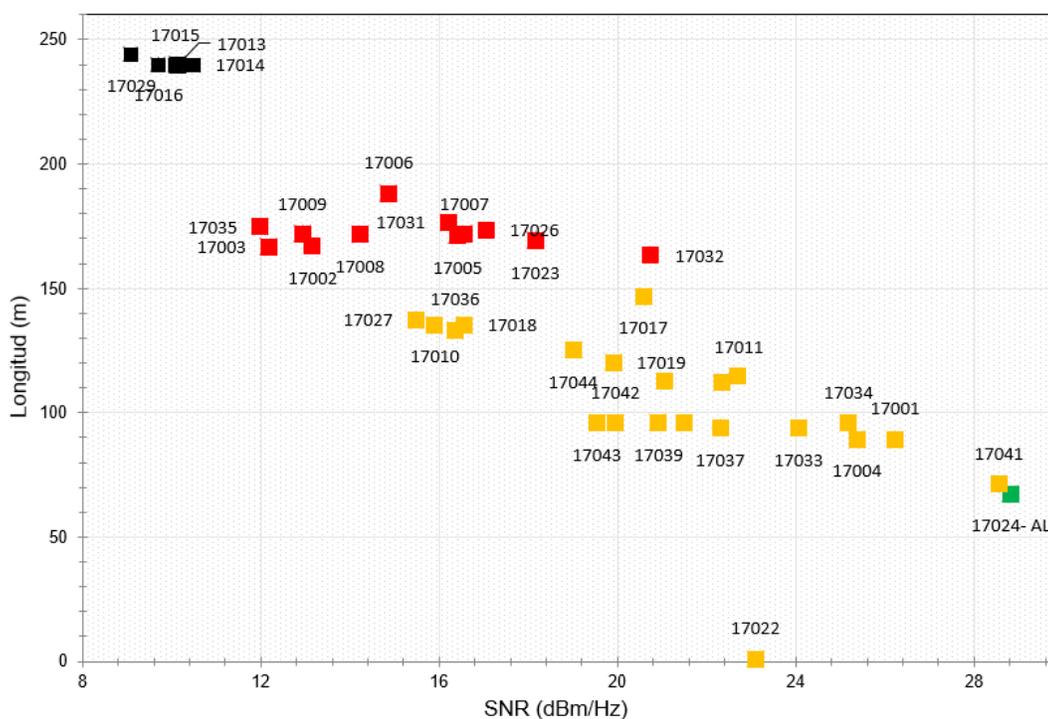


Figura 4-25: Longitud vs SNR - Datos medidos circuito piloto

4.4.2. Características de atenuación de la señal debido al número de ramas

La longitud no es la única razón por la cual se tiene atenuación de la señal. La influencia del número de ramas es otro de los factores analizados en la suma total de pérdidas (tabla 4-3). La influencia del número de ramas atenúa la potencia promedio de la señal; sin embargo, no modifica la respuesta de la señal en el espectro [Anatory y otros \(2008\)](#).

La propagación de las señales enviadas a través de la red no ocurre de una forma directa desde el emisor hasta el receptor, sino que se consideran múltiples trayectorias denominadas ecos y como resultado de estos se produce desvanecimiento selectivo de la frecuencia. Este tipo de efecto puede ser analizado mediante la figura 4-26, donde se puede visualizar un nodo con varias ramas con longitudes (l_1, l_2 y l_3) e impedancias (Z_{l1}, Z_{l2} , y Z_{l3}). B y D son los puntos para las reflexiones denotados como r_{1B}, r_{3D} , y r_{3B} y los factores de transmisión como t_{1B}, t_{3B} . Para simplificar el análisis los puntos A y C se definen iguales, es decir $Z_A = Z_{l1}$ y $Z_C = Z_{l2}$.

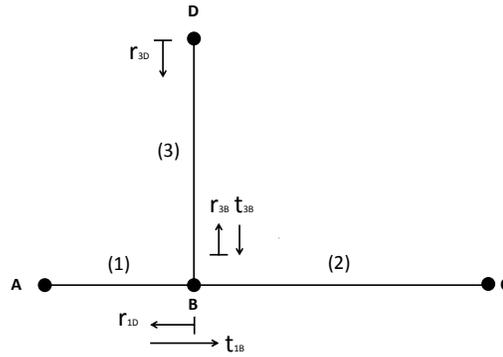


Figura 4-26: Señal de propagación en multitrayectoria

Cada trayectoria i tiene un factor de acople g_i , que representa el producto de los factores de reflexión y de transmisión a lo largo de cada una de las trayectorias. Dicho factor de acoplamiento está descrito a continuación:

$$|g_i| \leq 1 \quad (4-29)$$

De lo anterior, se concluye que los factores de transmisión y reflexión de las líneas eléctricas son menores o iguales a 1 y ocurre entre las uniones de los cables donde la carga en una conexión paralela entre dos o más cables posee una impedancia resultante más baja que la impedancia característica del cable de alimentación. Por lo tanto, a medida que el envío de información aumenta en el canal PLC, más pequeño será el factor de ponderación.

Para el análisis del comportamiento del canal y de acuerdo con lo anterior el número de trayectorias infinitas (N), se aproxima a un número finito relacionado con las trayectorias dominantes para hacer N pequeño como sea posible. De acuerdo con esto, el retardo de una trayectoria τ_i puede ser calculado utilizando la constante dieléctrica ϵ_r del material utilizado de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\tau_i = \frac{d_i * \sqrt{\epsilon_r}}{C_0} = \frac{d_i}{V_p} \quad (4-30)$$

Las pérdidas en cada uno de los cables ocasionan aumento en la atenuación de las señales enviadas en función de su longitud y frecuencia. Por lo tanto, la respuesta en frecuencia en la

figura 4-26, para el envío de una señal desde la posición A hasta C puede ser expresado mediante la siguiente expresión:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i * A(f, d_i) * e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (4-31)$$

Para topologías más complejas, el análisis de propagación de señales puede realizarse a través de particiones por tramos mediante la metodología mencionada anteriormente [Hernández \(2010\)](#).

La atenuación de la señal es más significativa cuando el número de ramas es mayor. Esto es posiblemente debido a causas de reflexión aumentaron con el aumento en el número de ramas [Maenou y Katayama \(2006\)](#).

4.4.3. Atenuación vs SNR medido y calculado

Utilizando el método propuesto por [Corinex \(2014\)](#) para el diseño e instalación de proyectos PLC (ver sección 4.2.6.3) y asumiendo las pérdidas asociadas por longitud de 4 dB por cada 30 metros se calculó el valor de SNR ⁷ en cada uno de los medidores, utilizando el valor medido de ruido en el circuito piloto y midiendo la longitud de las líneas de cada usuario y se comparó con el valor medido en campo. Mediante este análisis también se comprueba la posibilidad de incluir repetidores en puntos estratégicos para poder llegar con un nivel de señal mejor a los usuarios extremos.

La evaluación de las mediciones de SNR se realizó de acuerdo a criterios utilizados por parte de Corinex. Los rangos de evaluación utilizados son los siguientes:

Tabla 4-16: Rangos de evaluación utilizados

Icono	Rango de evaluación	Comentarios
	$SNR \geq 15$	Margenes buenos - Se puede establecer enlaces entre el concentrador y el medidor
	$15 < SNR \leq 5$	Margenes cuestionables - Se desconoce si pueda establecerse una comunicación
	$SNR < 5$	Margenes malos - No se puede establecer comunicación entre el concentrador y el medidor

Analizando los datos calculados frente a los medidos se puede concluir que utilizando el método de Corinex se tiene una buena aproximación para el diseño de las redes PLC. Mediante la figura 4-27 se pueden observar las zonas donde los márgenes de SNR son malos, cuestionables y buenos.

⁷SNR (Signal-to-noise ratio, por sus siglas en inglés), es una medida para cuantificar la cantidad de la señal ha sido corrompida por ruido (ver sección 3.5.1).

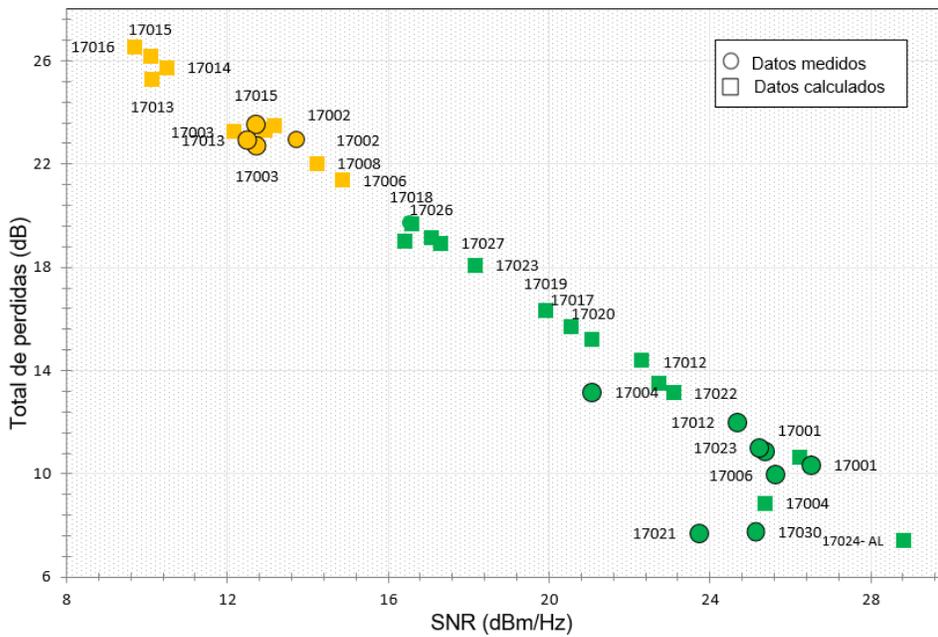


Figura 4-27: Perdidas vs SNR - Datos medidos y calculados en circuito piloto

4.4.4. Resultados de simulación

De acuerdo con 4.3.4, se analizaron los datos obtenidos de SNR mediante la simulación y se compararon con los datos medidos y calculados.

Para el primer caso de simulación la fuente de la señal está conectada entre cada fase y el neutro. Los niveles de señal a lo largo de la línea se registran como tensiones eficaces para la señal transmitida y diafonía en las otras dos fases. Todas las cargas están desconectadas y el final de la línea es de circuito abierto. La misma configuración de red se simuló en EMTP utilizando circuitos equivalentes Pi, parámetros concentrados. Los resultados de las pruebas de campo para el nivel de la señal transmitida en las fases R, S y T, así como la diafonía en la fase B cuando la señal se transmite en la fase A son análisis de posteriores trabajos.

Los resultados del análisis se muestran en la tabla 4-17.

Tabla 4-17: SNR calculado, medido y simulado

Medidor	SNR_{medido} [dB]	$SNR_{calculado}$ [dB]	$SNR_{simulado}$ [dB]
17002	22,935	23,492	20,061
17012	12,008	14,354	16,026
17013	22,918	25,285	26,375

De acuerdo con las observaciones de los datos obtenidos mediante simulación y comparados con las mediciones realizadas se tiene una buena aproximación.

4.5. Conclusiones

En resumen, han sido estudiadas las características de un canal típico de la línea de bajo voltaje en cuanto a la variación en:

- la longitud de la línea entre el transmisor y el receptor
- la longitud de las ramas conectadas
- el número de ramas

Además se presentaron los resultados obtenidos de las mediciones de ruido, atenuación e impedancia. Algunas de las pruebas de campo han sido también simulado mediante el ATP. Después de experimentar con distintos modelos de línea, topologías de instalación y los parámetros, se seleccionaron los modelos de simulación adecuados para la transmisión de señales. Los modelos de simulación conducen a resultados que presentan buenos resultados comparados con las mediciones de campo reales. Los modelos de simulación también se utilizan para una amplia investigación de las características de transmisión de las líneas.

Mediante el modelo de simulación también se puede comprobar la influencia de diversos parámetros como el valor de la resistencia de las cargas, el valor de la resistencia a tierra, la longitud de los segmentos de la línea. Modelos y fórmulas se desarrollan utilizando los datos experimentales de impedancias para líneas eléctricas urbanas, rurales y son presentados en [Cavdar y Karadeniz \(2008\)](#).

Se muestra que los perfiles de tensión a lo largo de líneas abiertas son consistentes con la teoría de línea de transmisión y propagación de la onda modal y, puesto que la longitud de onda de la señal es comparable a la longitud real de las líneas, se producen ondas estacionarias. También se puede evidenciar el fenómeno de resonancia al final de línea y puede dar lugar a tensiones de señal mucho más altas que la señal transmitida. Estos casos necesitan una atención especial ya que los niveles de señal puede llegar a niveles más altos que los niveles permisibles de la norma EN 50065-1.

Conclusiones

5.1. Conclusiones

La utilización de las líneas de energía para fines de comunicación ganó el interés de la investigación debido a las crecientes necesidades de más infraestructura de acceso de última milla. Esta tecnología es una herramienta importante para la vigilancia y el control de cargas distribuidas, generadores distribuidos y las compañías eléctricas. La transmisión de señales en las líneas eléctricas no es fácil. Surgen varios problemas, debido a reflexiones de señal y para el comportamiento de las cargas eléctricas a altas frecuencias. Por lo tanto las aplicaciones deben ser diseñados cuidadosamente y deben combinarse con la experimentación adecuada, en cuanto a las características de transmisión de la señal.

A partir del trabajo realizado se puede concluir:

- Las redes eléctricas no fueron diseñadas para usarse como canal de transmisión de datos y por lo tanto no cuentan con las mejores características.
- El comportamiento natural del cableado es un aspecto que afecta el desarrollo de las redes PLC, estos canales son fuentes de distorsión ya que fueron diseñadas para el transporte de señales eléctricas y no para comunicaciones, por lo tanto se requiere de técnicas de modulación y mecanismos de control que garanticen las señales lleguen a su destino de forma confiable.
- La transmisión de datos a través de la red eléctrica es interferida por señales indeseables, además, la impedancia de la red eléctrica varía en el tiempo con la conexión y desconexión de cargas conectadas en los circuitos de la red PLC.
- El ruido, la atenuación y la distorsión, además de la relación de estos con la frecuencia de las señales definen el desempeño y su comportamiento como canal de comunicación.
- Alta impedancia en la línea facilita una inyección más fácil de la señal y reduce las pérdidas, pero al mismo tiempo aumenta el ruido de equipos cercanos potencia. Por lo tanto el valor de impedancia es un parámetro importante que se debe conocer por que de este depende que el transmisor funcione correctamente en las peores circunstancias.
- La atenuación crece con la frecuencia (debido a la característica capacitiva). La atenuación también se afecta con la longitud del cable, pero la mayor influencia es por la arquitectura

de la red y la existencia de las cargas.

- La transmisión de señales de información (voz, datos, etc.) que requieren transmisión con gran ancho de banda en el medio, implica el uso de técnicas eficientes de codificación, compresión y modulación. En una red PLC existen dos factores importantes que deben ser considerados: obtener una tasa de error de bit (BER) pequeña y conseguir una alta eficiencia espectral de transmisión mediante un esquema de modulación eficiente. Cuando se realiza implementación de un protocolo propietario de datos se debe tener en cuenta algunas consideraciones como: controlar errores, evitar desbordamientos, controlar flujos, evitar congestión en la red, garantizar una calidad de servicio mínima, entre otras.
- La tecnología PLC constituyen una alternativa para el crecimiento de las redes de datos, y en especial de Internet, siempre y cuando se resuelvan los problemas regulatorios y de uso del espectro electromagnético que esta tecnología impone. La implementación de medidores inteligentes requiere de un marco regulatorio y normativo que garantice la interoperabilidad entre los sistemas y productos de los diferentes fabricantes. Existen números esfuerzos a nivel mundial por conseguir una estandarización en la tecnología BPL, entre los cuales se destacan IEEE, FCC y ETSI, entre otros, con el fin de adaptar las líneas del sistema eléctrico instalado como medio de transporte de información. Este debe ser uno de los alcances que buscan tener en Colombia las iniciativas que se vienen desarrollando en conjunto con otras organizaciones a nivel mundial.
- Mediante la medición inteligente se tiene tranquilidad y confianza, por ser una facturación exacta al evitar el error humano, además de comodidad, al evitar la presencia frecuente de técnicos en el predio del cliente. También se espera mayor satisfacción en los clientes por la reconexión inmediata del servicio y la seguridad física, pues el display estará en un sitio seguro.
- De acuerdo con EN500065-1 la banda de frecuencia para este tipo de aplicaciones esta limitada desde 3 kHz hasta 95 kHz donde por razones (evitar la diafonía sobre el transformador MV/LV) frecuencias por debajo de 30kHz típicamente evitadas.
- La tecnología PLC en las redes eléctricas no debería ser considerado el reemplazo de otras, sino la solución complementaria que funciona en conjunto con otras tecnologías de acceso para llegar a los usuarios y prestar otro tipo de servicios adicionales. PLC resuelve la última milla, pero requiere la interacción con otras tecnologías para acceder a la red de distribución (backbone), como tecnología satelital, fibra óptica, redes inalámbricas Wi-Fi o WiMAX.
- Uno de los aspectos de mayor relevancia en los resultados obtenidos mediante esta tesis es el comportamiento de la tecnología PLC bajo las condiciones de la red eléctrica Colombiana, considerando que la eficiencia de la red PLC depende de las condiciones de la red eléctrica y del entorno en que se encuentre. En Colombia y en muchos países, el cableado eléctrico no ha sido modificado, ni adaptado para el uso adecuado de esta tecnología, tal como ha ocurrido en otros países en donde se han realizado diversos estudios y ajustes a su infraestructura en las redes con el fin de optimizar su comportamiento y eficiencia de transmisión, garantizando niveles de confiabilidad y seguridad.

- La señal de potencia recibida puede ser máxima cuando las impedancias del transmisor, receptor y canal están acopladas. Este acoplamiento en redes dedicadas a Internet es conocida así que el acoplamiento no es un problema, pero en las redes eléctricas como se menciona en anteriormente en el capítulo de modelamiento se tiene una gran cantidad de configuraciones y por ende valores aleatorios de impedancia, además de la ya descrita variación en las cargas.
- Reflexiones se presentan cuando se tiene diferencia entre la impedancia de la línea y la de la carga.
- La corriente y la tensión de la señal se atenúan con el aumento de la frecuencia. Teóricamente la atenuación incrementa linealmente con respecto a la distancia y a la frecuencia.
- La atenuación de la señal es más significativa cuando el número de ramas es mayor. Esto es posiblemente debido a causas de reflexión aumentaron con el aumento en el número de ramas [Maenou y Katayama \(2006\)](#).
- Los problemas de comunicación en PLC son causados por una gran cantidad de variables presentes en las redes eléctricas; como se menciona estas no fueron diseñadas para este fin, acoplamiento de impedancias debido al cambio de calibres, atenuación producto de las ramas y de la impedancia de los cables además del ruido presente en la red son algunos de los factores que afectan la comunicación a través de este tipo de tecnología.
- Aunque algunas mediciones han sido realizadas por diferentes investigadores, no hay suficientes datos para facilitar el diseño del sistema específicamente para diferentes redes de alimentación de todo el mundo.

5.2. Recomendaciones

Se deben cumplir varios requisitos para considerar en óptimas condiciones la red eléctrica y poder utilizarla como red de comunicaciones utilizando la tecnología PLC. Las recomendaciones más sobresalientes para el diseño y posible implementación son:

- Se debe tener en cuenta el estado inicial de las líneas eléctricas (corrosión, empalmes, etc) ya que esto puede ocasionar o generar atenuaciones o reflexiones que disminuyen significativamente la calidad de las señales transmitidas.
- Para garantizar una óptima implementación de la red PLC es necesario apropiarse y conocer la tecnología que se instalará así como verificar los conflictos de implementación en una red eléctrica como la de Colombia, además de conocer como los fabricantes resuelven los temas relacionados con el desempeño de la capa MAC, los efectos de distorsión de la señal, los mecanismos de detección y corrección de errores, la técnica de modulación, las características de los equipos, etc.
- Instalar unidades repetidoras para evitar atenuaciones de la señal y que esta llegue en óptimas condiciones a los usuarios más alejados de la red.

- Si se cuenta en la instalación con repetidores se deberían realizar algunas de las siguientes actividades: cambio en el método de acoplamiento (de capacitivo para inductivo, o vice-versa) puede conducir a una mejor adaptación de impedancia y por lo tanto una mejor transferencia de la señal, reubicación óptima en el circuito o la adición de uno o varios repetidores. En cuanto a la configuración de las bandas de emisión realizarse un análisis para verificar la frecuencia donde la emisión de datos sea óptima.
- La ubicación de los concentradores y repetidores en la red PLC es fundamental ya que de estos depende la distribución de la señal. Es necesario analizar la cantidad de usuarios por transformador, para de esta manera realizar un diseño de ubicación de equipo para garantizar calidad de servicio a los clientes.
- Después de completar la instalación y el aprovisionamiento inicial de una red PLC, a menudo es necesario realizar la optimización de la red (en la capa física). Esto se hace porque las redes eléctricas están sujetas a problemas adicionales que no están presentes en redes de comunicaciones regulares. Sobre la base de los datos recogidos a través de las mediciones, se deberá analizar y evaluar el rendimiento de la red (capa física) y se deberán realizar mediciones periódicas para verificar el funcionamiento óptimo del sistema. Mediante el análisis se podrán identificar la localización de ruido, identificar los puntos donde se pueden realizar mejoras e identificar la variación en el cambio de impedancia asociada a la variación de consumo de los clientes.
- Con base en las conclusiones derivadas de los estudios de caso de la tesis, se recomienda realizar la revisión de los criterios de diseño y configuración de la red pública de baja tensión de forma que el uso de PLC y BPL pueda hacerse de forma más eficiente.
- Las cargas eléctricas, especialmente cargas con dispositivos de conmutación en las bandas de operación de PLC, deben estudiarse con mayor profundidad ya que sus efectos sobre eficiencia de la comunicación y las posibles interferencias no son fácilmente previsibles.
- El diseño y construcción de filtros para manejo de interferencia, así como para mejorar las condiciones de acople a la red pública, pueden realizarse en el país y pueden ser una opción de emprendimiento.

5.3. Contribuciones

Las contribuciones resultado de la realización de este trabajo están anexas en este trabajo (ver anexo [G](#)).

- Cañon, Y. y Pavas, A.: Broadband over Power-Line Networks for control and automation systems in Smart Grids. VII Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL. Medellín 2013.
- Cañon, Y. y Pavas, A.: Broadband over Power-Line Networks for control and automation systems within Smart Micro-grids (SMGs). Aceptado IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). 2013.

- Cañon, Y. y Pavas, A.: PLC en la Red de Baja Tensión para Medición Inteligente. MUNDO ELÉCTRICO. REVISTA ESPECIALIZADA EN ELECTROTECNIA. Enero - Marzo de 2012. Edición No. 86. Paginas 112-115.
- Cañon, Y. y Pavas, A.: Implementation of Broadband over Power Line for Smart Metering in Colombia. MUNDO ELÉCTRICO. REVISTA ESPECIALIZADA EN ELECTROTECNIA. Diciembre de 2012. Edición Especial Smart Grids. Paginas 69-74.

Bibliografía

ABB: «FACTS». *Reporte*, Revista ABB, 1999.

ABB: «Manual for HVDC», 2014a.

<http://www.abb.com/HVDC>

ABB: «Power Line Carriers», 2014b.

<http://new.abb.com/network-management/communication-networks/power-line-carriers>

ACLARA: «Substation Communications Equipment (SCE)», 2014.

<http://www.aclaratech.com/Pages/default.aspx>

AGUDELO, D. y PAVAS, A.: «Current Supraharmonics Identification in Commonly Used Low Voltage Devices». *Paper approved - PEPQA 2015: 2nd Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications*, 2015.

AMPERION: «Transmission and Distribution (TD) Products and Services», 2014.

<http://www.amperion.com/products.php>

ANATORY, J.; KISSAKA, M.M. y MVUNGI, N.H.: «Powerline Communications: The Effects of Branches on Network Performance». En: *Power Line Communications and Its Applications, 2006 IEEE International Symposium on*, pp. 70–75, 2006.

ANATORY, J.; THEETHAYI, N.; THOTTAPPILLIL, R.; KISSAKA, M.M. y MVUNGI, N.H.: «The Influence of Load Impedance, Line Length, and Branches on Underground Cable Power-Line Communications (PLC) Systems». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2008, **23(1)**, pp. 180–187.

APSYSTEMS: «M3C-CB10, The Multi Metering Management Concentrator», 2014.

http://www.apsystems.it/en/blog/2013/7/23/m3c-cb10_uk.aspx

ARTECHE: «Acopladores PLC/BPL para MT», 2014.

<http://www.artech.com/es/productos-y-soluciones/categoria/acopladores-plc-bpl-para-mt>

BARTELS, G.: «Global Smart Grid Federation 2012 Report». *Report*, Global Smart Grid Federation, 2012.

- BASTIDAS, H.; PATIÑO, M. y ANGEL, G.: «Modelo de cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas de baja tensión subterráneas e instalaciones internas para uso en telecomunicaciones». En: *Revista Ingeniería e Investigación*, pp. 121–129, 2011.
- BROADRIDGE, R.: «Power line modems and networks». *IEE 4th International Conference on Metering Applications and Tariffs for Electricity Supply IEE Conf. Publ.*, 1984, pp. 294–296.
- CAÑETE, F.: «Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha». *Tesis Doctoral*, 2005.
- CAÑETE, J, F Y DIEZ: «Broadband modelling of indoor power-line channels». *Transactions on Consumer Electronics*, 2002.
- CAÑON, Y. y PAVAS, A.: «Implementación de Broadband over Power Line en Colombia para Medición Inteligente», 2012.
- CAMPO, M.; DOLORES, M. y CARBONELL, J.: «La metrología, motor de innovación tecnológica y desarrollo industrial.» *La Revista Española de Metrología*, 2012, **1**, pp. 29–41.
- CARCELE, X.: «Power Line Communications in practice». p. 376, 2006.
- CARRASQUILLO, A. y ARIAS, L.: «Influencia de las armónicas en la comunicación en redes LAN a BPL (Broadband over Powerline) para diferentes factores de potencia». pp. 1–11, 2000.
- CARUSO, JEFF: «What is the 'Smart Grid'?», 2010.
<http://www.networkworld.com/newsletters/lans/2010/081710-smart-grid.html>
- CAVDAR, H. y KARADENIZ, E.: «Measurements of Impedance and Attenuation at CENELEC Bands for Power Line Communications Systems». En: *Sensors*, pp. 8027–8036, 2008.
- CAVDAR, I.H.: «Performance analysis of FSK power line communications systems over the time-varying channels: measurements and modeling». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, **19(1)**, pp. 111–117.
- CAZACU, M. y BALAUTA, S.: «Power Line Communication System Implemented in E.on Moldova Distribution». *World Energy System Conference*, 2012.
- CEA-709.2-A: «Control Network Power Line (PL) Channel Specification». *International standard*, CEA, 2000.
- CHICA, A.: «Estudio y Análisis de la viabilidad de la Implementación de Tecnología PLT en Colombia, en el ámbito de la transmisión de datos sobre redes de Baja Tensión». *Tesis, Facultad de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia*, 2012.
- CHONG, A.; MENENDEZ, J. y ESTRADA, R.: «Diseño e implementación de la última milla del servicio de internet usando las redes eléctricas de media y baja tensión de un sector de la ciudad de Guayaquil usando la Tecnología Power Line Communications (PLC)». *Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral*, 2006.

- CHUNG, MIN YOUNG; JUNG, MYOUNG-HEE; LEE, TAE-JIN y LEE, YUTAE: «Performance analysis of HomePlug 1.0 MAC with CSMA/CA». *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2006, **24(7)**, pp. 1411–1420.
- CISPR-22: «Information technology equipment. Radio disturbance characteristics. Limits and methods of measurement». *International standar*, International Electrotechnical Commission, 2006.
- CODENSA: «Likinormas», 2014.
<http://www.likinormas.micodensa.com>
- CORINEX: «Corinex SmartGrid Connectivity», 2014.
<http://www.corinex.com/series/smartgrid-netman-0>
- CREG: «Documento CREG 014 - 2007. Comentarios a la consulta de la Resolución CREG-107 DE 2006.» *Informe técnico*, Comisión de Regulación de Energía y Gas., Bogotá, 2007.
- CREG-070: «Por la cual se establece la metodología para la implementación de los Planes de Reducción de Pérdidas No Técnicas en los Sistemas de Distribución Local». *Resolución*, Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá, 1998.
- CREG-108: «Por la cual se somete a consideración de los agentes, usuarios y terceros interesados las disposiciones mediante las cuales se regulará la prestación del servicio en barrios subnormales.» *Resolución*, Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá, 1997.
- CREG-172: «Por la cual se establece la metodología para la implementación de los Planes de Reducción de Pérdidas No Técnicas en los Sistemas de Distribución Local». *Resolución*, Comisión de Regulación de Energía y Gas, Bogotá, 2011.
- CRESPO, C y CASTAÑO, D.: «Estudio de la modulación OFDM y de los efectos no lineales mediante simulación en Matlab». En: *Proyecto fin de carrera. Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros*, , 2008.
- DE BEER, A.S.; EMLEH, A.; FERREIRA, H.C. y VINCK, A.J.H.: «Effects of LED lamps on the power-line communications channel». En: *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2013 17th IEEE International Symposium on*, pp. 209–213, 2013.
- DÍAS, F.: «Retos e impulsores de las Smart Grids en el mundo», 2013.
- DOSTERT, K: «Telecommunications over the power distribution grid, possibilities and limitations». *Proceedings of the International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications*, 1997, pp. 1–9.
- DZUNG, D.; BERGANZA, I. y SENDIN, ALBERTO: «Evolution of powerline communications for smart distribution: From ripple control to OFDM». En: *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 474–478, 2011.
- ECHEVERRI, D. y MADERA, V.: «PLC (Power Line Communication)». *Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería*, 2008.

- ECHEVERRI, D. y MADERA, V.: «Power Line Communication». *Tesis, Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad de Antioquia*, 2013.
- EIA/CEA-709.1: «Device Plug-In Interface to EIA/CEA-709.1 Network Tools». *International standar*, CEA, 2002.
- EMLEH, A.; DE BEER, A.; FERREIRA, H. y VINCK, A.H.: «Effects of plasma lamps on the power-line communications channel». En: *ELMAR, 2013 55th International Symposium*, pp. 125–128, 2013.
- EMLEH, A.; DE BEER, A.S.; FERREIRA, H.C. y VINCK, A.J.H.: «The influence of fluorescent lamps with electronic ballast on the low voltage PLC network». En: *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*, pp. 276–280, 2014.
- EN-1434-3: «Communication system for and remote reading of meters - Part. 3: Dedicated application layer (M-Bus)». *European standar*, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2002.
- EN-50065-1: «Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz - Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances». *International standar*, European Committee for Electrotechnical Standardization, 1991.
- EN-50561-1: «Power line communication apparatus used in low-voltage installations - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement - Part 1: Apparatus for in-home use». *International standar*, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2013.
- ENDESA: «El contador inteligente», 2012.
<http://www.endesasmartgrids.com/index.php/es/la-casa-inteligente/el-contador-inteligente>
- ESMERALDO, P.C.V.; AMON F, J.; CARVALHO, F.; CARVALHO, A.C.C. y MORAIS, S.A.: «Circuit-breaker requirements for alternative configurations of a 500 kV transmission system». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1999, **14**(1), pp. 169–175.
- FERC: «Assessment of Demand Response & Advanced Metering». *Staff report*, Federal Energy Regulatory Commission, 2008.
- G3-PLC: «What is G3-PLC?», 2014.
<http://www.g3-plc.com/>
- GALLI, S.; SCAGLIONE, A y WANG, ZHIFANG: «For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid». *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(6), pp. 998–1027.
- GARCES, D.: «Teoría y modulación OFDM y software interactivo de simulación en MatLab». *Tesis, Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad de Antioquia*, 2006.

- GARCÍA, J.: «Tecnologías de última milla para localidades con baja densidad poblacional». *Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Mandoza*, 2008.
- GUILLEN, E.; LOPEZ, J. y BARAHONA, C: «Throughput Analysis over Power Line Communication Channel in an Electric Noisy Scenario». En: *World Academy of Science, Engineering and Technology*, , 2008.
- GUZELGOZ, S.; GUZEL, T. y ARSLAN, H: «Time frequency analysis of noise generated by electrical loads in PLC». En: *Telecommunications (ICT), 2010 IEEE 17th International Conference on*, pp. 864–871, 2010.
- HAIDINE, A. y LEHNERT, R.: «Broadband Powerline Communications Networks-Network Design», 2004.
- HAYKIN, S.: «Communication Systems». En: *Wiley Sons*, , 2000.
- HERNÁNDEZ, G.: «Multipath Model Analysis in Power Line Carrier Channels». En: *Revistas GTI*, pp. 55–66, 2010.
- HOMEPLUG: «HomePlug 1.0 Specification». *Informe técnico*, HomePlug Alliance, 2001.
- HRSANICA, H.; HAIDINE, A. y LEHNERT, R: «Broadband Power line Communications Networks». En: *John Wiley Sons Ltd*, p. 273, 2004.
- IBED: «IBEC Broadband over Power Line (BPL) Network Diagram», 2014.
<http://www.ibed.net>
- IEC-60870: «Telecontrol equipment and systems». *International standar*, IEC, 1990.
- IEC-61000-4-19: «Electromagnetic compatibility (EMC) â Part 4-19: Testing and measurement techniques â Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signalling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports». *International standar*, IEC, 2013.
- IEC-62056-21: «Electricity metering - Data exchange for meter reading, tariff and load control». *International standar*, IEC, 2002.
- IEEE-1901: «Boardband Power Line Standard for 500 Mbps Communications Approved». *International standar*, IEEE Smart Grid, 2010.
- IEEE-1901.2: «IEEE Standard for Low Frequency (less than 500 kHz) Narrow BandPower Line Communications for Smart Grid Application». *Informe técnico*, IEE, 2013.
- IEEE-STD-1901: «IEEE Standard for Broadband over Power LineNetworks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications», 2010, pp. 1–1586.
- ITU: «Communiqué: ITU Approves New Worldwide Smart Grid Standards. Narrowband Power-line Communications Standards Kick-Start Market». *Informe técnico*, International Telecommunication Union (ITU), 2013.

- KORKI, M.; HOSSEINZADEH, N.; VU, H.L.; MOAZZENI, T. y FOH, CHUAN HENG: «A channel model for power line communication in the smart grid». En: *Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES*, pp. 1–7, 2011.
- KUNDUR, P.: «Power system stability and control». *McGraw-Hill*, 1994.
- LANDYS+GYR: «Gridstream PLX», 2014.
<http://www.befutureready.com/plx/Landis-and-Gyr-PLX-Overview.pdf>
- LEÓN, R. y GOMEZ, J.: «Sistema de Respaldo Nacional ante Eventos de Gran Magnitud â SIRENA». *PREMIO ASOCODIS - CNO*, 2012.
- LESCALE, V.F.; MENZIES, D.; WEIMIN, MA y ZEHONG, LIU: «The Xiangjiaba-Shanghai 800 kV UHVDC project, status and special aspects». En: *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, pp. 1–6, 2010.
- MAENOU, T. y KATAYAMA, M.: «Study on Signal Attenuation Characteristics in Power Line Communications». En: *Power Line Communications and Its Applications, 2006 IEEE International Symposium on*, pp. 217–221, 2006.
- MAK, SIOE THO y MOORE, THOMAS G.: «TWACS??, A New Viable Two-Way Automatic Communication System for Distribution Networks. PART II: Inbound Communication». *Power Engineering Review, IEEE*, 1984, **PER-4(8)**, pp. 51–51.
- MALACK, J.A. y ENGSTROM, J.R.: «RF Impedance of United States and European Power Lines». *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, 1976, **EMC-18(1)**, pp. 36–38.
- MANEERUNG, A; SITTICHIVAPAK, S. y HONGESOMBUT, K.: «Application of power line communication with OFDM to smart grid system». En: *2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, volumen 4, 2011.
- MARVELL-TECHNOLOGY-GROUP: «Broadband Products», 2014.
<http://www.marvell.com>
- MENDEZ, D.: «Tecnología Powerline». *Curso de Doctorado - Ingeniería de Sistemas y Automática*, 2002.
- MENG, H.; CHEN, S.; GUAN, Y.L.; LAW, C.L.; SO, P.L.; GUNAWAN, E. y LIE, T.T.: «Modeling of transfer Characteristics for the broadband power line communication channel». *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, **19(3)**, pp. 1057–1064.
- MESOAMÉRICA, PROYECTO: «Interconexión Eléctrica Panamá-Colombia», 2014.
http://www.proyectomesoamerica.org/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=173&Itemid=102
- METERS y MORE: «Meters and More Technology», 2014.
<http://www.metersandmore.com/technology/>

MINTIC: «Vive digital Colombia», 2015.

<http://http://www.mintic.gov.co>

MONSALVE, A. y CEBALLOS, E.: «Power Line Communication - Software: Apropiación teórica y metodología de implementación, evolución de costos y aplicación». *Tesis, Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad de Antioquia*, 2006.

MPT-1570: «Radiation Limits and Measurement Specificationl. Electromagnetic radiation in the range 9 kHz to 1.6 MHz from material substances forming part of a telecommunication system». *Informe técnico*, Radiocommunications Agency, London, 2003.

NACIONAL, UNIVERSIDAD: «Matriz DOFA», 2012.

http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2008868/lecciones/capitulo_2/cap2lecc2_3.htm

NETGEAR: «Connect with Innovation», 2014.

<http://www.netgear.es/>

NTC-2050: «Código Eléctrico Colombiano NTC 2050», 2014.

NTC-4440: «Equipos de medición de energía eléctrica. Intercambio de datos para la lectura de medidores, tarifa y control de carga. Intercambio de datos locales directos». *Norma técnica colombiana*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, 2014.

NTC-5648: «Medición de energía eléctrica. Sistemas de pago. Requisitos particulares. Medidores de pago estáticos para energía activa (Clase 1 y 2)». *Norma técnica colombiana*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, 2008.

NTC-5907: «Mediciones De Electricidad. Sistemas De Pago. Especificación De Transferencia Estandar (STS). Protocolo de la capa de aplicación para sistemas portadores de códigos en una sola dirección». *Norma técnica colombiana*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, 2014.

NTC-5908: «Medidores de electricidad. Sistemas de pago. Especificación De Transferencia Estandar (STS). Protocolo de nivel físico para portadores de código de tarjeta magnética». *Norma técnica colombiana*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, 2014.

OPEN-METER: «D.5.2.3.2. Communication Profile: PLC based on B-PSK for the Meters and More suite». *Informe técnico*, OPEN Meter - Open Public Extended Network Metering, 2011a.

OPEN-METER: «D.5.3.3. PLC lower layers on B-PSK for the Meters and More suite». *Informe técnico*, OPEN Meter - Open Public Extended Network Metering, 2011b.

PAGANI, P.; RAZAFFERSON, R.; ZEDDAM, A.; PRAHO, B.; TLICH, M.; BAUDAIS, J.; MAIGA, A.; ISSON, O.; MIJIC, G.; KRIZNAR, K. y DRAKUL, S.: «Electro magnetic compatibility for Power Line Communications». En: *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pp. 2799–2804, 2010.

- PAKONEN, P.; PIKKARAINEN, M.; SIDDIQUI, B. y VERHO, P.: «Electromagnetic compatibility between electronic loads and automated meter reading systems using PLC». En: *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*, pp. 1–4, 2013.
- PATIÑO, M.: «Caracterización de la red de suministro de un edificio para su aprovechamiento como medio de transmisión de información». *Tesis, Facultad de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia*, 2006.
- PAZ, H.: «Ruido e interferencia en canales de comunicaciones por línea de distribución eléctrica». *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, 2008.
- PEÑA, H.: «Infraestructura de Medición Avanzada :Tecnología seleccionada y expectativas en el SDL de EMCALI EICE ESP», 2012.
- PENAGOS, H.: «Sistema de Comunicación de datos a través de la red eléctrica domiciliaria». *Revista, Universidad de los Andes*, 2013.
- PENAGOS, H.; CASTELLANOS, G.; ALARCÓN, R.; WEISS, V.; RODRIGUEZ, J. y RINCÓN, L.: «Diseño e implementación de una red Domótica para un laboratorio de Ingeniería Electrónica». *Informe técnico, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, 2006.
- PÉREZ, V.: «Estudio preliminar sobre la viabilidad de la implementación de medidores inteligente de energía en los estratos 1,2 y 3 de Cali». *Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle*, 2013.
- PRIME: «Interoperable Standard for Advanced Meter Management & Smart Grid», 2014.
<http://www.prime-alliance.org/>
- REINOSA, J.: «Análisis y estudio de la red eléctrica de media tensión de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá como medio de transmisión de servicio portador e identificación de aportes de la tecnología PLT a la mitigación del cambio climático». *Tesis, Facultad de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Universidad Nacional de Colombia*, 2012.
- SCHWARTZ, M.: «Carrier-wave telephony over power lines: Early history [History of Communications]». *Communications Magazine, IEEE*, 2009, **47(1)**, pp. 14–18.
- SERNA, V.: «Comunicaciones a través de la red eléctrica a PLC». *Revista Española de Electronica*, 2011.
- SILVA, L. y NUÑEZ, M.: «Análisis de las técnicas de modulación GMSK y OFDM aplicadas a los sistemas de comunicación sobre las líneas de distribución de energía eléctrica o tecnología PLC», 2008.
- SUAREZ, E. y CARDENAS, B.: «Estudio de Factibilidad de una red Híbrida Wi-Fi - BPL». *Tesis Pregrado, Universidad Católica de Loja, Escuela de Eléctrica y Telecomunicaciones*, 2011.
- SUREKHA, T.; ANANTHAPADMANABHA, T. y PUTTAMADAPPA, C.: «Analysis of effect of power line channel characteristic parameters in broadband power line communication (BPLC) systems». *Power Systems Conference and Exposition*, 2009, pp. 1–6.

- TIA-1113: «Medium -Speed (Up to 14 Mbps) Power Line Communications (PLC) modems using OFDM». *Informe técnico*, Telecommunications Industry Association, 2008.
- TLICH, M.; CHAOUICHE, H.; ZEDDAM, A y PAGANI, P.: «Novel approach for PLC impulsive noise modelling». En: *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*, pp. 20–25, 2009.
- TREYT, L A.; SAUTER, T. y BUMILLER, G.: «Power-Line Communications: Smart Grid, Transmission, and Propagation». *Institute of Computer Technology*, 2003.
- VESGA, J: «Power Line Communications: una perspectiva emergente en telecomunicaciones», 2008.
- VINES, R.M.; TRUSSELL, H.J.; SHUEY, K.C. y O’NEAL, JR., J.B.: «Impedance of the Residential Power-Distribution Circuit». *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, 1985, **EMC-27(1)**, pp. 6–12.
- VO, T.N.; AMIS, K.; CHONAVEL, T.; SIOHAN, P. y PAGANI, P.: «Influence of interference in MIMO power line communication systems». En: *Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2014 18th IEEE International Symposium on*, pp. 255–260, 2014.
- VU, K.; BEGOVIC, M.M. y NOVOSEL, D.: «Grids get smart protection and control». *Computer Applications in Power, IEEE*, 1997, **10(4)**, pp. 40–44.
- WANG, SHAOBU; MENG, XIANGYU y CHEN, TONGWEN: «Wide-Area Control of Power Systems Through Delayed Network Communication». *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 2012, **20(2)**, pp. 495–503.
- YAHOO: «Yahoo Mapas», 2014.
<https://www.espanol.maps.yahoo.com/>
- ZIMMERMANN, M. y DOSTERT, K.: «Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications». *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, 2002, **44(1)**, pp. 249–258.

Control y Automatización en las Redes Inteligentes

Actualmente la mayor cantidad de tecnologías aplicadas a las redes eléctricas se encuentra en transmisión. Este tipo de tecnologías convierten las convencionales redes eléctricas en redes inteligentes. Algunos de las tecnologías utilizadas en estas nuevas redes son:

- Sistemas Flexible de Transmisión AC (FACTS)
- Supervisión,Control y Adquisición de Datos (SCADA)
- Unidad de Medición Fasorial (PMU)
- Sistemas de Control de Área Extensa (WAMS)
- Sistemas de Transmisión de Alta Tensión en Corriente Continua (HDVC)

A.1. Sistemas Flexible de Transmisión AC (FACTS)

FACTS, por sus siglas en inglés (Flexible Alternating Current Transmission System), está compuesto de equipos estáticos utilizados para la transmisión de energía eléctrica AC, basado en electrónica de potencia, que tienen como objetivo principal mejorar la capacidad de control y aumentar la capacidad de transferencia de energía de la red y modificar los parámetros que regulan la potencia eléctrica, limitando los efectos de la generación y el consumo de la energía reactiva. Los sistemas principales son SVC (Compensador estático), TCSC (Condensador en serie, fijo y controlado por tiristores), PST (Transformadores de desplazamiento de fase), STATCOM (Compensador estático síncrono), SSSC (Compensador en serie estático síncrono), UPFC (Controlador unificado de flujo de energía) [ABB \(1999\)](#).

Las aplicaciones básicas de los dispositivos FACTS son: Control de flujo de potencia, incremento de la capacidad de transmisión, control de voltaje, compensación de energía reactiva e interconexión de generación renovable y distribuida.

A.2. Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)

Es un software que permite controlar y supervisar procesos a distancia. Facilita el análisis en tiempo real de las condiciones de la red y controla el proceso automáticamente mediante dispositivos de campo (sensores y actuadores).

Los tres componentes de un sistema SCADA son:

- Múltiples Unidades de Terminal Remota (RTU).
- Estación Maestra y Computador con HMI.
- Infraestructura de Comunicación.

A.3. Unidad de Medición Fasorial o sincrofasor (PMU)

Es un dispositivo utilizado para la observación con precisión del estado dinámico del sistema eléctrico. La PMU obtiene los datos de los transformadores de potencial y de corriente para luego ser procesados para obtener los fasores de tensión y corriente y después ser enviados al concentrador de datos que los recibe los organiza y distribuye.

A.4. Sistemas de Control de Área Extensa (WAMS)

Es un sistema de mediciones distribuidas en el sistema eléctrico de potencia que involucra mediciones sincrofasoriales (Unidades de medición Fasorial PMU), capaces de analizar con gran rapidez las anomalías en la calidad de energía eléctrica en áreas geográficas muy grandes para prevenir el desarrollo de inestabilidad peligrosa en la red.

Las Unidades de medición Fasorial se integran, a través de Concentradores de Datos Fasoriales (PDC) en sistemas de Monitoreo de Área Amplia para informar sobre el estado actual de la red facilitando las tareas de planificación y gestión de las operaciones sobre la red eléctrica Wang y otros (2012).

En Colombia, XM presentó en 2007 el proyecto Sistema de Respaldo Nacional (SIRENA) que buscaba implementar estrategias e infraestructuras que permitieran ejercer control y protección del Sistema de Transmisión Nacional para prevenir y mitigar la ocurrencia de eventos de gran magnitud en respuesta al apagón sufrido en Abril del 2007.

Algunos de los objetivos planteados en el proyecto SIRENA se resumen a continuación León y Gomez (2012):

- Uso de última tecnología en monitoreo de sistemas de potencia con Unidades de Medición Fasorial
- Uso de nuevos métodos de análisis y simulación de sistemas de potencia

- Implementación de sistemas WAMS
- Estimación de estado en tiempo real sin cálculos iterativos
- Monitoreo del estado global de la red eléctrica
- Monitoreo de Estabilidad en tiempo real
- Aproximación a tecnologías de Smart Grids en el SIN

El sistema prototipo de medición fasorial sincronizada implementado por XM dentro del proyecto SIRENA contemplaba la supervisión de 12 subestaciones del STN, tal y como se ilustra en la Figura A-1

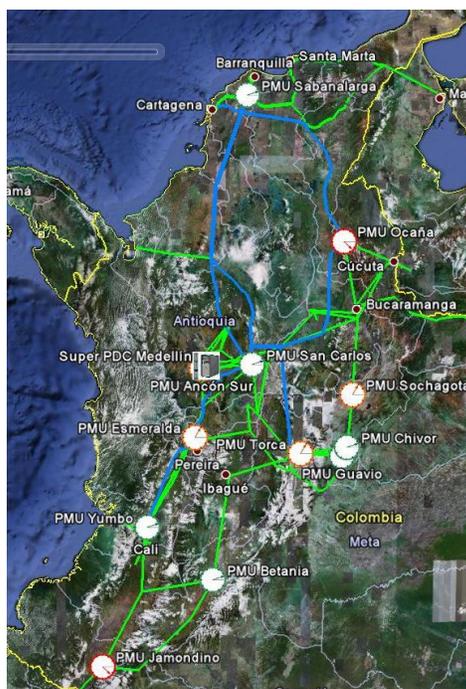


Figura A-1: Localización de PMU en el Prototipo WAMS León y Gomez (2012)

El Proyecto Sistema Inteligente de Supervisión y Control Avanzado de tiempo real (iSAAC por su nombre en inglés) tenía como objetivo diseñar la arquitectura, el ecosistema funcional y un prototipo para los futuros sistemas de supervisión y control en tiempo real, proponiendo una visión hacia una evolución radical de los sistemas SCADA/EMS.

A.5. Sistemas de Transmisión de Alta Tensión en Corriente Continua (HDVC)

Una alternativa para el control de flujo de energía, es la transmisión de alta tensión en corriente directa (DC) conocido como HVDC por sus siglas en inglés (High Voltage Direct Current). Como la corriente continua no tiene frecuencia de oscilación, la potencia transmitida es potencia activa en su totalidad, lo que marca una gran diferencia en la transmisión de energía, tanto desde el punto de vista de pérdidas como de estabilidad. [ABB \(2014a\)](#)

La red CA alimenta el convertidor que opera como rectificador. La salida del rectificador es corriente DC independiente de la frecuencia y fase de la red. De esta forma la energía es transmitida en DC, aérea, subterránea o submarina, por largas distancias hasta otro convertidor que opera como inversor, que convierte la energía nuevamente de DC a AC.

Este tipo de tecnología tiene algunas ventajas sobre la transmisión de CA en varias aplicaciones [Kundur \(1994\)](#):

- Capacidad de transmisión más alta con el mismo tamaño de conductor. Mayor capacidad de transmitir potencia por conductor, ya que no transportan energía reactiva
- Control sobre la tensión y la dirección del flujo de potencia
- Alta disponibilidad y confiabilidad
- Transmisión a través de cables subacuáticos de grandes distancias
- Conexión de redes asincrónicas de diferentes frecuencias.
- Las pérdidas en la línea son menores para CC que para CA, en función de la longitud, a partir de 600-800 km para líneas aéreas el coste total de la línea en continua (entendido como la suma del coste de las estaciones de conversión y los cables de transmisión) es menor que en alterna

Algunos de los proyectos mas destacados en el mundo construidos con tecnología HVDC son el enlace Xiangjiaba-Shanghai, línea de longitud 2071 kilometros, ± 800 kV, 6400 MW [Lescale y otros \(2010\)](#), y el sistema HVDC Rio Madeira, construido para exportar energía a partir de nuevas centrales hidroeléctricas en el río Madeira, en la cuenca del Amazonas hasta los principales centros de carga en el sureste de Brasil . El sistema consta de dos estaciones convertoras en Porto Velho y Araraquara, interconectados por dos líneas de transmisión de ± 600 kV. La longitud de la línea es de 2.375 kilometros, convirtiendose en una de las más largas en el mundo [Esmeraldo y otros \(1999\)](#).

En Colombia, el proyecto de interconexión Colombia - Panamá consiste en una línea de transmisión eléctrica desde la Subestación Cerromatoso hasta la subestación Panamá II, sera desarrollado con la tecnología HVDC con una longitud aproximada de 600 kilometros y su capacidad de transporte de energía de hasta 400 MW. Los estudios y actividades de este proyecto han sido realizadas desde el año 2003, por la empresa Interconexión Eléctrica Colombia Panamá -ICP,

constituida por las empresas Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P -ISA- de Colombia y Transmisión Eléctrica S.A. -ETESA- de Panamá.

Fabricantes de equipos

A pesar de la creciente utilización de sistemas de comunicaciones digitales - especialmente las que emplean enlaces de fibra óptica - PLC sigue siendo a menudo la solución más rentable y fiable, para cubrir las necesidades operativas de un sistema de energía. Esto se aplica particularmente cuando sólo bajos volúmenes de datos tienen que ser transmitidos a través de largas distancias.

Actualmente existen muchos fabricantes de equipos PLC, a continuación se mencionan algunos:

- Adaptive Networks
- Ambient
- Amperion
- Corinex Communications Corp.
- DS2
- Intellon
- Netgear
- Motorola
- Schneider Electric

Estos fabricantes ofertan de manera adicional a los elementos básicos empleados en una red PLC, filtros, acoples capacitivos e inductivos y software para gestión de la información.

Los chips que utilizan los equipos mencionados anteriormente en su mayoría son fabricados por la empresa DS2 ahora Marvell Technology Group Ltd.

B.0.1. Corinex Communications Corp

Corinex Communications Corp. desarrolla y fabrica las soluciones de comunicaciones de última generación que responden a necesidades globales de comunicación de bajo costo para aplicaciones

de banda ancha y SmartGrid. Los operadores de telecomunicaciones, empresas de servicios, integradores de sistemas y usuarios domésticos han implementado los productos Corinex por todo el mundo. Corinex Powerline networking es la creación de redes de comunicaciones sobre el cableado eléctrico existente. Corinex, ofrece tecnologías y servicios de consultoría en el sector de la energía, desarrolla y fabrica soluciones complejas para proyectos de infraestructura de Smart Metering y Smart Grid, con un enfoque principal en BB-PLC. Pioneros de la industria de la tecnología BB-PLC, con más de 1 millón de módulos en todo el mundo hasta el momento.

Corinex tiene una participación del mercado Powerline de 48 % en todo el mundo (In-Stat/MDR) y 40 % en América del Norte (Frost Sullivan). Otorgado por Frost Sullivan como mejor compañía de productos en la industria Powerline y 3 veces ganador del premio Retail Vision.

Principales Socios y clientes:

- Residencial: Telefónica, Belgacom, OTE, Teleste, British Telecom, Telecom Portugal.
- Acceso: Electro-com, Vodacom, Universidad de Columbia
- Vehículos Eléctricos: Proyecto de la Unión Europea con Fiat, Volvo, Itron, ETSI.
- Empresas Eléctricas: BC Hydro, CEZ, Bedas, CenterPoint Energy, Edenor, EDF, Endesa, Cemig, Centrosur, Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Empresa Eléctrica Quito, FEWA, Iberdrola, Latvenergo, MEA, PEA, Hydro Quebec, Chilectra. : Graybar, IBM, NESS, Nokia Siemens Networks, Synapsis, Alcatel-Lucent

Corinex ofrece una solución integrada de software para AMI y SmartGrid basado en la tecnología BPL y la comunicación BB-PLC para los líderes fabricantes de medidores incluyendo módulos de comunicación para medidores. Despliegues de Corinex son fáciles y sin riesgos con el software Corinex SmartGrid Connect **Corinex (2014)**.

Entre sus productos mas vendidos se encuentran los siguientes:

- Homeplug AV200, extiende la cobertura inalámbrica a cualquier toma eléctrica en el hogar, combinando HomePlug AV y Wifi. Este producto soporta 200Mbps.
- HD200 HomeNet Power-Dual Pack, puede usarse para crear redes caseras mejoradas, soportando múltiples tramas de señales de video, audio, etc, sin presentar problemas de retraso o pérdidas y con una velocidad hasta 200 Mbps.
- Corinex Smart Grid 200 Gateway, es el último desarrollo en tecnología de PLC que ofrece la comunicación inteligente para aplicaciones Smart Grid y Advanced Metering que utilizan la comunicación PLC de 200Mbps.
- Corinex BPL Smart Meter Module, El módulo de comunicación Corinex CXM-SG200-IAM está destinado para el uso con medidores Landis + Gyr.
- Corinex Smart Grid Connect (SGC), es un robusto software (cliente / servidor), que permite medición avanzada a través de los datos del medidor en tiempo real. Corinex Smart Grid Connect está diseñado para ofrecer a las empresas de servicios públicos potentes herramientas para la gestión de datos.

B.0.2. ABB

Con décadas de participación exitosa en el PLC, ABB sigue demostrando sus altos estándares técnicos y competencia al permanecer a la vanguardia del desarrollo de PLC. ABB ofrece las últimas tecnologías para sistemas PLC [ABB \(2014b\)](#).

Entre las soluciones ofrecidas por ABB se encuentran los siguientes equipos:

- Universal Power Line Carrier System (ETL600), es una solución avanzada PLC para la transmisión de señales de voz, datos y órdenes de protección a través de líneas de transmisión de alto voltaje. ETL600 también garantiza la compatibilidad con el medio ambiente y una buena integración en las infraestructuras de telecomunicaciones digitales modernas.
- Power Line Carrier Coupling Filter (MCD80), dispositivos de acoplamiento modular que se utilizan para conectar los terminales de la línea eléctrica del portador como ETL500 a través de CVT a las líneas eléctricas de alta tensión. MCD80 ofrece una acople óptimo, la separación de frecuencia de la red y el aislamiento seguro de los equipos.

B.0.3. DS2

Diseño de Sistema en Silicio, S.A. (DS2) diseña y comercializa chips para el desarrollo de un nuevo medio de telecomunicación que permite la transmisión de datos, voz y vídeo a alta velocidad por la red eléctrica. DS2 es actualmente el proveedor líder mundial de estos chips con velocidades muy superiores a las ofrecidas por las tecnologías actuales.

DS2 inició sus pasos en el Centro Europeo de Empresas Innovadoras (CEEI) del Parque tecnológico de Paterna (valencia) en 1998 y fue fundada con capital privado de inversores locales y con el apoyo de la Administración Pública.

En 2010, el grupo tecnológico multinacional Marvell, se quedó con los activos y los derechos de propiedad intelectual de la compañía valenciana Diseño de Sistemas de Silicio (DS2), firma que logró situarse a mediados de la pasada década entre los líderes mundiales en la fabricación de chips para la transmisión de datos por la red eléctrica [Marvell-Technology-Group \(2014\)](#).

B.0.4. Amperion Connect

El sistema Amperion Connect ofrece un conjunto de productos de hardware y software que permite servicios de acceso a banda para usuario residencial y corporativo, backbone y servicios propios para las empresas. Los equipos Amperion ofrecen de 15 a 20 Mbps a lo largo de la red de media tensión. Amperion Connect™ utiliza un patrón de 802.11b en los puntos de acceso del cliente (Repetidor/Extractor o Extractores), lo cual tiene una cobertura con rango de aproximadamente 182 metros (600 ft). Si se utilizan antenas unidireccionales en el CPE (Customer Premises Equipment) el rango puede ser extendido hasta 305 metros (1000 ft) [Amperion \(2014\)](#).

B.0.5. Siemens Corporation y BPL Global

Estas dos fuertes compañías a nivel mundial expanden su relación en Norte América para ofrecer un portafolio de redes inteligentes.

BPL Global (BPLG) ofrece un conjunto de soluciones de redes inteligentes para la automatización de redes de distribución y subestaciones, integran soluciones de redes inteligentes, incluyendo sistemas de administración, sistemas SCADA

B.0.6. Netgear

NETGEAR comenzó a operar en Estados Unidos en el año 1996, desde entonces, NETGEAR ha continuado como compañía independiente centrandó su negocio en el diseño y desarrollo de todo tipo de soluciones para el mercado de redes. Además de consolidar y ampliar su mercado en Estados Unidos y Asia, la compañía se ha expandido por Europa abriendo oficinas comerciales en la mayoría de los países del viejo continente. NETGEAR ofrece productos de red inalámbricos, Internet a través de una amplia gama de routers, gateways, switches, y tarjetas

NETGEAR ofrece una amplia gama de equipos de red eléctrica y adaptadores para casi cualquier necesidad de vivienda o negocio. Uno de los métodos más sencillos para la creación de una red integrada es a través de la utilización de la línea eléctrica existente en el hogar o la oficina y los innovadores adaptadores Ethernet powerline disponibles en NETGEAR. Dependiendo de las necesidades específicas de los usuarios, los adaptadores NETGEAR pueden alcanzar velocidades de 85 Mbs hasta 500 Mbs **NETGEAR (2014)**.

Medición de SNR en el circuito piloto de Codensa

El resultado completo de las mediciones realizadas durante la realización de este trabajo son presentadas en este anexo.

De acuerdo con la experiencia de [Corinex \(2014\)](#) para la instalación de proyectos PLC, un valor típico de ruido de piso -110 dB y las pérdidas asociadas por longitud es de 4 dB por cada 30 metros, estos valores fueron utilizados para el análisis de SNR en cada uno de los usuarios de la red y son una buena aproximación para el diseño de una red PLC. Mediante este análisis también se comprueba la posibilidad de incluir repetidores en puntos estratégicos para poder llegar con un nivel de señal mejor a los usuarios extremos. En Italia el valor de ruido es de aproximadamente 50 dbuV, y en general tiene que ser menor de 80 dbuV para fines de comunicación.

El valor de la medición de ruido de piso fue el promedio de las mediciones realizadas en algunos puntos del circuito piloto utilizado (tabla [C-1](#)).

Tabla **C-1**: Valores de ruido medidos en campo

Número de medición	Ruido de piso (dB)
1	-45.179
2	-45.469
3	-44.804
4	-46.902
...	...
9	-47.647
10	-46.226
Promedio	-46.348

Para el análisis de SNR en el sistema se tuvieron algunas consideraciones iniciales

- Ruido de piso en PLC medido: -46.348 dB
- Pérdidas por longitud: 2dB por cada 30.48 mts

- Nivel de señal del receptor (SNR): 28dB

Utilizando los parámetros anteriores se realizó el análisis de SNR en puntos específicos de la red donde se tienen problemas de comunicación. A continuación se mencionan las ecuaciones utilizadas para calcular el SNR en cada uno de los medidores del circuito:

- Pérdidas por bifurcaciones (dB) = $10 \cdot \log(N)$ donde (N) es el número de ramas
- Pérdidas por transmisión (dB) = $(\text{longitud (mts)} \cdot 2 \text{ dB perdidas por metro}) / 30.48$
- Pérdidas totales (dB) = Pérdidas por bifurcaciones - Pérdidas por transmisión
- Nivel del Receptor = Potencia señal del transmisor - Pérdidas totales
- SNR (dBm/Hz) = Nivel del Receptor - Ruido de piso

La evaluación de las mediciones de SNR presentada a continuación se realizó de acuerdo a criterios utilizados por parte de Corinex para el diagnóstico previo antes de la instalación de proyectos de medición inteligente. Los rangos de evaluación utilizados son los siguientes:

Tabla C-2: Rangos de evaluación utilizados

Figura	Rango de evaluación	Comentarios
	$SNR \geq 15$	Margenes buenos - Se puede establecer enlaces entre el concentrador y el medidor
	$15 < SNR \leq 5$	Margenes cuestionables - Se desconoce si pueda establecerse una comunicación entre el concentrador y el medidor
	$SNR < 5$	Margenes malos - No se puede establecer comunicación entre el concentrador y el medidor

Otra evaluación mostrada en la siguiente tabla es la pérdida total en cada uno de los medidores. Se muestra una escala de verde hasta rojo, siendo rojo el valor más alto.

Medidor	Longitud (m)	Datos calculados					Datos medidos			
		Señal salida (dBm/Hz)	Ruido de piso (dBm/Hz)	Total pérdidas (dB)	Nivel del receptor (dBm/Hz)	SNR (dBm/Hz)	Total pérdidas (dB)	Nivel del receptor (dBm/hz)	SNR (dBm/Hz)	
17001	89,19	-10,7945	-47,6474	10,624	-21,418	26,229	10,333	-21,127	26,520	
17002	166,72	-10,7000	-47,3573	23,492	-34,192	13,165	22,935	-33,635	13,722	
17003	166,72	-10,7971	-46,2265	23,244	-34,041	12,185	22,692	-33,489	12,737	
17004	89,19	-10,7400	-44,9738	8,863	-19,603	25,371	13,157	-23,897	21,077	
17005	171,04	-10,7900	-46,2095	19,005	-29,795	16,415	-	-	-	
17006	188,09	-10,1094	-46,3480	21,373	-31,482	14,866	9,964	-20,721	25,627	
17007	171,04	-10,1094	-46,3480	19,674	-29,784	16,564	-	-	-	
17008	190,09	-10,1094	-46,3480	22,016	-32,125	14,223	-	-	-	
17009	171,72	-10,1094	-46,3480	23,309	-33,418	12,930	-	-	-	
17010	135,24	-10,1094	-46,3480	20,335	-30,445	15,903	-	-	-	
17011	114,23	-10,1094	-46,3480	13,516	-23,625	22,723	-	-	-	
17012	112,23	-10,7271	-47,4145	14,354	-25,081	22,334	12,008	-22,735	24,680	
17013	239,91	-10,8066	-46,2265	25,285	-36,091	10,135	22,918	-33,725	12,502	
17014	239,91	-10,1094	-46,3480	25,742	-35,852	10,496	-	-	-	
17015	239,91	-10,1094	-46,3480	26,156	-36,265	10,083	23,526	-33,635	12,713	
17016	239,91	-10,1094	-46,3480	26,534	-36,643	9,705	10,871	-20,980	25,368	
17017	146,95	-10,1094	-46,3480	15,663	-25,772	20,576	-	-	-	
17018	135,24	-10,1094	-46,3480	19,666	-29,775	16,573	-	-	-	
17019	120	-10,1094	-46,3480	16,325	-26,434	19,914	-	-	-	
17020	112,23	-10,1094	-46,3480	15,146	-25,255	21,093	-	-	-	
17021	4	-13,3800	-44,8045	3,273	-16,653	28,152	7,701	-21,081	23,723	
17022	93,8	-10,1094	-46,3480	13,145	-23,254	23,094	-	-	-	
17023	169,04	-10,1094	-46,3480	18,082	-28,191	18,157	11,004	-21,113	25,235	
17024	67,21	-10,1094	-46,3480	7,420	-17,530	28,818	9,735	-19,845	26,503	
17026	173,54	-10,1094	-46,3480	19,169	-29,278	17,070	-	-	-	
17027	150,95	-10,1094	-46,3480	18,936	-29,045	17,303	-	-	-	
17027	137,24	-10,1094	-46,3480	20,766	-30,876	15,472	-	-	-	
17028	147,95	-1,4701	-45,0000	16,698	-46,196	-1,196	44,726	-46,196	-1,196	
17029	243,91	-10,1094	-46,3480	27,144	-37,253	9,095	-	-	-	
17030	10	-13,4840	-46,3480	0,656	-14,140	32,208	7,733	-21,217	25,131	
17031	176,54	-10,1094	-46,3480	20,035	-30,144	16,204	-	-	-	
17032	162,95	-10,1094	-46,3480	15,463	-25,573	20,775	-	-	-	
17033	93,8	-10,1094	-46,3480	12,175	-22,285	24,063	-	-	-	
17034	95,8	-10,1094	-46,3480	11,057	-21,167	25,181	-	-	-	
17035	174,72	-10,1094	-46,3480	24,252	-34,362	11,986	-	-	-	
17036	133,24	-10,1094	-46,3480	19,882	-29,992	16,356	-	-	-	
17037	93,8	-10,1094	-46,3480	13,936	-24,046	22,302	-	-	-	
17038	95,8	-10,1094	-46,3480	14,737	-24,847	21,501	-	-	-	
17039	95,8	-10,1094	-46,3480	15,317	-25,426	20,922	-	-	-	
17040	95,8	-10,8890	-45,6150	15,829	-46,274	-0,659	35,307	-46,196	-0,581	
17041	71,21	-10,1094	-46,3480	7,683	-17,792	28,556	-	-	-	
17042	95,8	-10,1094	-46,3480	16,286	-26,396	19,952	-	-	-	
17043	95,8	-10,1094	-46,3480	16,700	-26,809	19,539	-	-	-	

Reporte de Conformidad según EN50160



PAAS - UN
CL 44 45-67 BL B5 OFIC 307
Bogotá, Postal Code 111321
TEL: ++ 57 310 3413482

<http://www.proyectospaas.unal.edu.co/webpaas/>

Reporte de Conformidad según EN50160

Fecha de medición: 16/12/2014 – 16/01/2015

"Características del Voltaje en los terminales de la red de Voltaje del Usuario: Límites y Valores"

Yefersson Cañon De Antonio
Grupo de Investigación PAAS UN
Calle 44 No. 45 – 67 BL B5 Ofic. 307
Bogotá, Colombia
57+1+3165000 Ext 10624, 14180
<http://www.paas.unal.edu.co>

Tipo de sistema
3-fases 4-lineas Estrella
120,00V 60Hz

<http://www.proyectospaas.unal.edu.co/webpaas/>

Resumen de los Resultados
EN50160 Conformidad
16/12/2014 – 16/01/2015

EN50160 Tabla de Requerimientos Aprobado-Fallido

EN50160 Sección	Parámetro de calidad de la energía	EN50160 Conformidad	Comentarios
4.2.1	Frecuencia	DESCONOCIDO	Los datos son incompletos Cobertura 98,4%
4.2.2	Las variaciones en el voltaje	DESCONOCIDO	Los datos son incompletos Cobertura 98,4%
4.2.3	Severidad del Parpadeo	APROBADO	
4.2.4	Desbalance de Voltaje	APROBADO	
4.2.5	Voltage THD	APROBADO	
4.2.5	Armónicos de voltaje	APROBADO	

EN50160 Tabla de información adicional

EN50160 Sección	Parámetro de calidad de la energía	Comentarios
4.2.2	Las variaciones en el voltaje	Datos solamente
4.2.7	Señalización de línea eléctrica	No se midió
		Datos solamente
4.3.1	Interrupciones	
4.3.2	Huecos	
4.3.3	Sobrevoltajes	

- Nota 1: Durante 16/12/2014 – 16/01/2015 las mediciones fueron realizadas 98,39% del tiempo
 Nota 2: Limites de Alta tensión (36 kV - 150 kV) fueron utilizados.
 Nota 3: Los datos marcados fueron excluidos de este reporte.

Instrumento utilizado: PQube® (www.PQube.com)
 Fabricante: Power Standards Lab, U.S.A.
 ID del PQube: (note not set)
 Lugar: PQUBE_01
 Número de serie: P003709
 Revisión de firmware: 2.1.4 2893
 Certificado de calibración: <http://www.PowerStandards.com/CalibCerts/P003709.pdf>
 Software de informe: PQube Creador de Reporte 2.1.18.0
 Autor del Reporte: PAAS - UN
 Nombre: Yefersson Cañon De Antonio

Información del cliente

Nombre: H. Andrés Díaz D.
 Empresa: Codensa
 Dirección: Cra 13 A No 93 - 66, piso 4
 Ciudad: Bogotá, Colombia
 Teléfono: +57 1 6016032
 Sitio Web:



Foto 1 -

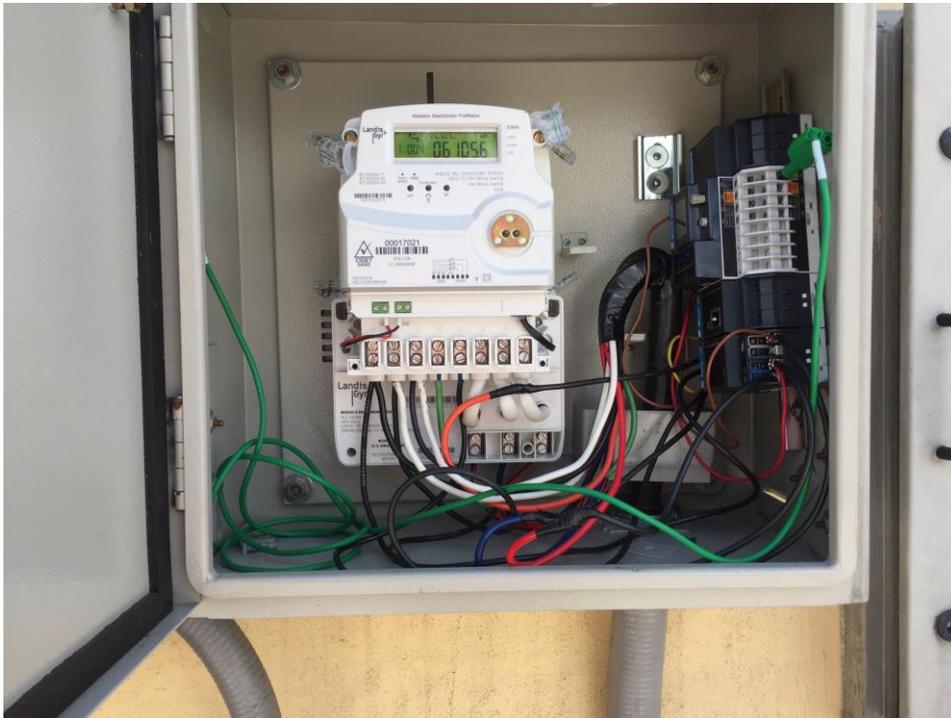


Foto 2 -

EN50160 4.2.1: Frecuencia

Frecuencia Nominal:

60,00Hz

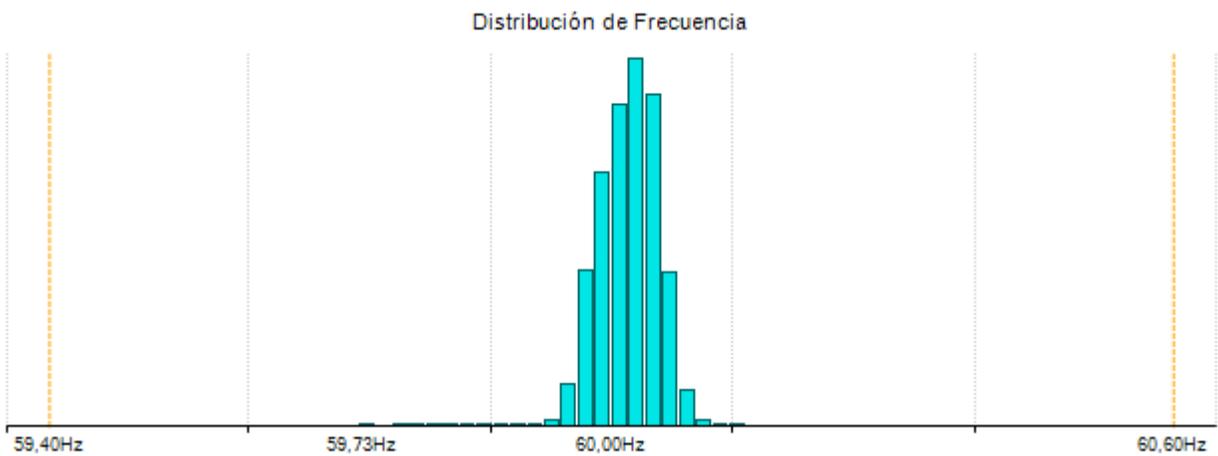
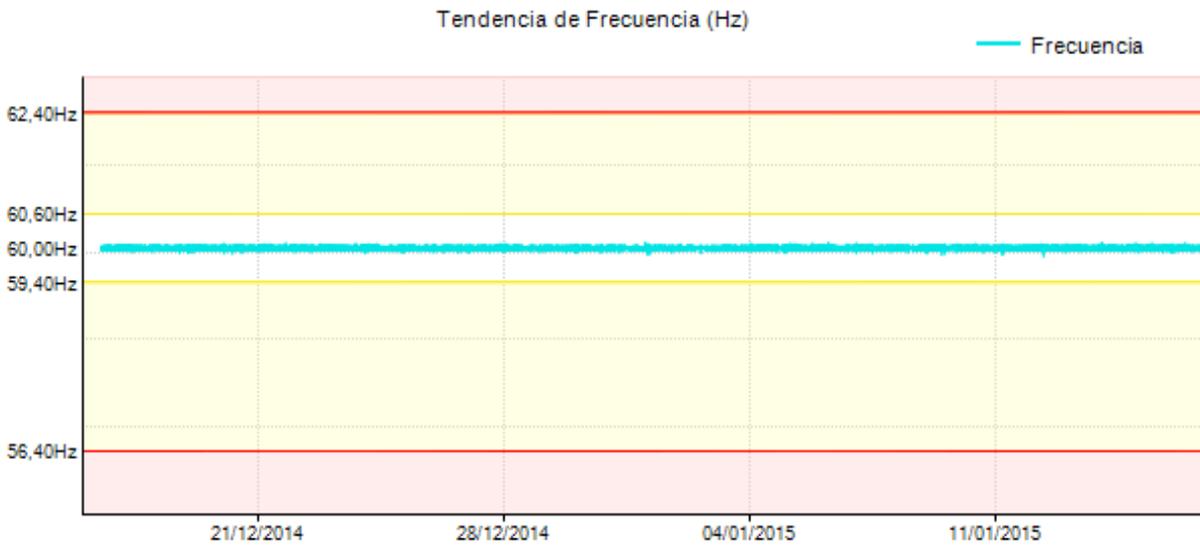
Definición:

Valor medio de la frecuencia fundamental medido durante 10 segundos

Limitación:

Para sistemas con una conexión sincrónica a un sistema interconectado

EN50160 Requerimiento	Frecuencia medida
99,5% del tiempo: 59,40Hz - 60,60Hz	59,97Hz~60,03Hz
100% del tiempo: 56,40Hz - 62,40Hz	59,96Hz~60,06Hz



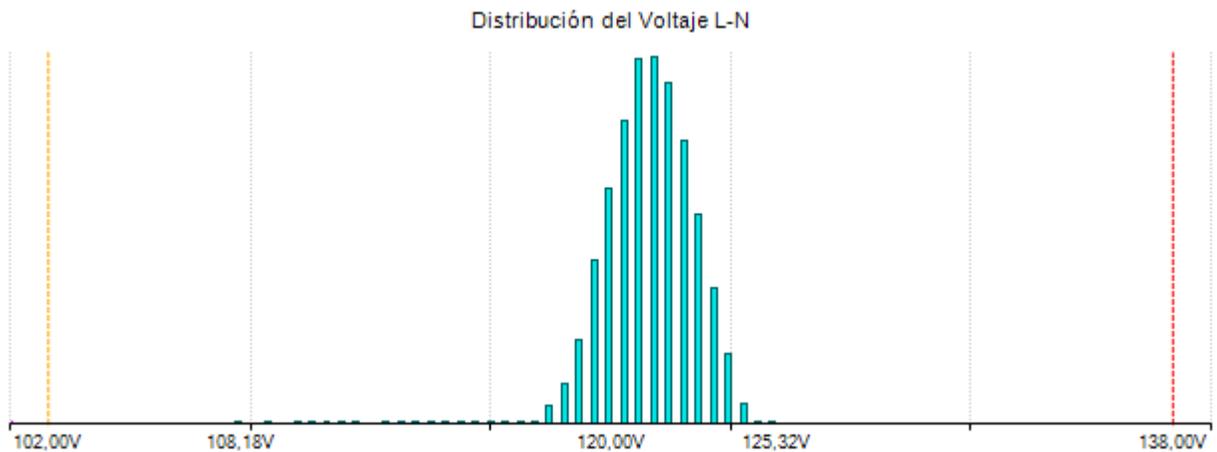
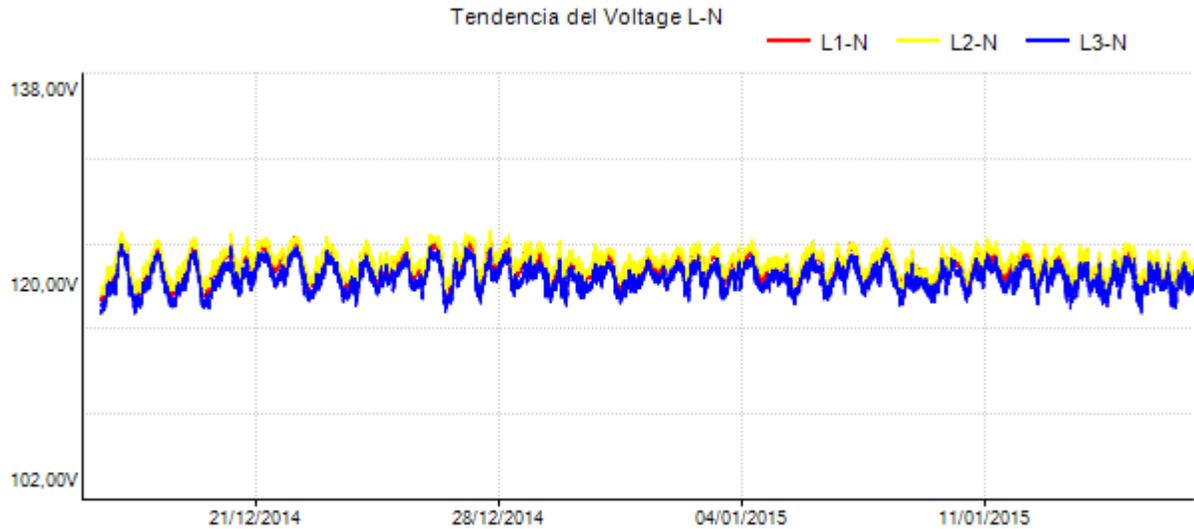
EN50160 4.2.2: Las variaciones en el voltaje

Voltaje Nominal: 120,00V L-N

Definición: Valor promedio RMS de la tensión de alimentación cada 10 minutos

Limitación: Para sistemas con una conexión sincrónica a un sistema interconectado

EN50160 Requerimiento	Medida de voltaje L1	Medida de voltaje L2	Medida de voltaje L3
Ninguno	118,44V~124,22V	118,99V~124,64V	117,37V~123,48V
Ninguno	118,44V~124,22V	118,99V~124,64V	117,37V~123,48V



Voltaje Nominal:

208,00V L-L

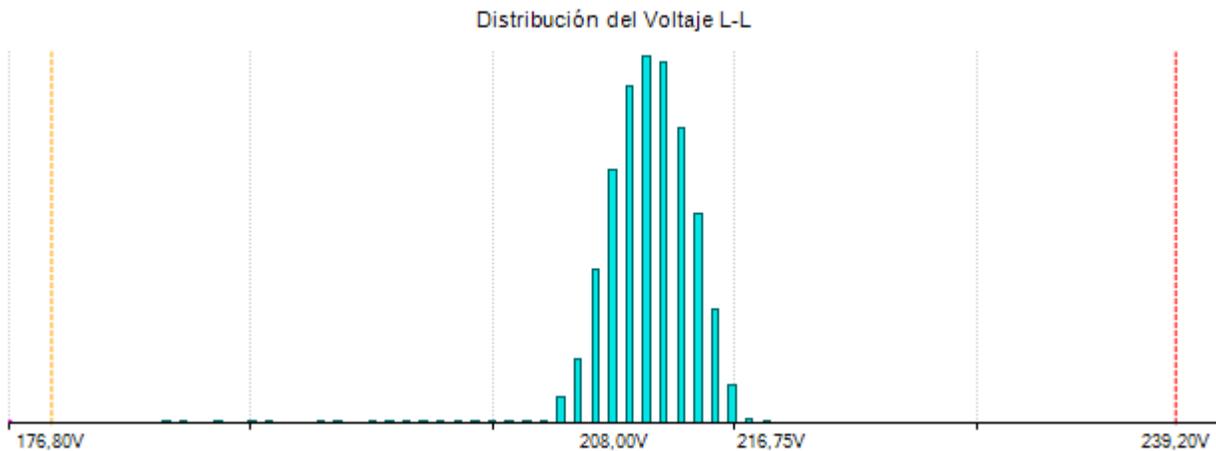
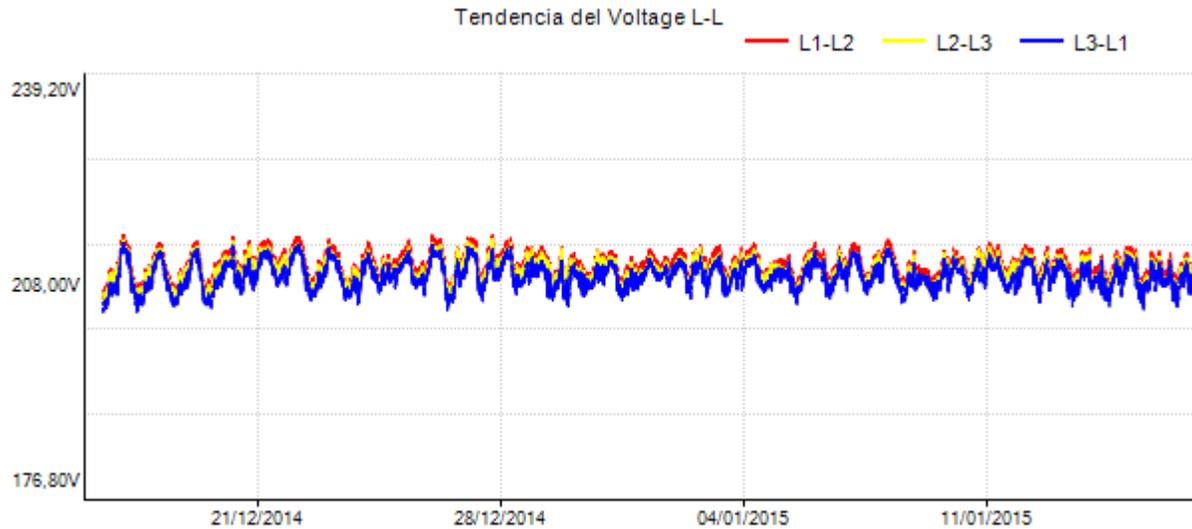
Definición:

Valor promedio RMS de la tensión de alimentación cada 10 minutos

Limitación:

Para sistemas con una conexión sincrónica a un sistema interconectado

EN50160 Requerimiento	Medida de voltaje L1	Medida de voltaje L2	Medida de voltaje L3
Ninguno	205,80V~215,59V	204,96V~214,89V	203,70V~214,38V
Ninguno	205,80V~215,59V	204,96V~214,89V	203,70V~214,38V

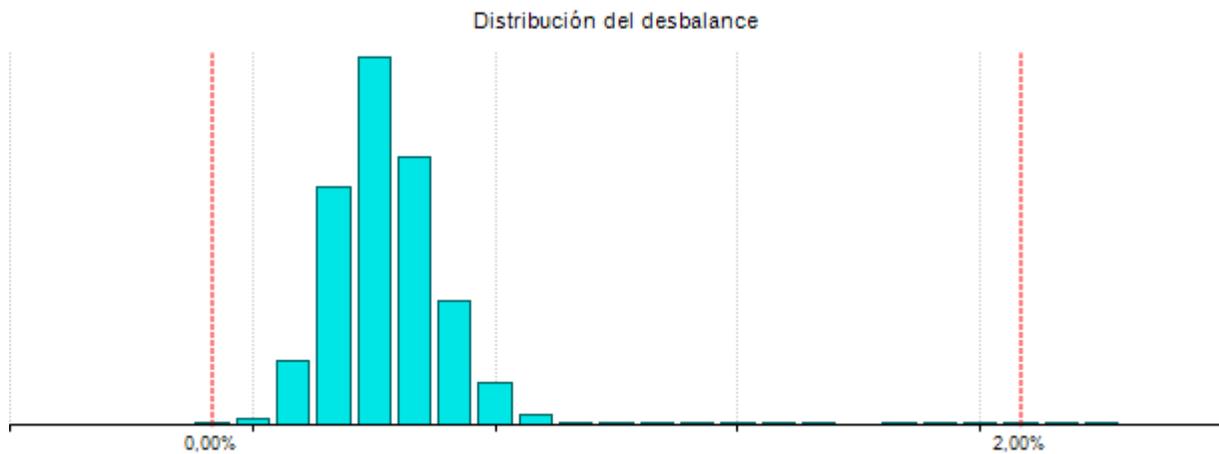
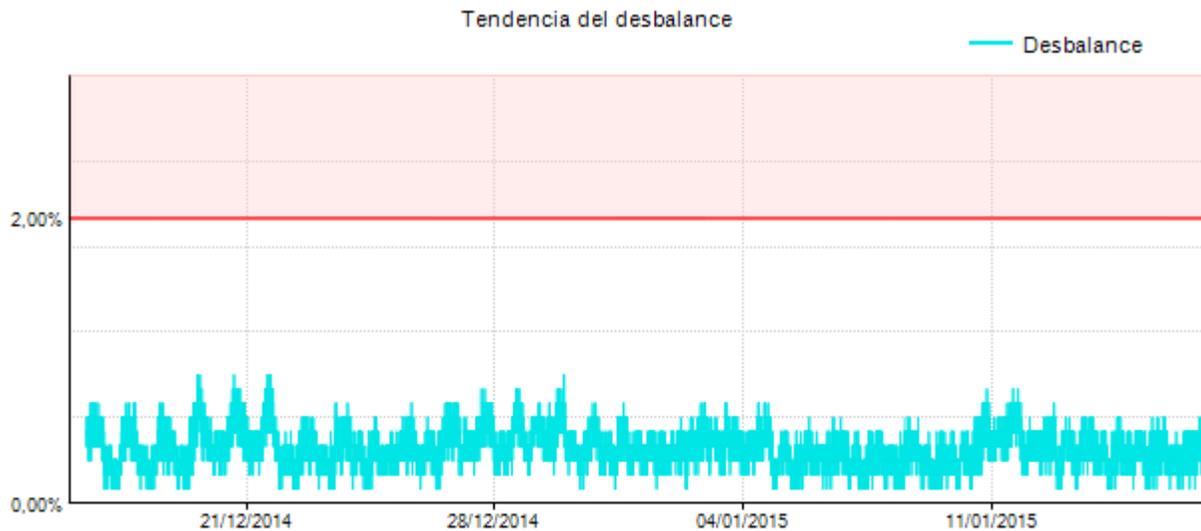


EN50160 4.2.4: Desbalance de Voltaje

Definición: Valor promedio RMS de los valores de secuencia negativa u2

Limitación: En condiciones normales de funcionamiento

EN50160 Requerimiento	Measured Unbalance u2	Resultado
95% del tiempo: 0% ~ 2% u2	0,57%	APROBADO



EN50160 4.2.5: Armónicos de voltaje

Definición:

Valor promedio RMS del armónico de voltaje individual cada 10 minutos

Limitación:

En condiciones normales de funcionamiento

Tabla de Armónicos para L1-N

Armónicos impares								Armónicos Pares			
No multiples de 3				Multiples de 3							
Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado	Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado	Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado
H5	5,0%	3,479%	APROBADO	H3	3,0%	0,628%	APROBADO	H2	1,9%	0,060%	APROBADO
H7	4,0%	0,976%	APROBADO	H9	1,3%	0,209%	APROBADO	H4	1,0%	0,045%	APROBADO
H11	3,0%	0,249%	APROBADO	H15	0,5%	0,089%	APROBADO	H6	0,5%	0,054%	APROBADO
H13	2,5%	0,255%	APROBADO	H21	0,5%	0,086%	APROBADO	H8	0,5%	0,051%	APROBADO
H17	Ninguno	0,182%						H10	0,5%	0,045%	APROBADO
H19	Ninguno	0,096%						H12	0,5%	0,048%	APROBADO
H23	Ninguno	0,075%						H14	0,5%	0,045%	APROBADO
H25	Ninguno	0,070%						H16	0,5%	0,048%	APROBADO
								H18	0,5%	0,047%	APROBADO
								H20	0,5%	0,045%	APROBADO
								H22	0,5%	0,046%	APROBADO

Tabla de Armónicos para L2-N

Armónicos impares								Armónicos Pares			
No multiples de 3				Multiples de 3							
Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado	Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado	Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado
H5	5,0%	3,619%	APROBADO	H3	3,0%	0,503%	APROBADO	H2	1,9%	0,060%	APROBADO
H7	4,0%	0,973%	APROBADO	H9	1,3%	0,149%	APROBADO	H4	1,0%	0,051%	APROBADO
H11	3,0%	0,257%	APROBADO	H15	0,5%	0,107%	APROBADO	H6	0,5%	0,042%	APROBADO
H13	2,5%	0,266%	APROBADO	H21	0,5%	0,087%	APROBADO	H8	0,5%	0,046%	APROBADO
H17	Ninguno	0,144%						H10	0,5%	0,045%	APROBADO
H19	Ninguno	0,103%						H12	0,5%	0,044%	APROBADO
H23	Ninguno	0,067%						H14	0,5%	0,046%	APROBADO
H25	Ninguno	0,089%						H16	0,5%	0,047%	APROBADO
								H18	0,5%	0,046%	APROBADO
								H20	0,5%	0,045%	APROBADO
								H22	0,5%	0,045%	APROBADO

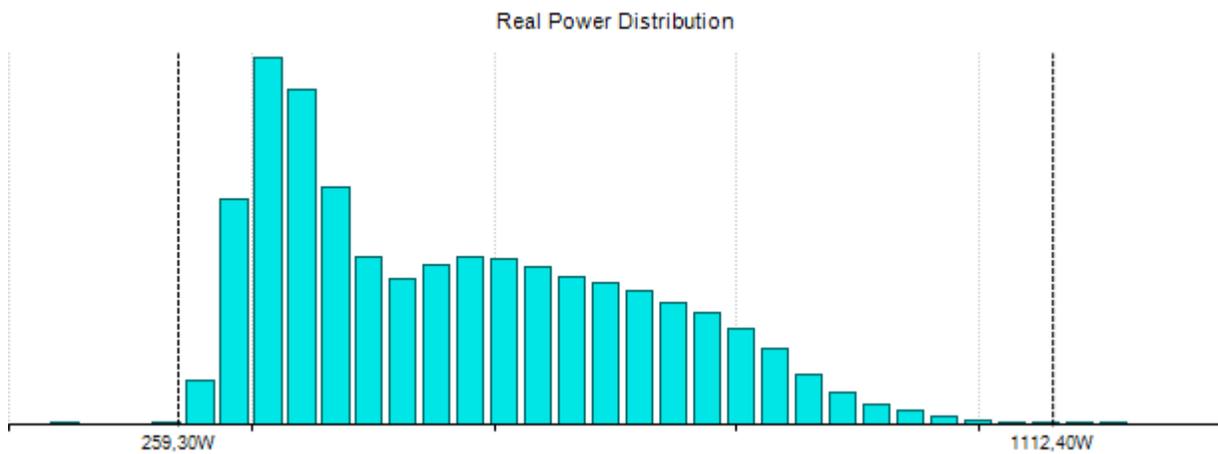
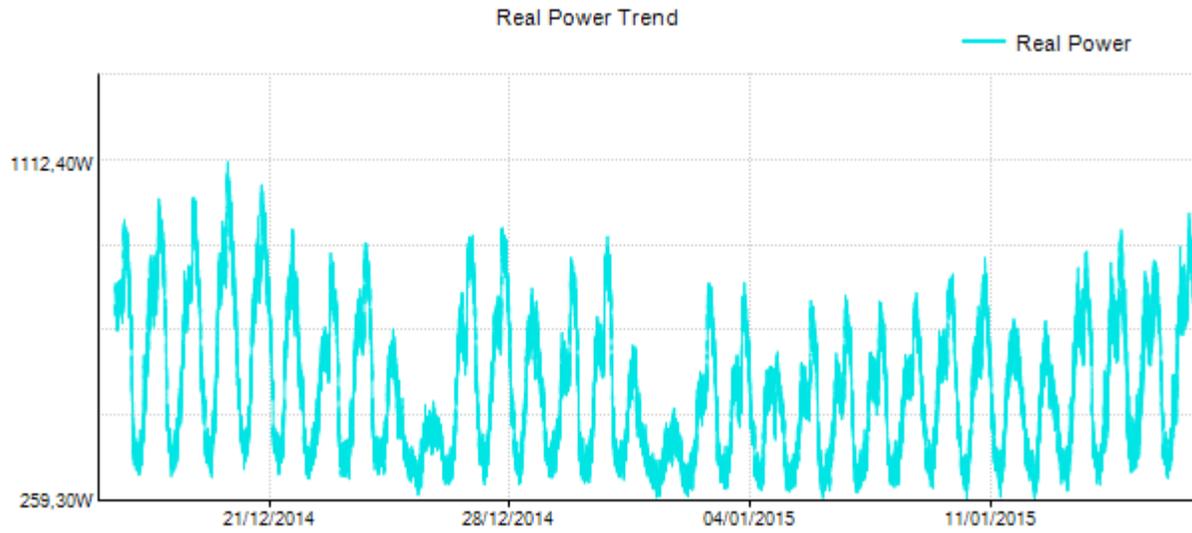
Tabla de Armónicos para L3-N

Armónicos impares								Armónicos Pares			
No multiples de 3				Multiples de 3							
Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado	Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado	Orden h	EN50160 límite	95% valor	Resultado
H5	5,0%	3,429%	APROBADO	H3	3,0%	0,516%	APROBADO	H2	1,9%	0,053%	APROBADO
H7	4,0%	0,984%	APROBADO	H9	1,3%	0,194%	APROBADO	H4	1,0%	0,050%	APROBADO
H11	3,0%	0,259%	APROBADO	H15	0,5%	0,105%	APROBADO	H6	0,5%	0,046%	APROBADO
H13	2,5%	0,273%	APROBADO	H21	0,5%	0,076%	APROBADO	H8	0,5%	0,044%	APROBADO
H17	Ninguno	0,172%						H10	0,5%	0,045%	APROBADO
H19	Ninguno	0,094%						H12	0,5%	0,044%	APROBADO
H23	Ninguno	0,087%						H14	0,5%	0,045%	APROBADO
H25	Ninguno	0,069%						H16	0,5%	0,045%	APROBADO
								H18	0,5%	0,046%	APROBADO
								H20	0,5%	0,045%	APROBADO
								H22	0,5%	0,045%	APROBADO

EN50160: Potencia

Definición:

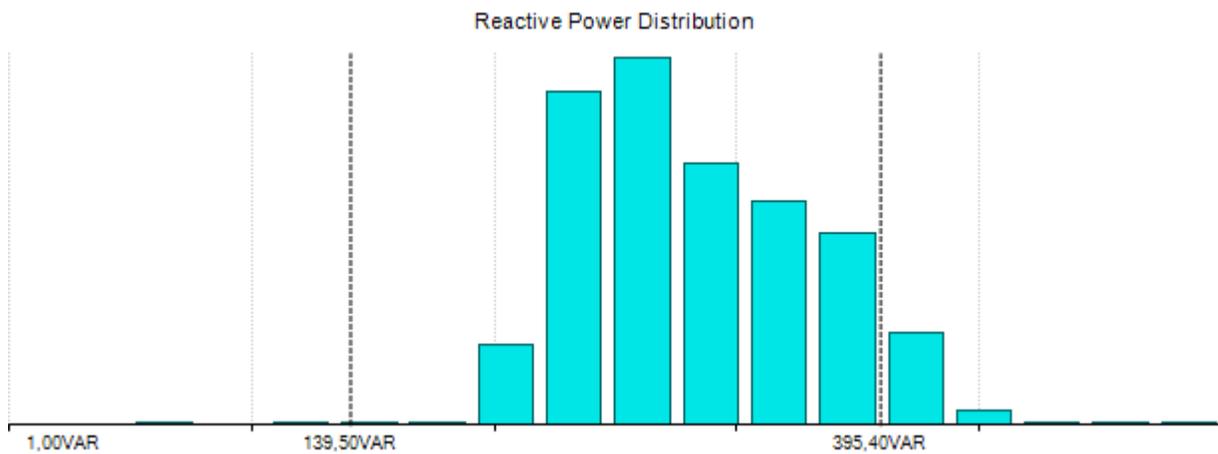
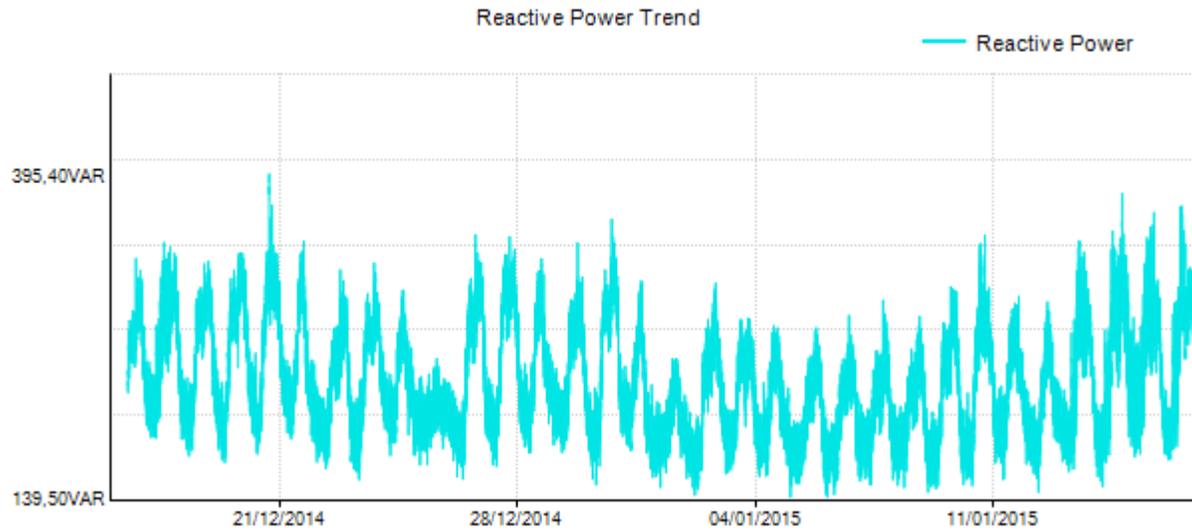
EN50160 Requerimiento	Potencia
Ninguno	1112,40W



EN50160: Potencia Reactiva

Definición:

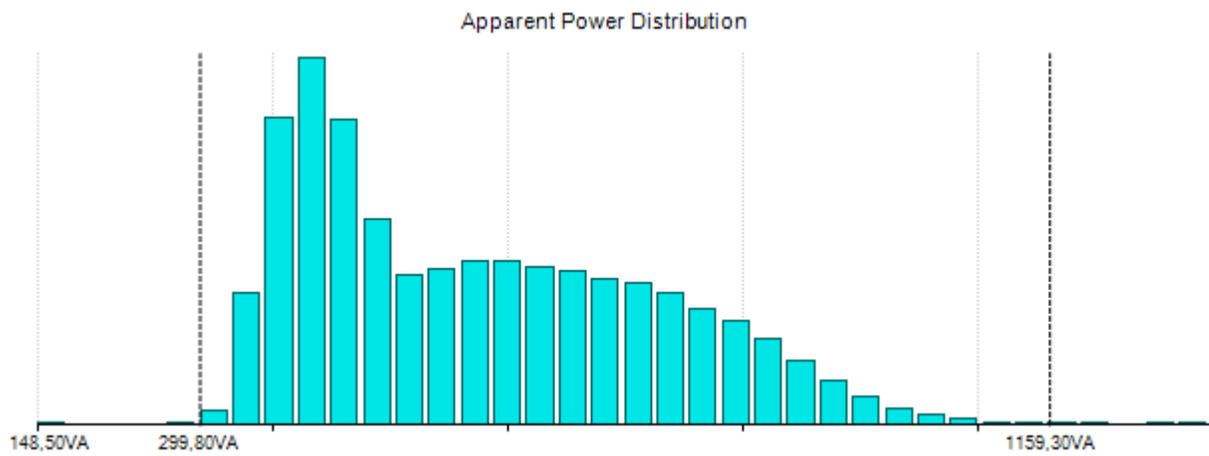
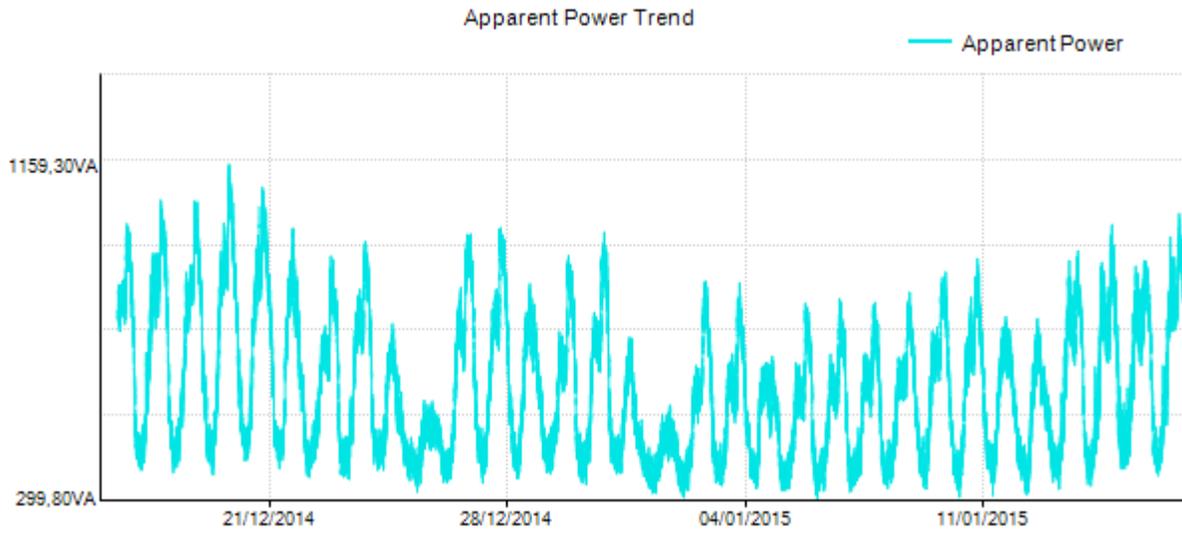
EN50160 Requerimiento	Potencia Reactiva
Ninguno	395,40VAR



EN50160: Potencia Aparente

Definición:

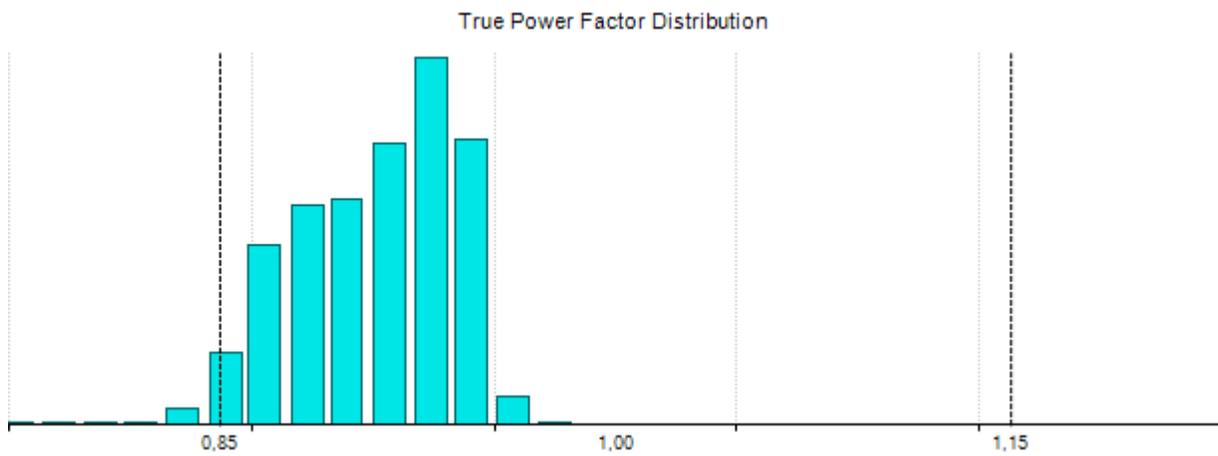
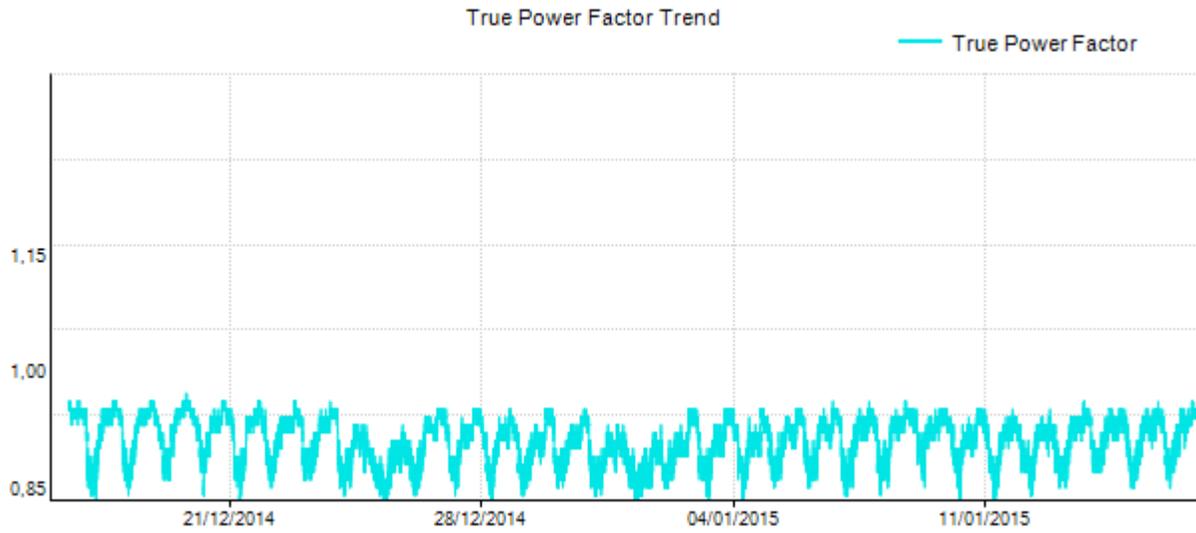
EN50160 Requerimiento	Potencia Aparente
Ninguno	1159,30VA



EN50160 : Factor de Potencia

Definición:

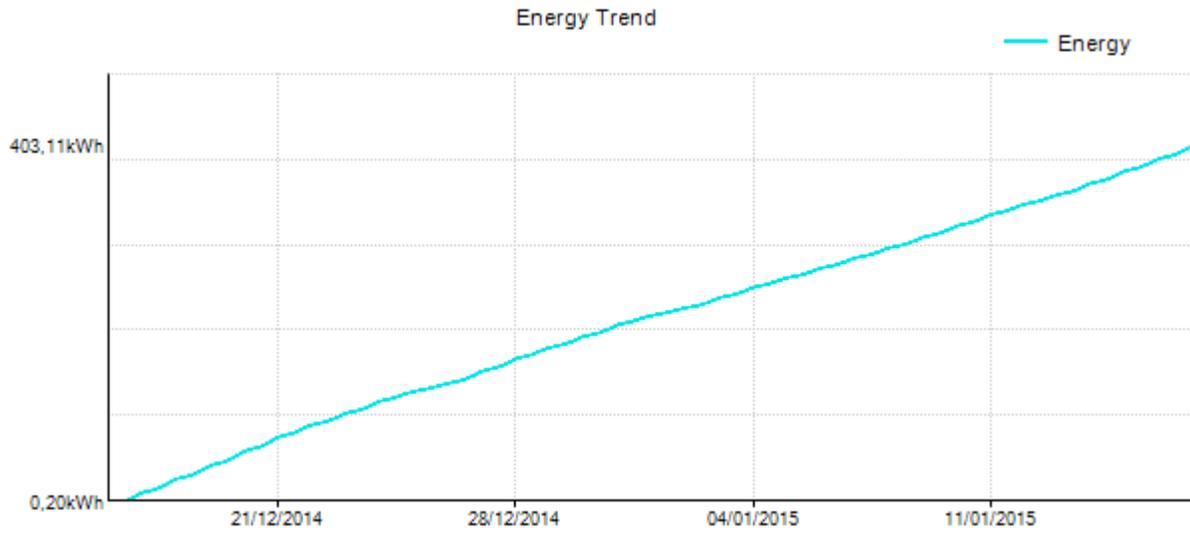
EN50160 Requerimiento	Mínimo tPF
Ninguno	0,97



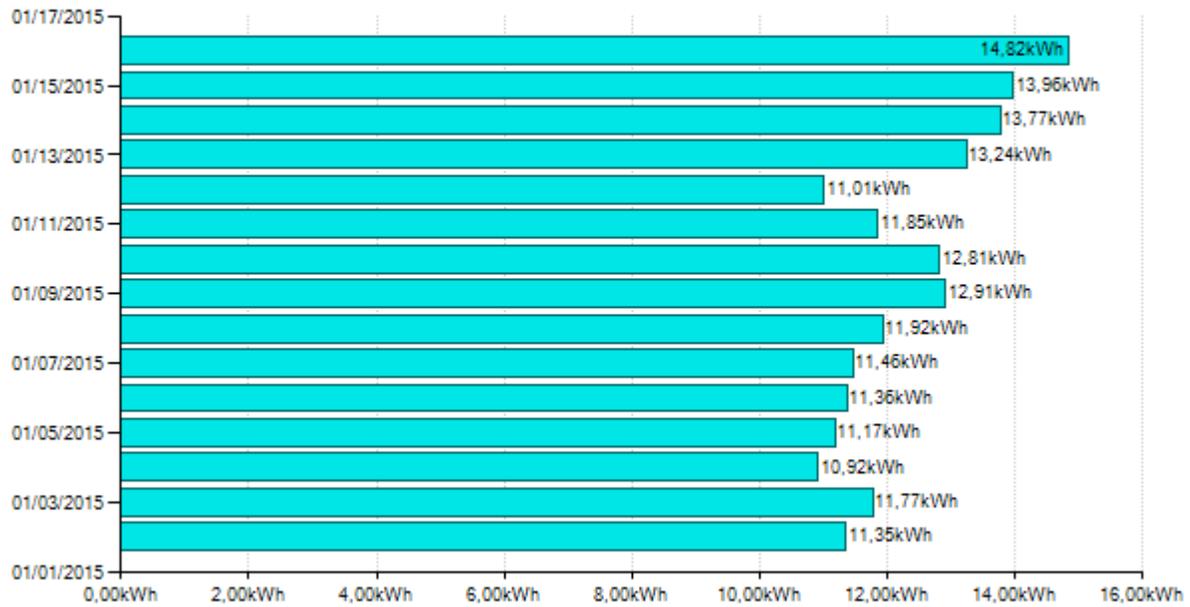
EN50160: Energía

Definición:

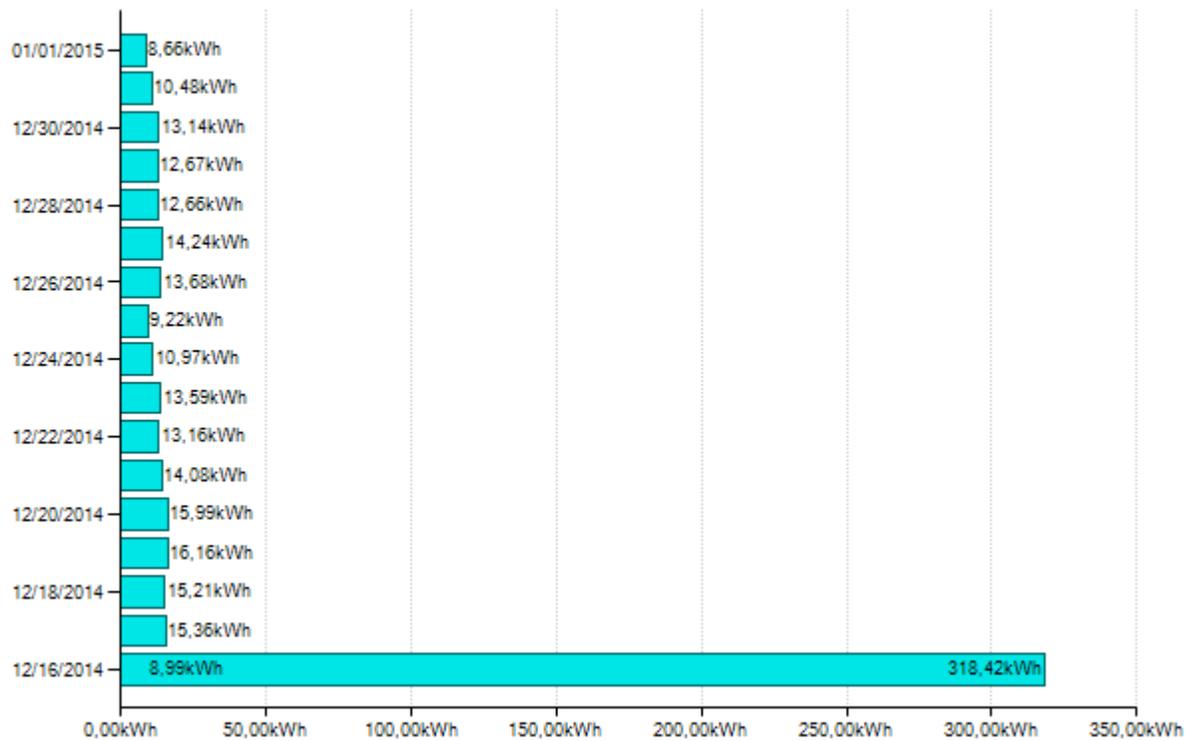
EN50160 Requerimiento	Energía
Ninguno	8,66kWh - 318,42kWh



Energy Trend



Energy Trend



Main Channels	16/01/2015	Since 2014/12/16
Apparent Energy	16.01 kVAh	440.17 kVAh
Carbon	4.80 kg	130.66 kg

EN50160 4.3.2: Huecos

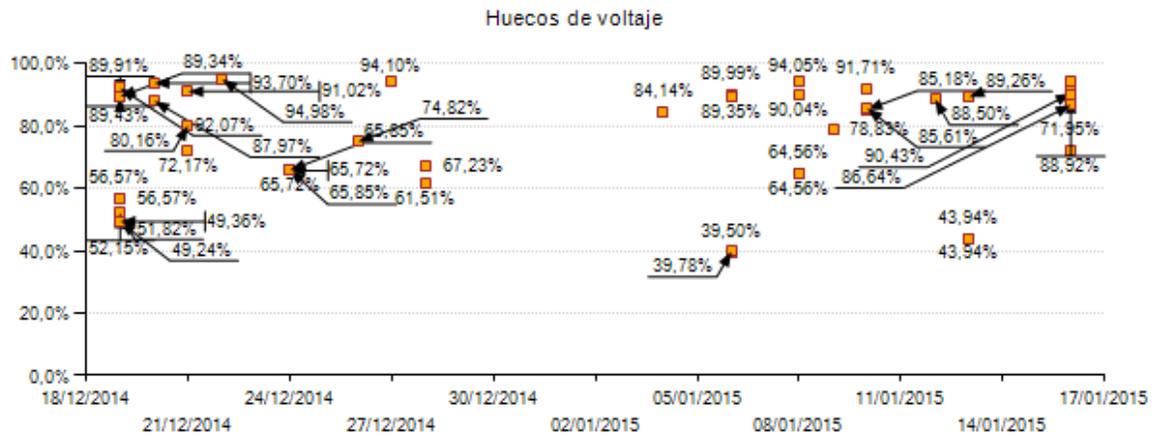
Definición: Acorde a IEC 61000-4-30 Sección 5.4.2.1

En los sistemas monofásicos, un hueco del voltaje comienza cuando el voltaje Urms cae por debajo del umbral del hueco de voltaje y termina cuando el voltaje Urms es igual o esta por encima del umbral del hueco de voltaje mas el voltaje de histéresis.

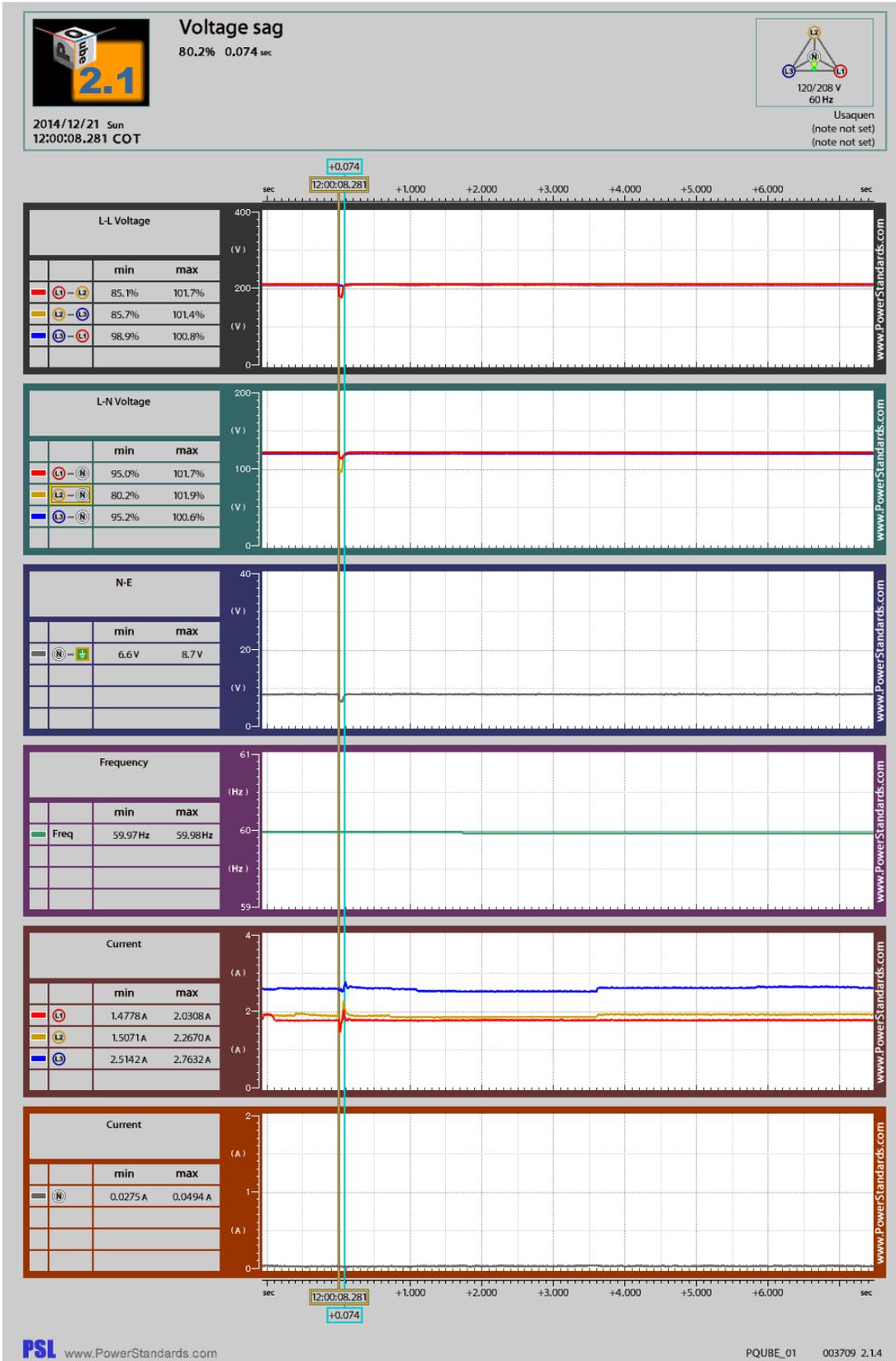
En los sistemas polifásicos, un hueco de voltaje comienza cuando el voltaje Urms de uno o mas canales esta por debajo del umbral del hueco de voltaje y termina cuando el voltaje Urms en todos los canales es igual o esta por encima del umbral del hueco de voltaje. La profundidad es la diferencia entre el voltaje de referencia y el voltaje residual. Por lo general, es expresada en porcentaje del voltaje de referencia.

Fecha	Tiempo	Profundidad	Duración en segundos
2014/12/19	T 15:13:31.343 COT	89,43%	0,065
2014/12/19	T 15:38:58.223 COT	56,57%	0,117
2014/12/19	T 15:38:58.259 COT	56,57%	0,050
2014/12/19	T 15:44:57.530 COT	89,91%	0,200
2014/12/19	T 15:45:00.895 COT	51,82%	0,125
2014/12/19	T 15:45:00.940 COT	52,15%	0,047
2014/12/19	T 15:53:19.795 COT	89,34%	0,151
2014/12/19	T 15:53:19.963 COT	49,24%	0,435
2014/12/19	T 15:53:19.988 COT	49,36%	0,325
2014/12/19	T 15:53:20.299 COT	N/D	N/D
2014/12/19	T 17:32:00.836 COT	92,07%	0,068
2014/12/20	T 06:33:58.859 COT	93,70%	0,027
2014/12/20	T 15:49:30.168 COT	N/D	N/D
2014/12/20	T 19:08:18.316 COT	87,97%	0,083
2014/12/21	T 10:04:26.046 COT	72,17%	0,092
2014/12/21	T 12:00:08.281 COT	80,16%	0,074
2014/12/21	T 15:34:36.070 COT	91,02%	0,043
2014/12/22	T 15:06:08.266 COT	94,98%	0,017
2014/12/24	T 03:00:57.152 COT	65,72%	0,383
2014/12/24	T 03:00:57.162 COT	65,72%	0,367
2014/12/24	T 03:07:01.178 COT	65,85%	0,393
2014/12/24	T 03:07:01.188 COT	65,85%	0,375
2014/12/26	T 14:14:56.679 COT	74,82%	0,103
2014/12/27	T 11:33:10.075 COT	94,10%	0,108
2014/12/28	T 14:25:12.585 COT	61,51%	0,101
2014/12/28	T 14:25:12.609 COT	67,23%	0,041
2015/01/04	T 21:50:29.445 COT	84,14%	0,083
2015/01/06	T 05:16:18.881 COT	39,50%	0,409
2015/01/06	T 05:16:18.897 COT	39,78%	0,393
2015/01/06	T 05:20:48.664 COT	89,99%	0,076
2015/01/06	T 20:11:11.422 COT	89,35%	0,058
2015/01/08	T 13:19:59.365 COT	64,56%	0,359
2015/01/08	T 13:19:59.474 COT	64,56%	0,242
2015/01/08	T 13:35:45.774 COT	90,04%	0,110
2015/01/08	T 18:25:54.581 COT	94,05%	0,026
2015/01/09	T 23:47:29.057 COT	78,83%	0,093
2015/01/10	T 00:15:01.804 COT	85,18%	0,053
2015/01/10	T 02:59:30.258 COT	85,61%	0,085
2015/01/10	T 03:05:29.156 COT	91,71%	0,036
2015/01/12	T 00:57:16.732 COT	88,50%	0,051
2015/01/13	T 23:37:31.885 COT	43,94%	0,528
2015/01/13	T 23:37:31.896 COT	43,94%	0,515
2015/01/13	T 23:44:54.936 COT	89,26%	0,100
2015/01/16	T 12:18:06.000 COT	71,95%	0,075
2015/01/16	T 12:21:49.954 COT	90,43%	0,068
2015/01/16	T 15:33:23.654 COT	88,92%	0,067
2015/01/16	T 15:33:24.282 COT	91,57%	0,086
2015/01/16	T 15:33:25.305 COT	89,61%	0,049
2015/01/16	T 15:33:55.423 COT	94,33%	0,035
2015/01/16	T 19:28:06.346 COT	86,64%	0,065

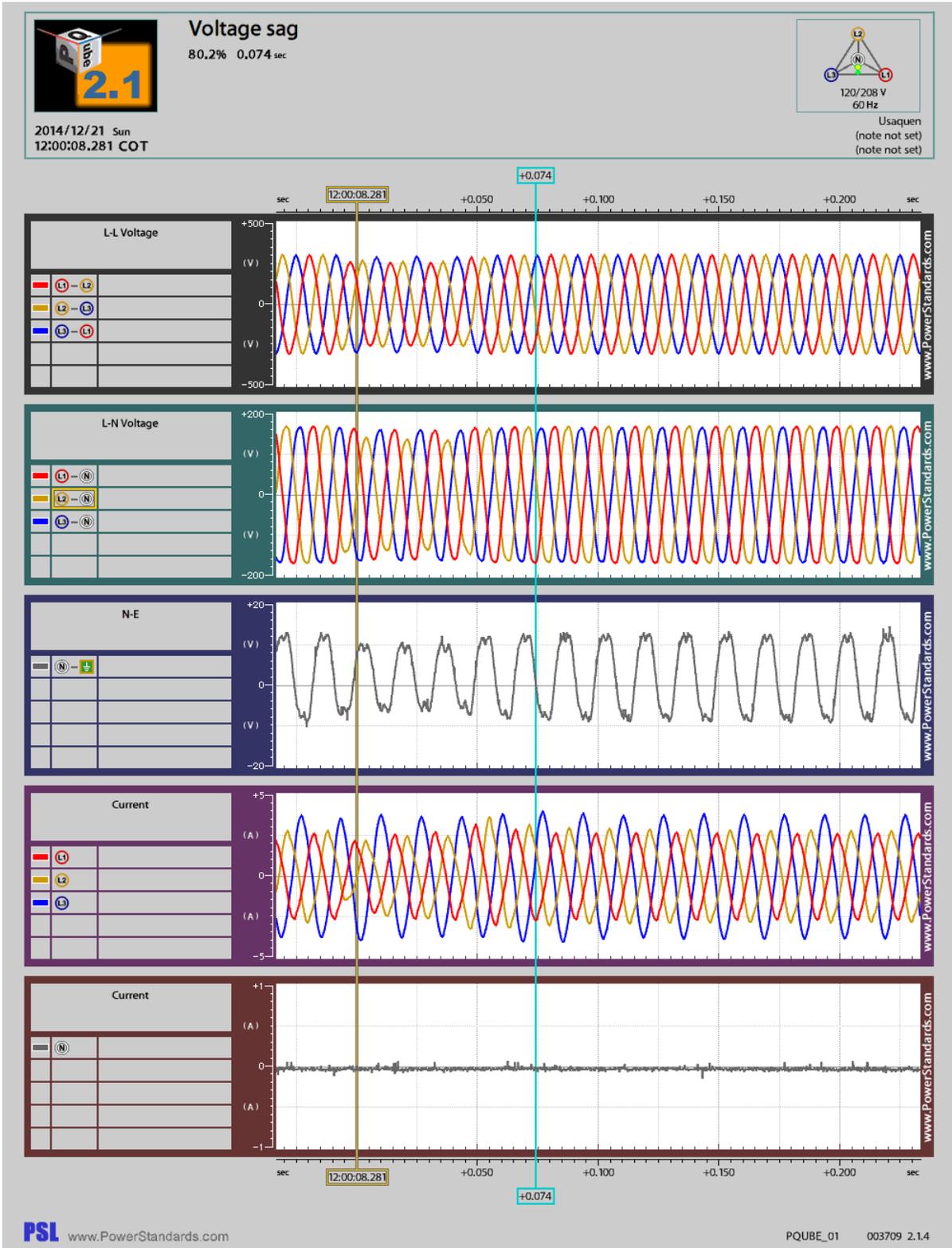
Límite de voltaje u[%]	Duración t[ms]						N/D
	10≤t≤200	200<t≤500	500<t≤1000	1000<t≤5000	5000<t≤60000	t>60000	
90>u≥80	15	-	-	-	-	-	
80>u≥70	4	-	-	-	-	-	
70>u≥40	6	8	2	-	-	-	
40>u≥5	-	2	-	-	-	-	



Perturbación típica durante 16/12/2014 – 16/01/2015



Perturbación típica durante 16/12/2014 – 16/01/2015



Conclusiones
EN50160 Conformidad
16/12/2014 – 16/01/2015

EN50160 Tabla de Requerimientos Aprobado-Fallido

EN50160 Sección	Parámetro de calidad de la energía	EN50160 Conformidad	Comentarios
4.2.1	Frecuencia	DESCONOCIDO	Los datos son incompletos Cobertura 98,4%
4.2.4	Desbalance de Voltaje	APROBADO	
4.2.5	Armónicos de voltaje	APROBADO	

EN50160 Tabla de información adicional

EN50160 Sección	Parámetro de calidad de la energía	Comentarios
4.2.2	Las variaciones en el voltaje	Datos solamente
4.2.7	Señalización de línea eléctrica	No se midió
		Datos solamente
4.3.1	Interrupciones	
4.3.2	Huecos	
4.3.3	Sobrevoltajes	

- Nota 1: Durante 16/12/2014 – 16/01/2015 las mediciones fueron realizadas 98,39% del tiempo
 Nota 2: Límites de Alta tensión (36 kV - 150 kV) fueron utilizados.
 Nota 3: Los datos marcados fueron excluidos de este reporte.

Instrumento utilizado: PQube® (www.PQube.com)
 Fabricante: Power Standards Lab, U.S.A.
 ID del PQube: (note not set)
 Lugar: PQUBE_01
 Número de serie: P003709
 Revisión de firmware: 2.1.4 2893
 Certificado de calibración: <http://www.PowerStandards.com/CalibCerts/P003709.pdf>
 Software de informe: PQube Creador de Reporte 2.1.18.0
 Autor del Reporte: PAAS - UN
 Nombre: Yefersson Cañon

Información del cliente

Nombre: H. Andrés Díaz D.
 Empresa: Sample Customer
 Dirección 1: Cra 13 A No 93 - 66, piso 4
 Dirección 2: Bogotá, Colombia
 Dirección 3: T +57 1 6016032
 Sitio Web: <http://www.endesa.com/>

**Medidor electrónico polifásico
residencial y comercial Landis+Gyr
E34A**

Especificações Técnicas

Instalación en clientes polifásicos (3 elementos/4 hilos o 2 elementos/3 hilos)

Tensión	Tensión Nominal (Vn): 120 y 240 V Bivolt, Multirange
Corriente	Corriente nominal (In): 5 A Corriente máxima: 120 A Corriente de arranque: 0,4% In
Frecuencia	50 o 60 Hz
Precisión	Absoluta para Energía Activa: $\pm 1\%$ - Clase 1 Absoluta para Energía Reactiva: $\pm 2\%$ - Clase 2
Consumo Circuito Potencial	120V Potencia activa en Vn (Máx): 0,52 W Potencia aparente en Vn (Máx): 1,25 VA 240V Potencia activa en Vn (típico): 0,78 W Potencia aparente en Vn (típico): 1,89 VA
Consumo Circuito Corriente	Típico: 15 A / 0,08 VA
LED de Aferición	Constante (activa): 1000 impulsos/kWh o 1 Wh/impulso Constante (reactiva): 1000 impulsos/kVArh o 1 varh/impulso
Display	Número de dígitos para registro: 8
Rangos de Temperatura	Rango de operación especificada: -10°C hasta 70°C Rango límite de operación: -25°C hasta 70°C
Resistencia de Aislamiento	Tensión aplicada: 4 kV / 60 Hz para 1 min
Resistencia de Tensión de Impulso	Tensión de impulso: 6 kV Tiempo de subida de tensión de impulso: 1,2 μ s Tiempo de bajada de tensión de impulso: 50 μ s
Conexión	Simétrica (Línea-Carga) Terminales tornillables
Memoria	EEPROM, no volátil

Bondades

El E34A es un medidor polifásico electrónico de aplicación en consumidores **residenciales, irrigantes y comerciales de pequeño porte**.

Medidor estático combinado (energía activa, reactiva y demanda).

Principales bondades: funcionalidades de combate a irregularidades en la instalación o post-instalación – potencial disminución de las pérdidas comerciales, tales como: señalización de la presencia o ausencia de fase, indicación del flujo de energía, detección y señalización de energía reversa (inversión fase-neutro) en display LCD, detección y señalización de retorno de potencial, apertura de la tapa principal y movimentación del medidor⁽ⁱ⁾; posibilidad de cálculo de energía Unidireccional; base y bloque compuestos de una sola pieza, base y tapa unidas por fusión del material que las componen; registradores de alta precisión; display LCD de alta resolución; Autorange. Para algunas variantes, puede contener funcionalidad de identificación de apertura de la tapa del medidor, identificador de alteración de posición del medidor, registro de eventos (ex.: ausencia de tensión) y reloj, medición de demanda, posibilidad de aplicación de tarifas diferenciadas en diferentes horarios del día (ex.: punta, fuera-punta, irrigantes) y/o tablas sazonales, programación de feriados y horario de verano.

- (i) Sensores para identificación de apertura de la tapa principal y para identificación de movimiento del medidor están presentes solamente en algunas variantes del producto.

Comunicación y Integración: LED's independientes para aferición de energías activa y reactiva, posibilidad de contener interface de comunicación embarcada (ex.: salida de pulsos, TTL, RS485) para integración del equipamiento en redes, consecuentemente, lectura y programación remota (**AMI & AMM Ready**).

El medidor E34A posee como sensor de corriente una solución de tecnología totalmente Landis+Gyr, a través de circuito integrado propietario, basado en el principio de la inducción y de alta precisión. La tarjeta de circuito impreso es montada con componentes SMD y procedimientos avanzados contra ESD (descargas electrostáticas). Sus componentes mecánicos son resistentes a los rayos ultravioletas.

Con materiales de alta tecnología y modernas técnicas de producción, el E34A representa el inicio de una nueva generación de medidores. Con alto rendimiento y estabilidad, fue desarrollado para cumplir con las más recientes exigencias del mercado.

Caso exista un evento y/u operación no permitido del micro-controlador, el *watch dog* entrará en acción provocando un *reset* de este, garantizando el funcionamiento correcto del circuito.

Abajo de la corriente de arranque, el medidor entra en un modo llamado de *anti-creep*. En este estado el LED de metrología queda encendido y los registros no son incrementados. El LED queda encendido hasta que la corriente ultrapase el valor de la corriente de arranque en el sentido de consumo de energía por la carga.

El Medidor E34A cumple con los requisitos de las normas IEC 62052-11, IEC 62053-21, IEC 62053-23, NBR 14519, NBR 14520, NBR 14522 y Resolución 431 (INMETRO).

En cumplimiento a la ISO 14001, los componentes utilizados en los medidores son separables y pueden ser enviados para centros de descarte y reciclaje.

Características

Princípio de Medición: DFS

El sistema de medición DFS (**Direct Field Sensor**) genera una señal proporcional a la corriente circulante en cada fase juntamente con la tensión aplicada en las mismas genera señales para el cálculo de la energía. Estas señales son digitalizadas para un futuro uso por el microprocesador.

Registrador LCD

Los registros de kWh, kVAh y Demanda son programables y están disponibles en las configuraciones de 4, 5 o 6 dígitos enteros y 0, 1 o 2 dígitos decimales; **programables** vía software. Los dígitos tienen 10 mm de altura y 5 mm de ancho, permitiendo excelente visualización.

Registrador en modo bidireccional, unidireccional o anti-retroceso de precisión

Unidireccional – La energía es la resultante del módulo de la suma de las energías de las fases.

Anti-retroceso – La energía a ser registrada depende de la resultante de la suma de las energías de las fases. Si la resultante es positiva, se incrementa el registro de energía, caso contrário el registro no es alterado.

Bidireccional – La energía es la resultante de la suma de las energías de las fases.

LED's para aferición

Los medidores disponen de dos LED's rojos, frontales e independientes que pueden ser utilizados para calibración de energía activa y reactiva. LED's de aferición con constantes Activa (Kh): 1000 pulsos/kWh o 1 Wh/pulso y Reactiva (Kh): 1000 pulsos/kVAh o 1 varh/pulso.

Sealed for life

La tapa y la base del medidor son selladas por un proceso químico de fusión después de su montaje y encaje, formando una sola pieza. De esa forma, el medidor no puede ser abierto sin la destrucción de su envoltorio.

Tapa principal en plástico de ingeniería, resistente a choques mecánicos

El medidor E34A es construido con una tapa principal en policarbonato con carga de fibra, que forma con el bloque de terminales una sola pieza, rígida y de alta resistencia a deformaciones y choques mecánicos y térmicos.

Los indicadores del LCD permiten un claro entendimiento del estado funcional del medidor. Los registros mostrados son **configurables** y pueden ser acompañados de los códigos ABNT (NBR 14522).

El medidor E34A presenta conexión de forma simétrica. El diagrama de conexión abajo debe ser considerado solamente como ejemplo, debiéndose seguir el diagrama de conexión colocado en la identificación frontal del medidor.

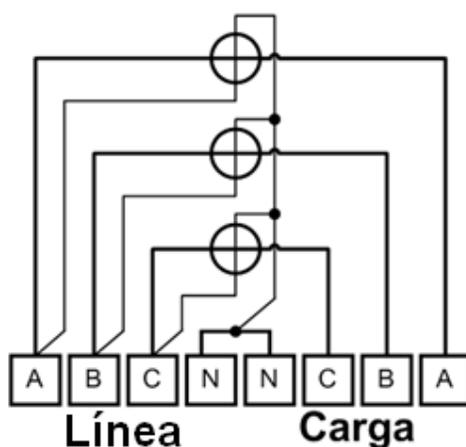


Diagrama de Conexión

Concentrador APSystem M3C-CB10

[STREET LIGHTING
EFFICIENCY](#)
[SMART METERING](#)
[SOFTWARE FOR PUBLIC
SERVICE](#)
[NEWS AND EVENTS](#)

For over 25 years
a.p.systems has been
deploying its own-designed
ICT systems for Public
Service and Utilities in Italy
and abroad.

This effort has brought its
technology serving more
than 50% of the Italian
population through
municipalities, utilities,
Global Services companies
and other territorial service
organizations.

[Home](#) / [M3C-CB10, the multi metering management concentrator](#)


M3C-CB10, THE MULTI METERING MANAGEMENT CONCENTRATOR

Saturday, March 23, 2013 · in Smart Metering

M3C-CB10 is the data communication concentrator which enables M2M data exchange over different networks such as public wireless network, powerline communication (PLC) and proximity wireless networks.

It chooses the network according to the device to linking with:

- o power line communication (PLC) - characteristically it works on this network when data exchange is performed with onsite devices
- o short range networks, used to link proximity wireless devices
- o TCP/IP (GSM, GPRS, PSTN, ...) wireless communication - on these networks it usually performs the communication with back-office control room systems.

Local and remote maintenance

M3C-CB10 natively offers a high level both local and remote maintenance thank to direct connections or via WAN. Its firmware maintenance and updating can be completely remote deployed.

CPU, memory and operating system

M3C-CB10 is equipped with the STMicroelectronics SPEAr310 CPU core which is based on ARM926J-S processors, works at 333MHz and can manage a calculating performance of 366 Dhystone MIPS.

The CPU core is also completed with a coprocessor which performs 128bit encryption according to the following algorithms: AES cipher at ECB CBC and CTR, DES cipher at ECB and CBC, SHA-1, HMAC-SHA-1, MD5, HMAC-MD5 digests.

M3C-CB10 is also configured with DDR2 SDRAM 256MB RAM memory and NAND FLASH 256MB mass memory

M3C-CB10 runs Linux operating system

Tags:


[M3C-CB10 datasheet download](#)


The APYLink modems have made the M2M GSM/GPRS communication history.

For over a decade APSsystems has been a leading provider of GSM/GPRS modems, specifically developed for the AMR/AMM and Remote Control Systems (SCADA) market. [read more...](#)



the apsystems R&D team joins the STMicroelectronics development center of SPEAr®

With this great worldwide manufacturer of electronic components apsystems has established a technical collaboration on their SPEAr® product to integrate it into the latest generation of APYLink® data communication concentrators. For to this, STM has granted the R&D team of apsystems to become part of the development center for the SPEAr® Wireless CPU project.

Contribuciones

Broadband over Power-Line Networks for control and automation systems in Smart Grids

Yefersson Cañon De Antonio¹, Andrés Pavas², Senior Member IEEE.
 Department of Electrical and Electronic Engineering
 Universidad Nacional de Colombia
 Bogotá, Colombia

Abstract— This paper presents a review of Broadband over Power Line Communication technology as a mean of communication for the detection, control and automation of an electrical network. Some of the applications in which this type of technology can be used are sending information from power quality meters, energy management and automation systems, demand management, among others. A review and an analysis about the communication system requirements based on BPLC is presented, particular emphasis is paid to the currently installed network conditions required to allow the utilization of this technology

Keywords; Power Line Communication (PLC), Broadband over Power-Line (BPLC), Advanced Metering Infrastructure (AMI), Smart Gri, Micro Grid, Power Quality monitoring, distribution automation.

I. INTRODUCTION

Smart Grid, refers to an operation mode of the electrical system using communications, power electronics, and storage technologies for balancing production and consumption, achieving reliability, security, and efficiency improvements. Such benefits are expected to be experienced by all the agents involved in the electricity production like the energy customers, utilities and generating facilities [1][2]. Along with the growth of smart grids worldwide a discussion about the most suitable communication options has been carried out. Among the more commonly employed technologies for this kind of network, Broadband over Power Line Communication offers several attractive options by means of the usage of higher frequencies, a wider frequency range and high speed.

PLC is a technology capable of handling data and voice transmission through already installed electric networks. The PLC technology comprises a group of elements and transmission systems, so that other services are offered to customers like internet, telephone, television, remote data reading, control, etc., besides electricity.

PLC is also known as Power-Line Telecommunications (PLT), Power Band and Power-Line Networking (PLN), Broadband over Power-Lines (BPLC), also known as Power Line Internet, is a method of power line communication that allows relatively high-speed digital data transmission over the

public electric power distribution wiring. The broadband access is the goal of various technologies deployed worldwide. However, the implementation has been limited by the existing infrastructure in each country.

Thanks to the electric network and the BPLC, it is possible to provide internet service to further places where electric network is available but no communication networks exists. In addition, measurements like power consumption and power quality can be performed, recording information useful for the customers and the utilities.

The transmission of data using BPLC permits to offer several new services, particularly in low-voltage networks. Among other services, BPLC enables the ability to remotely turn on or off a customer, electricity revenue metering, detecting a service outage, detecting any unauthorized use of electricity, improving asset management and streamline the operation of the overall network, active demand management, fault location and additional services as TV and Internet [3], as it has been stated before. BPLC is an attractive option because it uses existing infrastructure.

In order to integrate the electricity and the BPL communication systems at low voltage electric systems, it is necessary to analyze the network's capabilities and characteristics for BPLC transmission [4]. The network's topology, frequency response and bandwidth lead to the determination of the communication capabilities of the network, which depend strongly on the manner it has been constructed. In Colombia, all networks are built according to the Colombian Technical Standard NTC 2050, based mainly on the National Electric Code NEC or NFPA 70 [5].

In this paper, the place for the integration of the electric and the communication systems is proposed to be the distribution transformer, nearby the customers or at the distribution substations. At this location, the coupling is done between the electric networks with complementary devices. Such devices will receive and send information, turning the transformer or the substation into a local control center, where measurements and information can be analyzed.

Using low voltage lines for data transmission, either outdoor or indoor, there are a wide number of users connected to a transformer, in which impedance levels should be adjusted because the transmission signal gets disturbed and experiences attenuation.

This paper studies the technical characteristics and the low voltage network's electric model established in the standard NTC 2050 and the Technical Regulations for Electrical

¹ Y. Cañón (ybcanond@unal.edu.co) is MSc candidate at the Universidad Nacional de Colombia and Researcher with the PAAS-UN Group.

² A. Pavas (fapavasm@unal.edu.co) is Profesor with the Department of Electrical and Electronic Engineering of the Universidad Nacional de Colombia and Researcher with the PAAS-UN Group.

Installations RETIE, determining the possibilities and limitations for data transmission.

II. COMMUNICATION SCENARIOS

With the development of the Smart Grid, many international and national organizations currently working in the development of standards. According to the NIST (National Institute of Standards and Technology), was structured a conceptual model that defines communication scenarios power lines as the power level [6]. These scenarios are defined as follows:

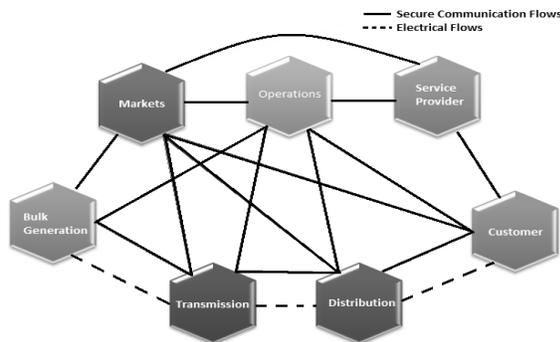


Fig.1. Interaction of actors in different Smart Grid Domains through Secure Communication Flows and Electrical Flows. Source: National Institute of Standards and Technology (NIST) and U.S. Department of Commerce

Extra High Voltage (EHV) and High Voltage (HV) lines are used for transmission systems throughout the entire country or even for international power transfer. At this voltage level this technology is not widely used because transmission lines are usually quite long, causing significant signal attenuation. Additionally, transmission system's communications are carried out by means of optical fiber.

Medium Voltage (MV) distribution lines are connected to transmission systems through primary transformer substations. They are used for distribution within the cities, towns and industrial customers. At this voltage lower structures are used. In addition, Intelligent Electronic Devices (IEDs), such as reclosers, switches, capacitor banks and the phasor measurement units, can be directly connected. This voltage level requires relatively low data rates and BPLC can provide economically competitive communication solutions.

Low Voltage (LV) distribution lines are derived from the distribution transformers' secondary circuits. A communication signal can pass through the secondary of the transformer to the low voltage line with a strong attenuation in the order of 55 dB to 75 dB. This problem is easily solved by using signal couplers (capacitive or inductive, as shown in Figure 2 and Figure 3) that avoid going through the transformer. Thus communication is sent directly from medium voltage to low voltage. A Master Gateway is connected to each transformer, depending on the analysis of the system's topology. This Master Gateway will operate as data concentrator, receiving information from customers fed by the transformer. A Gateway employed at low voltage can control up to 1000 users, approximately. Each customer is defined by a two-way smart meter with a MAC ID for supervision, control, monitoring, and in real time functions.

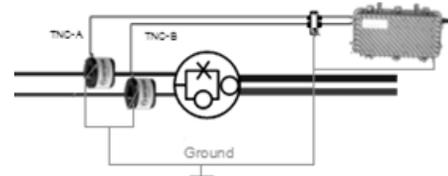


Fig. 2. Underground Coupler. Source: Smart Grid Connectivity Corinex

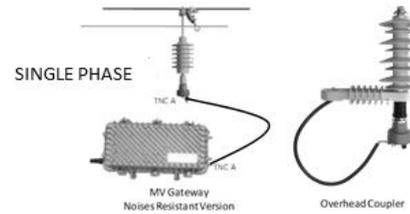


Fig. 3. Coupling the signal in to a single phase MV line using a single medium-voltage coupler. Source: Smart Grid Connectivity Corinex.

By integrating BPLC, the National Electric System can provide internet service and meet other needs, besides those already mentioned through existing networks. Such a system involves one of the most widespread infrastructures the country, the transmission network. BPLC may be a last mile solution to offer Internet service to rural people, without the installation of additional infrastructure. The proposed scheme requires an Internet Service Provider (ISP) that supplies data to a terminal carrier wave, located at a power substation and connected to the networks.

III. CONTROL AND AUTOMATION IN SMART GRIDS

At present the most technologies applied to electrical networks is in transmission. These technologies convert conventional grids into smart grids. Some of the technologies used in these new networks are:

- FACTS Devices (Flexible Alternating Current Transmission System) that allow transmission lines to provide maximum power and help stabilize the network with an exact power controlled. FACTS encompass all systems based on power electronics used for power transmission [7].
- Control Systems Wide Area (WAMS) is a distributed measurement system in power system phasor measurements involving (PMU) capable of rapidly analyzing anomalies in electricity quality in large geographical areas to prevent the development of dangerous instability in the network [8].
- Phasor Measurement Unit (PMU) or Synchrophasor, is a device used to observe accurately the dynamic state of the electrical system. The PMU data obtained secondary windings of power transformers and current are then processed to obtain the voltage and current phasors and then be sent to the hub receives data that organizes and distributes [9].
- Data Acquisition Systems and Supervisory Control (SCADA) analyze the electrical network conditions in real time, providing data for fast power settings [10].
- A High-Voltage, Direct Current (HVDC), can deliver power over long distances with low losses on land and underwater, and connect asynchronous networks. For

underwater power cables, HVDC avoids the heavy currents required to charge and discharge the cable capacitance each cycle [11].

A. Smart Grid Benefits

BPLC technology provides a solution for real-time communication for automating electrical systems, improving service reliability. Intelligent electronic devices (IEDs) and systems that protect receive sensor data and can issue control commands, if they detect abnormal voltage, current or frequency, voltage raised or decreased levels in order to maintain the desired voltage quality. Some of the benefits obtained with the automation of power grids are listed below:

- Reduced O&M Expenditures. Using IEDs to monitor power factor in real-time will save on generation and reduce generation emissions.
- Reliability. Detection fault location, fault insulation and service restoration functionality.
- Flexibility in network topology. Controlling bidirectional energy flows that occur with the inclusion of new sources of power generation to the grid, for example photo voltaic cells, electric cars, wind turbines, among others.
- Efficiency. One of the improvements of intelligent network is to improve the efficiency of energy use, particularly with the use of a smart power management in order to obtain homogeneity in the load curve, for example turning off air conditioners during short-term spikes in electricity price. The intelligent use of technology to improve the efficiency of electrical networks and manage the balance between supply and demand reduces the need for emergency generators. In addition, demand management and the creation of better storage allow the flexibility to manage the intermittency of renewable energy sources.
- Sustainability. The flexibility of Smart Grids allows the penetration of new renewable energy sources to electricity generation and thus has a variety of ability to meet demand.
- Market. Bidirectional communication between consumers and energy suppliers, allowing greater flexibility in their operating strategies.
- Reliability and Quality of Service.
- Monitoring and measurement of energy quality in real time.
- Increased Availability: The Micro-Grids can be switched based on network's condition or fee. Reconnect consumer choice.
- Energy Storage. Energy storage has implicit time dependence: a node may inject or extract energy depending on weather and operating conditions.
- Demand response. Allows generators and loads to interact automatically in real time, coordinating demand to flatten spikes. Eliminating the fraction of demand that occurs in these spikes, demand management eliminates the cost of adding reserve generators, cuts wear and extends the equipment's lifespan. Demand management allows users to reduce their energy bills down saying devices priority to

use energy only when it is cheaper too [12].

IV. LOW VOLTAGE LINE CHARACTERIZATION AND MODELING

Because the electrical networks were not initially designed to carry a communication channel, they have several disadvantages such as a wide range of noise, signal attenuation, coupling difficulties, etc. Additionally, electrical networks have different topological configurations, voltage levels and transmission media: aerial or underground. Thus, BPLC usage over electrical networks becomes a challenge when it is used for telecommunications purposes [13].

As the distribution networks contain an undetermined number of customers, determined by the network's rated capacity, the analysis of the communication signal's propagation is a quite complex task.

The data transmission is sensitive to the electric losses and waveform distortion, which itself depends on the load and the demanded reactive power at each part of the system. Devices like capacitor banks can severely prejudice the intensity of the signal.

For the characterization and modeling of the communication channel, the inductance, resistance, capacitance and conductance must be determined and analyzed (Figure 4). These parameters are determined by the properties of the channel used for data transmission. Some of these parameters vary with frequency as resistance; however, the inductance and capacitance values are practically independent of frequency.

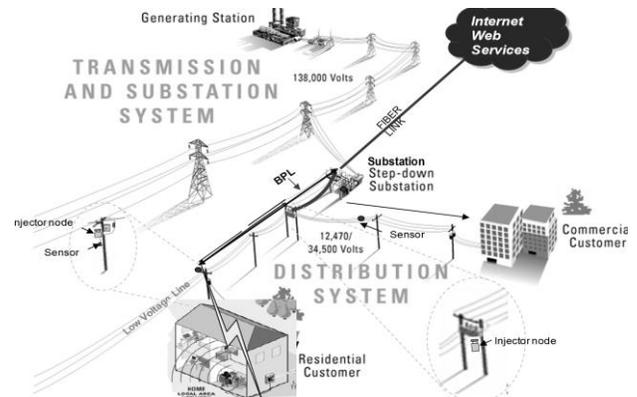


Fig. 4. Low voltage line characterization and modeling. Source: Smart Grid Connectivity Corinex.

The electrical network impedance is strongly determined by the load current, which is not constant and is determined by the variation of the loads.

Besides there are other parameters, known as secondary: characteristic impedance Z_L and the propagation constant γ both parameters depending on the frequency and the primary parameters.

The characteristic impedance can be calculated by the following equation,

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}} \quad (1)$$

And the propagation constant is expressed by

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

R represents resistance per unit length
 G is the leakage conductance per unit length
 L inductance per unit length
 C capacitance per unit length

Where α is called attenuation constant and β phase constant, calculated by the following equation:

$$\alpha = \frac{R}{2Z_L} + \frac{GZ_L}{2} \quad [\text{Nepers}] \quad (3)$$

$$\text{and } \beta \approx \omega\sqrt{LC} \quad [\text{radians per unit Length}] \quad (4)$$

As it was previously mentioned, there are a variety of conductors used in the distribution low voltage networks, which implies that attenuation values and characteristic impedances will be highly disperse. In developing this work, some of the typical topologies commonly used in Colombia were employed. Three-phase-conductor configuration with external concentric neutral used in underground installations and for indoor cables gauges 6, 8, 10, 12 and 14 AWG both phase to neutral, normally installed throughout a half an inch (1/2 in) diameter PVC pipeline, in accordance with Colombian Technical Standard NTC 2050 [5].

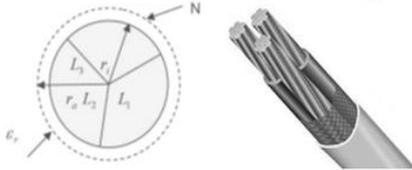


Fig. 5. Three-phase-conductor configuration with external concentric neutral used in underground installations.

For this type of cables, the electric field has a radial symmetry, and it is assumed that the minimum space between conductors is compared with r_a and r_i radii. Due to the similarity of this type of cables to coaxial cables, capacitance and inductance can be calculated with the equations inherent to this. Thus the capacitance and inductance of a coaxial cylinder is given by:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\frac{r_a}{r_i}} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\frac{r_a}{r_i} \quad (6)$$

The resistance per unit length is then given by

$$R = \frac{1}{\sigma a} \left(\frac{1}{2\pi r_a} + \frac{1}{2\pi r_i} \right); \quad R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f\mu_0}{k\pi}} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_i} \right) \quad (7)$$

A high frequency, resistance per unit length R, is determined by a phenomenon called "skin effect" where the current density is higher near the surface of the conductor, and decreases with depth in the conductor. Electric current flows mainly in the "skin" of the conductor, between the outer

surface and a level called the skin depth. A 60 Hz in copper, the skin depth is about 8.5 mm. At high frequencies the skin depth is less. The penetration depth "a" is given by the following equation and as mentioned above depends on the frequency and conductivity of the wires "σ".

$$a = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0}} \quad (8)$$

Conductance losses per unit length of a line can be calculated if the losses are multiplied by the factor capacitance tan δ:

$$G = 2\pi f C * \tan \delta \quad (9)$$

For insulation materials such as PVC missed factor is tan δ << 1, and for high frequencies it is possible to assume that G << ωC and R << ωL that R increases proportionally with the square root of the frequency f. Typical values of the airlines of low voltage networks per unit length are:

Inductance	0,9 – 1,57 mH/Km
Capacitance	(7 – 13) * 10 ⁻³ uF/km
Characteristic impedance	5,6 – 6,4 Ω

The dielectric constant ϵ_r depends on the frequency but is not large variation and the loss factor tan δ in PVC behaved in a nearly linear on the axis on a logarithmic scale.

The attenuation $L(f, l)$ can be calculated from the attenuation factor (f), depending on the length l in dB:

$$L(f, l) \text{ dB} = 20 * \log_{10} (e^{\alpha(f)l}) = 8.686\alpha(f)l \quad (10)$$

In the following graph shows the resultant curve of the characteristic impedance attenuation for a length L = 1 km, and for frequencies between 1 and 20 MHz.

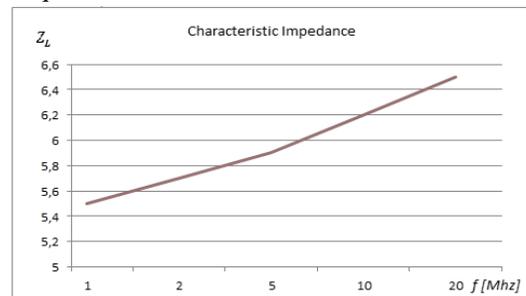


Fig. 6. Characteristic impedance as a function of frequency.

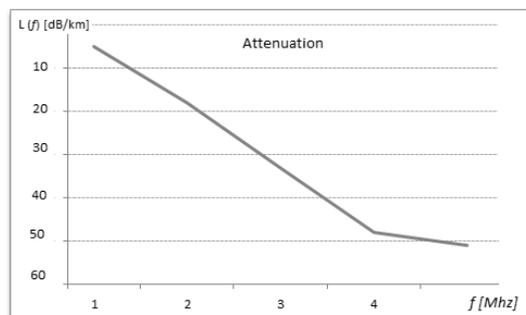


Fig. 7. Attenuation per unit length as a function of frequency

In residential electric installations the wires used are: 6, 8, 10, 12 and 14 AWG. The most common wire gauge is 14 AWG both phase to neutral, and installed along a PVC pipe half inch in diameter. Because the spacing between wires is less than ten times the radius conductors models will be taken to *cosh* equations:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\cosh^{-1} \frac{D}{2r}} \quad (11)$$

$$L = \frac{D}{2r} * \cosh^{-1} \frac{D}{2r} \quad (12)$$

$$R = \frac{1}{\pi r \sigma_c a} \quad (13)$$

For a 14-AWG gauge conductor, corresponding to a 0.8-mm radius, and also assuming distance $D = (1.25 \times 2r)$, and considering that copper is the most common conductor for indoor installations, the graphs of characteristic impedance and attenuation are:

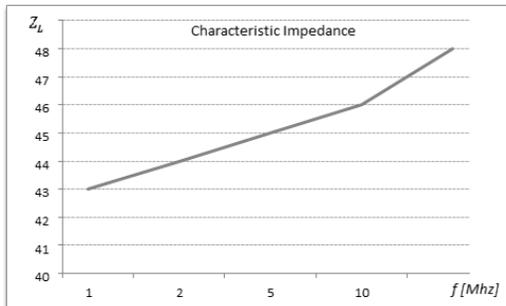


Fig. 8. Characteristic impedance as a function of frequency

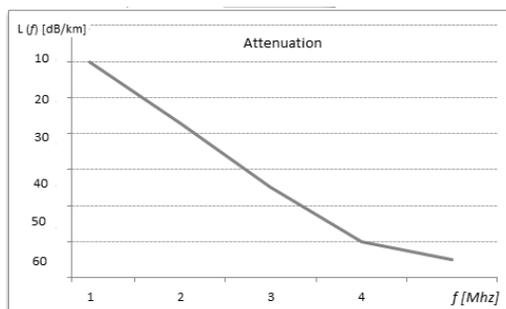


Fig. 9. Attenuation per unit length as a function of frequency

V. THE BPLC SMART GRID NETWORK

The proposed implementation of the smart grid developed in the city of Bogota, capital of Colombia, on a low voltage network.

A. Objectives

The objectives of the intelligent network implementation were:

- Implement a smart grid in a small low voltage electrical network, including communications, renewable energy, automation, control, real-time measurement and power quality monitoring.
- Evaluate the use of technology in the network communication for control, automation, measurement and monitoring.

- Implement the use of renewable energy to meet household consumption. Using solar photovoltaic panels on an isolated network with substitution of the existing power grid.
- Control, automate, measuring and monitoring of equipment investment DC / AC using technology BPLC.
- Measure and analyze power quality in the network according to EN 50160. Report real-time alarms and events using technology BPLC
- Measure real time environmental parameters such as wind speed, irradiance, temperature, plus battery bank monitor and monitor the electrical parameters of the network using BPLC.

B. Description and the Network Topology

The smart grid project supports two main states: the conventional network with investors including synchronized to the grid and the grid where the distribution network or some other type of generator is used to give substitution, in this case the investor is the solely responsible for the supply of this network. If the grid is connected to the power grid, the grid is supplied from the conventional network. The voltage and frequency of the grid are the same as those of the conventional network.

In a grid system, it is possible to integrate a generator as well as the public, as a second backup system, to improve the reliability of the network as mentioned above. This is useful in case of network failures for a long time, when the size of the battery after a certain time is no longer enough to provide electricity during cutting.

The usual solution in these cases is to use a transfer switch, available in manual or automatic. Using a switch of this kind, in the inverter connection (which normally connects the public) will connect a diesel generator.

For the development of this project we used the grid concept with substitution of the distribution network. After designing the system to supply the rated load and ensure the electrical parameters, we proceeded to dimension the investors that were required. According to the design used two inverters Sunny Island and Sunny Boy 3300. In the following picture you can see an overview of the project. In developing the project utilized wind speed sensors, irradiance and temperature, such measurements are sent as shown in the diagram via the RS485 communication to the inverter Sunny Boy, as shown in Figure 10.

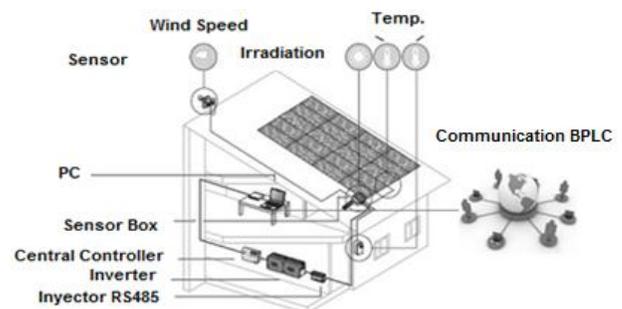


Fig. 10. Overview of the proposed implementation of photovoltaic solar energy, measurement of environmental parameters and smart grid communication. Source SMA Solar

Figure 11 is the wiring diagram of investors to WebBox for sending data to a router through BPLC technology. Then these data can be displayed on the Web site.

of the National University of Colombia in Bogotá to use grids installed for communication, as well as some buildings that can be installed properly some other power plants.

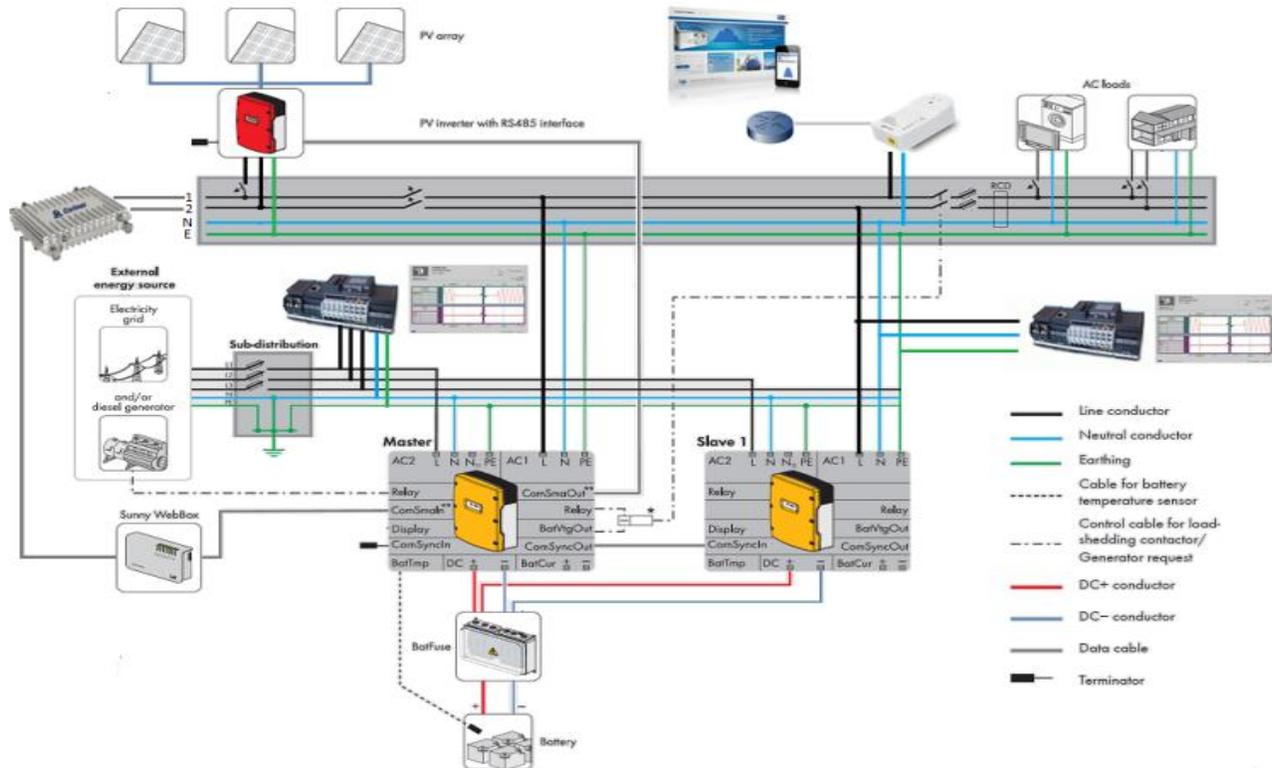


Fig 11. General Scheme of intelligent network connection. Source: SMA Solar Technology AG, Power Standars Lab and Corinex Smart Grid.

VI. NETWORK FUNCTIONALITY

After implementation of the Smart Grid an overview of the situation before and after the network is summarized in the following Table I.

Functionality	Conventional Grid	Smart Grid
Advanced Metering Infrastructure (AMI)	No	Yes
Remote Load Management	No	Yes
Fault Recognition and Identification	No	Yes
Power Quality Measurements	No	Yes
Voltage, current and Power Measurements	No	Yes
Real time outage detection	No	Yes
Reliability and Quality of Service	No	Yes
Wind speed, irradiance, temperature readings	No	Yes
Surveillance and Physical Security	No	Yes
Security	No	Yes
Scalability	No	Yes

Table I. Smart Grid Network functionality

VII. NEXT STEPS

Within the next steps in the development of the smart grid are the expansion of photovoltaic generators currently installed and the inclusion of new customers to the network. It is expected to have for the following projects with the facilities

Another task to develop is to find more benefits from this smart grid and that can be evaluated using performance indices. Also evaluate the use of technology BPLC over other technologies in the communications of the smart grid.

On the communications side, it plans to include IED's on the network and test the use of technology BPLC for communication with protocols IEC61850. Capacity time synchronization with external GPS clock.

Evaluate some power quality indices, such as number and duration of interruptions and measure the reduction of energy consumed in the distribution network, and the availability and reliability of smart grid and reducing non-technical losses. Detection and targeting of failures with the use of the software. Apply computational intelligence techniques for data analysis and decision support in SCADA systems.

Finally we hope to use all intelligent networking concepts and include them in new projects.

VIII. CONCLUSION

In this paper we have presented a detailed walk-through to the small Smart Grid project in Bogota city, deployed using a BPL technology. The challenges faced during design and the lessons learnt during implementation are discussed and analyzed. Low voltage line characterization and modeling and network functionality.

Finally, next steps towards enhancing the performance of BPLC networks are also presented.

REFERENCES

- [1] The smart grid – an introduction, (US) Department of Energy, 2008. <http://www.oe.energy.gov/SmartGridIntroduction.htm>.
- [2] Smart Grids, European technology platform for the electricity networks of the future. <http://www.smartgrids.eu/>
- [3] Ramírez, A. “Análisis y diseño de un modelo para la lectura de datos de los contadores del servicio de energía eléctrica en un tramo de baja Tensión utilizando la red de suministro de este servicio”. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá 2007.
- [4] J. Anatory and N. Theethayi. Broadband Power-line Communication Systems. Theory and Applications. WITPress. Southampton, Boston. 2010.
- [5] Colombian Institute of Technical Standards and Certification ICONTEC. Colombian Technical Standard NTC 2050. <http://www.icontec.org>
- [6] National Institute of Standards and Technology (NIST) and U.S. Department of Commerce, “NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards,” NIST Draft Publication, Release 1.0, January 2010.
- [7] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2000.
- [8] Shaobu Wang, Xiangyu Meng, and Tongwen Chen Wide-Area Control of Power Systems Through Delayed Network Communication. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 20, NO. 2, MARCH 2012.
- [9] “Arbiter System, Inc”. Available: [http:// www.arbiter.com](http://www.arbiter.com)
- [10] Intelligent Distribution Automation System: Customized SCADA Based Rtu For Distribution Automation System, M.Sc. Research Project, UTeM, 2005-2007.
- [11] Manual for HVDC. Available at: <http://www.abb.com/HVDC>.
- [12] Energy Future Coalition, “Challenge and Opportunity: Charting a New Energy Future,” Appendix A: Working Group Reports, Report of the Smart Grid Working Group.
- [13] Dostert, K., Zimmermann, M., Waldeck, T., Arzberger, M., Fundamental. properties of the low voltage power distribution grid used as a data channel., European Transactions on Telecommunications (ETT), Vol. 11, No. 3, May/June 2000.

Broadband over Power-Line Networks for control and automation systems within Smart Micro-grids (SMGs)

Yefersson Cañon De Antonio¹, Andrés Pavas², Senior Member IEEE.
 Department of Electrical and Electronic Engineering
 Universidad Nacional de Colombia
 Bogotá, Colombia

Abstract— This paper presents a review of Broadband over Power Line Communication technology as a mean of communication for the detection, control and automation of an Smart Micro grid (SMGs). Some of the applications in which this type of technology can be used are sending information from power quality meters, energy management and automation systems, demand management, among others. A review and an analysis about the communication system requirements based on BPLC is presented, particular emphasis is paid to the currently installed network conditions required to allow the utilization of this technology.

Keywords; Power Line Communication (PLC), Broadband over PowerLine (BPLC), Advanced Metering Infrastructure (AMI), Automatic meter reading (AMR), Smart Grid, Micro Grid, Power Quality monitoring, distribution automation.

I. INTRODUCTION

Smart Micro-Grid is based on flexible network topology, communication systems, IEDs and measurement technology, protection and control device, power electronics equipment, integration the solar photovoltaic generation, wind power, small hydro biomass power generation, gas generation or diesel power generation, fuel cell and energy storage devices storage technologies for balancing production and consumption, achieving reliability, security, software support operational decisions that allow more efficient operation network. Such benefits are expected to be experienced by all the agents involved in the electricity production like the energy customers, utilities and generating facilities [1][2][3]. Along with the growth of smart grids worldwide a discussion about the most suitable communication options has been carried out. Among the more commonly employed technologies for this kind of network, Broadband over Power Line Communication offers several attractive options by means of the usage of higher frequencies, a wider frequency range and high speed.

BPLC is a technology capable of handling data and voice transmission through already installed electric networks. The BPLC technology comprises a group of elements and transmission systems, so that other services are offered to

customers like internet, telephone, television, remote data reading, control, etc., besides electricity.

By means of to this technology communication services can be accessed through the electric sockets. Thanks to the electric network and the BPLC, it is possible to provide internet service to further places where electric network is available but no communication networks exists. In addition, measurements like power consumption and power quality can be performed, recording information useful for the customers and the utilities, as shown in Figure 1.

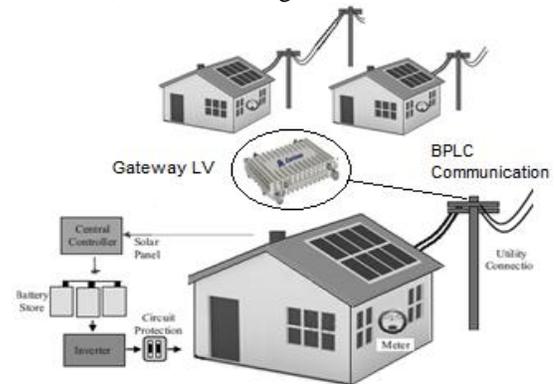


Fig. 1. Integration of small-scale renewable energy systems.

The transmission of data using BPLC permits to offer several new services, particularly in low-voltage networks. Among other services, BPLC enables the ability to remotely turn on or off a customer, electricity revenue metering, detecting a service outage, detecting any unauthorized use of electricity, improving asset management and streamline the operation of the overall network, active demand management, fault location and additional services as TV and Internet [4], as it has been stated before. BPLC is an attractive option because it uses existing infrastructure.

In order to integrate the electricity and the BPL communication systems at low voltage electric systems, it is necessary to analyze the network's capabilities and characteristics for BPLC transmission [5]. The network's topology, frequency response and bandwidth lead to the determination of the communication capabilities of the network, which depend strongly on the manner it has been constructed. In Colombia, all networks are built according to the Colombian Technical Standard NTC 2050 [5], based mainly on the National Electric Code NEC or NFPA 70.

¹ Y. Cañón (ybcanond@unal.edu.co) is MSc candidate at the Universidad Nacional de Colombia and Researcher with the PAAS-UN Group.

² A. Pavas (fapavasm@unal.edu.co) is Profesor with the Department of Electrical and Electronic Engineering of the Universidad Nacional de Colombia and Researcher with the PAAS-UN Group.

In this paper, the place for the integration of the electric and the communication systems is proposed to be the distribution transformer, nearby the customers or at the distribution substations. At this location, the coupling is done between the electric networks with complementary devices. Such devices will receive and send information, turning the transformer or the substation into a local control center, where measurements and information can be analyzed.

This paper studies the technical characteristics and the low voltage network's electric model established in the standard NTC 2050 and the Technical Regulations for Electrical Installations RETIE, determining the possibilities and limitations for data transmission.

II. CONTROL AND AUTOMATION IN SMART GRIDS

At present the most technologies applied to electrical networks is in transmission. These technologies convert conventional grids into smart grids. Some of the technologies used in these new networks are:

- FACTS Devices (Flexible Alternating Current Transmission System) that allow transmission lines to provide maximum power and help stabilize the network with an exact power controlled. FACTS encompass all systems based on power electronics used for power transmission [7].
- Control Systems Wide Area (WAMS) is a distributed measurement system in power system phasor measurements involving (PMU) capable of rapidly analyzing anomalies in electricity quality in large geographical areas to prevent the development of dangerous instability in the network [8].
- Phasor Measurement Unit (PMU) or Synchrophasor, is a device used to observe accurately the dynamic state of the electrical system. The PMU data obtained secondary windings of power transformers and current are then processed to obtain the voltage and current phasors and then be sent to the hub receives data that organizes and distributes [9].
- Data Acquisition Systems and Supervisory Control (SCADA) analyze the electrical network conditions in real time, providing data for fast power settings [10].
- A High-Voltage, Direct Current (HVDC), can deliver power over long distances with low losses on land and underwater, and connect asynchronous networks. For underwater power cables, HVDC avoids the heavy currents required to charge and discharge the cable capacitance each cycle [11].

A. Smart Grid Benefits

BPLC technology provides a solution for real-time communication for automating electrical systems, improving service reliability. Intelligent electronic devices (IEDs) and systems that protect receive sensor data and equipment and can issue control commands, if they detect abnormal voltage, current or frequency, voltage raised or decreased levels in order to maintain the desired voltage quality. Some of the benefits obtained with the automation of power grids are listed

below:

- Reduced O&M Expenditures. Using IEDs to monitor power factor in real-time will save on generation and reduce generation emissions.
- Reliability. Detection fault location, fault insulation and service restoration functionality.
- Flexibility in network topology. Controlling bidirectional energy flows that occur with the inclusion of new sources of power generation to the grid, for example photo voltaic cells, electric cars, wind turbines, among others.
- Efficiency. One of the improvements of intelligent network is to improve the efficiency of energy use, particularly with the use of a smart power management in order to obtain homogeneity in the load curve, for example for example turning off air conditioners during short-term spikes in electricity price. The intelligent use of technology to improve the efficiency of electrical networks and manage the balance between supply and demand reduces the need for emergency generators. In addition, demand management and the creation of better storage allow the flexibility to manage the intermittency of renewable energy sources.
- Sustainability. The flexibility of Smart Grids allows the penetration of new renewable energy sources to electricity generation and thus has a variety of ability to meet demand.
- Market. Bidirectional communication between consumers and energy suppliers, allowing greater flexibility in their operating strategies.
- Reliability and Quality of Service.
- Monitoring and measurement of energy quality in real time.
- Increased Availability: The Micro-Grids can be switched based on network's condition or fee. Reconnect consumer choice.
- Energy Storage. Energy storage has implicit time dependence: a node may inject or extract energy depending on weather and operating conditions.
- Demand response. Allows generators and loads to interact automatically in real time, coordinating demand to flatten spikes. Eliminating the fraction of demand that occurs in these spikes, demand management eliminates the cost of adding reserve generators, cuts wear and extends the equipment's lifespan. Demand management allows users to reduce their energy bills down saying devices priority to use energy only when it is cheaper too [12]

III. THE BPLC SMART GRID NETWORK

The proposed implementation of the smart grid developed in the city of Bogota, capital of Colombia, on a low voltage network.

A. Objectives

The objectives of the intelligent network implementation were:

- Implement a smart grid in a small low voltage electrical network, including communications, renewable energy, automation, control, real-time measurement and power quality monitoring.
- Evaluate the use of technology in the network communication for control, automation, measurement and monitoring.
- Implement the use of renewable energy to meet household consumption. Using solar photovoltaic panels on an isolated network with substitution of the existing power grid.
- Control, automate, measuring and monitoring of equipment investment DC / AC using technology BPLC.
- Measure and analyze power quality in the network according to EN 50160. Report real-time alarms and events using technology BPLC.
- Measure real time environmental parameters such as wind speed, irradiance, temperature, plus battery bank monitor and monitor the electrical parameters of the network using BPLC.

B. Description and the Network Topology

The smart grid project supports two main states: the conventional network with investors including synchronized to the grid and the grid where the distribution network or some other type of generator is used to give substitution, in this case the investor is the solely responsible for the supply of this network. If the grid is connected to the power grid, the grid is supplied from the conventional network. The voltage and frequency of the grid are the same as those of the conventional network.

In a grid system, it is possible to integrate a generator as well as the public, as a second backup system, to improve the reliability of the network as mentioned above. This is useful in case of network failures for a long time, when the size of the battery after a certain time is no longer enough to provide electricity during cutting.

The usual solution in these cases is to use a transfer switch, available in manual or automatic. Using a switch of this kind, in the inverter connection (which normally connects the public) will connect a diesel generator.

For the development of this project we used the grid concept with substitution of the distribution network. After designing the system to supply the rated load and ensure the electrical parameters, we proceeded to dimension the investors that were required. According to the design used two inverters. In the following picture you can see an overview of the project. In developing the project utilized wind speed sensors, irradiance and temperature, such measurements are sent as shown in the diagram via the RS485 communication to the inverter, as shown in Figure 2.

IV. NETWORK FUNCTIONALITY

After implementation of the Smart Grid an overview of the situation before and after the network is summarized in the following Table I.

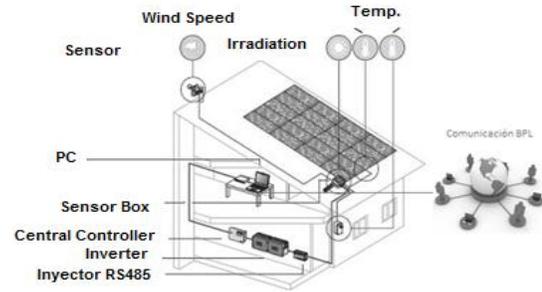


Fig. 2. Overview of the proposed implementation of photovoltaic solar energy, measurement of environmental parameters and smart grid communication. Source SMA Solar

A. Advanced Metering Infrastructure (AMI)

AMI differs from traditional Automatic meter reading (AMR) in that it enables two-way communications with the meter. Systems only capable of meter readings do not qualify as AMI systems.

AMI systems cross the barrier and goes far beyond the systems of AMR (Automatic Meter Reading) in the sense that enables two-way communication with the meter. The systems in which only has the ability to meter reading systems are not considered AMI. AMI refers to a system which measures, collects and analyzes energy consumption from different devices in two ways. The inclusion of measurement devices can be collecting and distributing information to users and service providers.

The AMI Project will be conducted with the Landis AD meters, showcasing an embedded Corinex's BPL Smart Communication Module. From the poles where the meters are located, user data will be collected and sent along the electrical wires at broad band speeds to the SG200 Gateway, which will be located at the transformers. The data collected by the SG200 Gateways will be backhauled to the central office. The backhaul communication will be done via GPRS.

B. Remote Load Management

The load control is one of the main objectives of a Smart Grid. Also known as demand management is the process of balancing the electricity network with electrical charge by adjusting or controlling the load in place of the output of the power station. This can be achieved by using special rates to influence consumer behavior or by automating certain disconnection or connection charges in a given time. In one network implementation was the automated lighting loads. The load acting by using presence sensors at any time of day or user defined times. The inverter used for this project to program the power contactor for load shedding. The inverter can automatically switch off loads to protect the battery from deep discharge. If, over a long period, consumers connected to the inverter consume more energy than that produced by the generators connected, the battery can be completely discharged. Reaching a state of charge of the battery too low, the inverter automatically shuts off. Consequently, the investor avoids a complete discharge of the battery. When the inverter automatically shut down, consumers do not receive power and the generators connected to the inverter cannot recharge the battery. You can set the inverter so that automatically charge your battery through the network when the charge is low.

C. Power Quality monitoring

Due to the importance of involving the power quality in conventional networks also becomes a vital issue in smart grids. The appropriate power quality required ensures compatibility between all devices connected to the network. The introduction of new sources of generation and network equipment are a challenge for new approaches to quality management of energy.

Through the use of new communication technologies as BPLC, can establish new ways to manage power quality. In the development of this project we used a measuring equipment Class A power quality at the point of connection of network and investor and point of connection with load for measurement of events and failures in real time using BPLC technology. The following is the wiring diagram of the equipment to the point of interest:

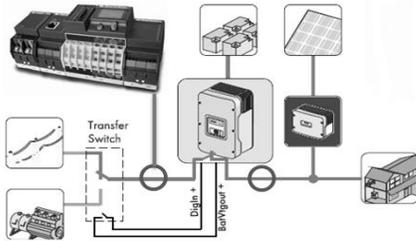


Fig 3. Measurement points for power quality analysis

By using Ethernet module data are sent through the same network using BPLC. The data is taken through a router, allowing access through any Internet access point so they can be viewed by the user. The Ethernet module is configured so that whenever any type of event the equipment sends a report to an assigned email. Besides the above can also be configured again, permitting change defined before. The following is a visualization of the portal to display the above data.

D. Real time outage detection

Corinex Smart Grid Connect (SGC) offers operators not only the ability to manage and monitor their network, but also automates a number of complex, tedious, and error-prone tasks. Smart Grid Connect maximizes the operational efficiency by providing proactive diagnostics, minimizing service deployment times, reducing deployment and maintenance costs for Network Operations Center.

Corinex will also provide a web based portal, where all your customers will be able to see their energy consumption at any time, from anywhere! The Corinex Power Meter Web Portal will be accessible through any internet connection. All end users will be able to view their consumption; they will have flexibility on how to view the data that is important to them.

E. Scope Management and Change Control

Process to manage proposed changes to project scope defined during the requirements phase, and ensuring all changes to baseline scope are identified, controlled, consistently handled, and traced throughout the project life cycle.

F. Power Outage Control and Restoration

Outage Management is really two operating functions that are created and enabled through the system wide deployment of Smart Grid architectures: Proactive Outage Detection and Notification. With Smart Grid, almost every electric grid element becomes part of a private, secure digital communications network. As such, substation, feeders, cap banks, switches, transformers and other elements can be viewed in their natural operating state. Baseline metrics are established, and performance deterioration identified and prioritized way before the point of failure. This can be used to determine a faulty insulator or a pending transformer failure.

V. LOW VOLTAGE LINE CHARACTERIZATION AND MODELING

Because the electrical networks were not initially designed to carry a communication channel, they have several disadvantages such as a wide range of noise, signal attenuation, coupling difficulties, etc. Additionally, electrical networks have different topological configurations, voltage levels and transmission media: aerial or underground. Thus, BPLC usage over electrical networks becomes a challenge when it is used for telecommunications purposes [14].

As the distribution networks contain an undetermined number of customers, determined by the network's rated capacity, the analysis of the communication signal's propagation is a quite complex task.

The data transmission is sensitive to the electric losses and waveform distortion, which itself depends on the load and the demanded reactive power at each part of the system. Devices like capacitor banks can severely prejudice the intensity of the signal.

For the characterization and modeling of the communication channel, the inductance, resistance, capacitance and conductance must be determined and analyzed. These parameters are determined by the properties of the channel used for data transmission. Some of these parameters vary with frequency as resistance; however, the inductance and capacitance values are practically independent of frequency.

The electrical network impedance is strongly determined by the load current, which is not constant and is determined by the variation of the loads.

Besides there are other parameters, known as secondary: characteristic impedance Z_L and the propagation constant γ both parameters depending on the frequency and the primary parameters.

The characteristic impedance can be calculated by the following equation,

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}} \quad (1)$$

And the propagation constant is expressed by

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

R represents resistance per unit length

G is the leakage conductance per unit length

L inductance per unit length
C capacitance per unit length

Where α is called attenuation constant and β phase constant, calculated by the following equation:

$$\alpha = \frac{R}{2Z_L} + \frac{GZ_L}{2} \quad [\text{Nepers}] \quad (3)$$

$$\text{and } \beta \approx \omega\sqrt{LC} \quad [\text{radians per unit Length}] \quad (4)$$

As it was previously mentioned, there are a variety of conductors used in the distribution low voltage networks, which implies that attenuation values and characteristic impedances will be highly disperse. In developing this work, some of the typical topologies commonly used in Colombia were employed. Three-phase-conductor configuration with external concentric neutral used in underground installations and for indoor cables gauges 6, 8, 10, 12 and 14 AWG both phase to neutral, normally installed throughout a half an inch ($\frac{1}{2}$ in) diameter PVC pipeline, in accordance with Colombian Technical Standard NTC 2050 [5].

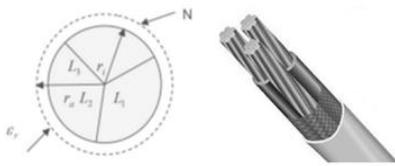


Fig. 4. Three-phase-conductor configuration with external concentric neutral used in underground installations.

For this type of cables, the electric field has a radial symmetry, and it is assumed that the minimum space between conductors is compared with r_a and r_i radii. Due to the similarity of this type of cables to coaxial cables, capacitance and inductance can be calculated with the equations inherent to this. Thus the capacitance and inductance of a coaxial cylinder is given by:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\frac{r_a}{r_i}} \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\frac{r_a}{r_i} \quad (6)$$

The resistance per unit length is then given by

$$R = \frac{1}{\sigma a} \left(\frac{1}{2\pi r_a} + \frac{1}{2\pi r_i} \right); \quad R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f\mu_0}{k\pi}} \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_i} \right) \quad (7)$$

A high frequency, resistance per unit length R, is determined by a phenomenon called "skin effect" where the current density is higher near the surface of the conductor, and decreases with depth in the conductor. Electric current flows mainly in the "skin" of the conductor, between the outer surface and a level called the skin depth. A 60 Hz in copper, the skin depth is about 8.5 mm. At high frequencies the skin depth is less. The penetration depth "a" is given by the following equation and as mentioned above depends on the frequency and conductivity of the wires "σ".

$$a = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0}} \quad (8)$$

Conductance losses per unit length of a line can be calculated if the losses are multiplied by the factor capacitance $\tan \delta$:

$$G = 2\pi f C * \tan \delta \quad (9)$$

For insulation materials such as PVC missed factor is $\tan \delta \ll 1$, and for high frequencies it is possible to assume that $G \ll \omega C$ and $R \ll \omega L$ that R increases proportionally with the square root of the frequency f.

Typical values of the airlines of low voltage networks per unit length are:

Inductance	0,9 – 1,57 mH/Km
Capacitance	$(7 - 13) * 10^{-3} \mu F/km$
Characteristic impedance	5,6 – 6,4Ω

The dielectric constant ϵ_r depends on the frequency but is not large variation and the loss factor $\tan \delta$ in PVC behaved in a nearly linear on the axis on a logarithmic scale.

The attenuation $L(f, l)$ can be calculated from the attenuation factor (f), depending on the length l in dB:

$$L(f, l) \text{ dB} = 20 * \log_{10} (e^{\alpha(f)l}) = 8.686\alpha(f)l \quad (10)$$

In the following graph shows the resultant curve of the characteristic impedance attenuation for a length L = 1 km, and for frequencies between 1 and 20 MHz.

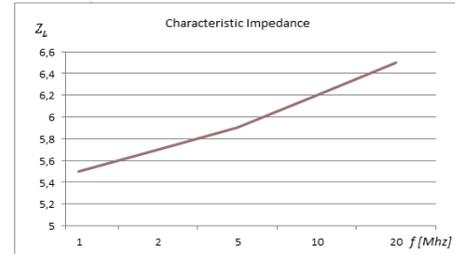


Fig. 5. Characteristic impedance as a function of frequency.

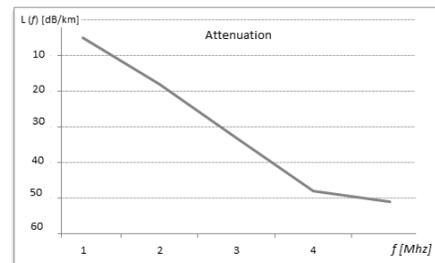


Fig. 6. Attenuation per unit length as a function of frequency

In residential electric installations the wires used are: 6, 8, 10, 12 and 14 AWG. The most common wire gauge is 14 AWG both phase to neutral, and installed along a PVC pipe half inch in diameter. Because the spacing between wires is less than ten times the radius conductors models will be taken to *cosh* equations:

$$C = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\cosh^{-1} \frac{D}{2r}} \quad (11)$$

$$L = \frac{D}{2r} * \cosh^{-1} \frac{D}{2r} \quad (12)$$

$$R = \frac{1}{\pi r \sigma_c a} \quad (13)$$

For a 14-AWG gauge conductor, corresponding to a 0.8-mm radius, and also assuming distance $D = (1.25 \times 2r)$, and considering that copper is the most common conductor for indoor installations, the graphs of characteristic impedance and attenuation are:

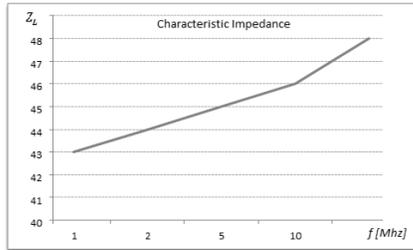


Fig. 7. Characteristic impedance as a function of frequency

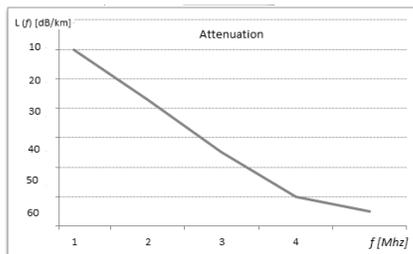


Fig. 8. Attenuation per unit length as a function of frequency

According to the analysis shows that the cable attenuation is essentially determined by the properties of the dielectric. The attenuation does not reach critical values at frequencies of 20 MHz in length of 1 km, leading to the conclusion that these networks could be used without difficulty for transportation of communication signals [13].

VI. NEXT STEPS

Within the next steps in the development of the smart grid is the expansion of photovoltaic generators currently installed and the inclusion of new customers to the network. Is expected to have for the following projects with the facilities of the National University of Colombia in Bogotá to use grids installed for communication, as well as some buildings that can be installed properly some other power plants.

Another task to develop is to find more benefits from this smart grid and that can be evaluated using performance indices. Also evaluate the use of technology BPLC over other technologies in the communications of the smart grid.

On the communications side, it plans to include IED's on the network and test the use of technology BPLC for communication with protocols IEC61850. Capacity time synchronization with external GPS clock.

Evaluate some power quality indices, such as number and duration of interruptions and measure the reduction of energy consumed in the distribution network, and the availability and reliability of smart grid and reducing non-technical losses.

Detection and targeting of failures with the use of the software. Apply computational intelligence techniques for data analysis and decision support in SCADA systems.

Finally we hope to use all intelligent networking concepts and include them in new projects.

VII. CONCLUSION

In this paper we have presented a detailed walk-through to the small Smart Grid project in Bogota city, deployed using a BPL technology. The challenges faced during design and the lessons learnt during implementation are discussed and analyzed. Low voltage line characterization and modeling and network functionality.

Finally, next steps towards enhancing the performance of BPLC networks are also presented.

REFERENCES

- [1] TAO Wei-qing and YUAN Xin-xi. Investigation on the Application of IEC 61850 in Smart Distribution Grid with Micro-Grid. International Conference on Control Engineering and Communication Technology. 2012.
- [2] The smart grid – an introduction, (US) Department of Energy, 2008. <http://www.oe.energy.gov/SmartGridIntroduction.htm>.
- [3] SmartGrids, European technology platform for the electricity networks of the future. <http://www.smartgrids.eu/>
- [4] Ramirez, A. “Análisis y diseño de un modelo para la lectura de datos de los contadores del servicio de energía eléctrica en un tramo de baja Tensión utilizando la red de suministro de este servicio”. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá 2007.
- [5] J. Anatory and N. Theethayi. Broadband Power-line Communication Systems. Theory and Applications. WITPress. Southampton, Boston. 2010.
- [6] Colombian Institute of Technical Standards and Certification ICONTEC. Colombian Technical Standard NTC 2050. <http://www.icontec.org>
- [7] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2000.
- [8] Shaobu Wang, Xiangyu Meng, and Tongwen Chen Wide-Area Control of Power Systems Through Delayed Network Communication. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 20, NO. 2, MARCH 2012.
- [9] “Arbiter System, Inc”. Available: <http://www.arbiter.com>
- [10] Intelligent Distribution Automation System: Customized SCADA Based Rtu For Distribution Automation System, M.Sc. Research Project, UTeM, 2005-2007.
- [11] Manual for HVDC. Available at: <http://www.abb.com/HVDC>.
- [12] Energy Future Coalition, “Challenge and Opportunity: Charting a New Energy Future,” Appendix A: Working Group Reports, Report of the Smart Grid Working Group.
- [13] Henry Bastidas Mora, Marlon Patiño Bernal, Gilma Inés Ángel Castillo. Modelo de cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas de baja tensión subterráneas en instalaciones internas para uso en telecomunicaciones. INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 31 No. 3, DECEMBER 2011 (121-129)
- [14] Dostert, K., Zimmermann, M., Waldeck, T., Arzberger, M., Fundamental. properties of the low voltage power distribution grid used as a data channel., European Transactions on Telecommunications (ETT), Vol. 11, No. 3, May/June 2000.
- [15] Cañete, F. “Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha”. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga (España). Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. 2005.

PLC en la Red de Baja Tensión para Medición Inteligente

Yefersson Cañon De Antonio¹, Andrés Pavas², Senior Member IEEE.
Department of Electrical and Electronic Engineering
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia

Resumen—Este documento presenta el enfoque global de la utilización de la tecnología PLC en baja tensión, como alternativa para el monitoreo, lectura remota, suspensión y reconexión, seguimiento de clientes y de esta manera mejorar la gestión del proceso comercial y la gestión técnica de reducción de pérdidas. Se enfatiza en las ventajas y sus beneficios y las implicaciones que conlleva la implementación de esta nueva alternativa en el sector eléctrico como parte de la integración de las redes de baja tensión a las redes inteligentes (Smart Grid).

Palabras Claves—Power Line Carrier (PLC), AMI: Advanced Metering Infrastructure (Infraestructura de Medición Avanzada, AMR, Generación Distribuida).

I. POWER LINE COMMUNICATION

Power Line Communication (PLC), es una tecnología que permite la conexión a internet, envío de datos y otros servicios a través de la red eléctrica ya instalada. La transmisión de datos utilizando PLC, consiste principalmente en utilizar las redes eléctricas como el canal para la transmisión de información y diversos servicios que se pueden ofrecer, específicamente en las líneas de baja tensión y con interés económico de las empresas de energía eléctrica, como lectura remota de consumo, suspensión, reconexión, optimizar el suministro y gestión de la demanda, minimizar las pérdidas, localización de fallas, mejorar la gestión de activos y racionalizar el funcionamiento de la red en general, ofreciendo al cliente una mayor seguridad del suministro y la posibilidad de una gestión activa de la demanda y otros servicios adicionales como Televisión e Internet; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

PLC resulta una opción atractiva, pues utiliza las redes eléctricas de baja tensión, de este modo no requiere infraestructura adicional, evitando una inversión adicional en este aspecto y ofreciendo la posibilidad de vincular estas redes a las famosas Redes Inteligentes del futuro, que posibilitan la inclusión de nuevas fuentes de generación eléctrica más cerca

de la carga o en el mismo sitio de consumo, como se muestra en la Figura 2.

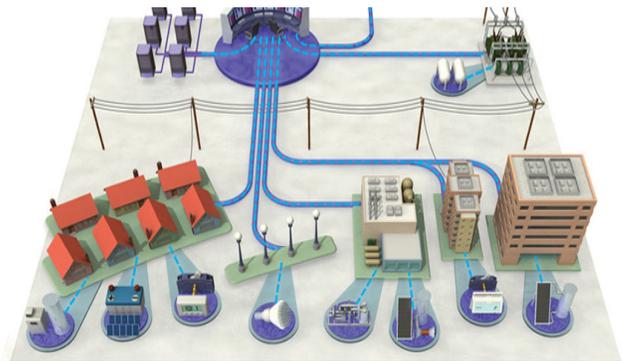


Fig. 1. Medición Inteligente-Smart Metering. Fuente EPRI.

En 1975, las compañías United Utilities de Canada y Northern Telecom de Reino Unido, presentaron un PLC. Los primeros proyectos sobre la tecnología PLC fueron desarrollados entre los años 1976 y 1978, en Glenrothes Escocia, por los ingenieros de la empresa Pico Electronics Ltda. y la empresa de sistemas de audio BSR. El propósito de estas empresas era controlar un dispositivo electrónico de forma remota. Como resultado de estos proyectos, estudios y experimentación nació el protocolo X-10[2].



Fig. 2. Generación Distribuida. Fuente SMA Solar Technology

Desde hace muchos años las compañías de distribución de energía eléctrica han utilizado sus redes como medio de transmisión de datos a baja velocidad. Sin embargo, en la segunda mitad de los años 90, se logró experimentar un notable impulso la investigación en sistemas de transmisión de

¹ Y. Cañón (ybcanond@unal.edu.co) is MSc candidate at the Universidad Nacional de Colombia and Researcher with the PAAS-UN Group.

² A. Pavas (fapavasm@unal.edu.co) is Profesor with the Department of Electrical and Electronic Engineering of the Universidad Nacional de Colombia and Researcher with the PAAS-UN Group.

banda ancha sobre redes eléctricas ya instaladas, debido a la desaparición de los monopolios europeos de operadoras de telecomunicación. También surgió el interés por desarrollar sistemas de transmisión en interiores que sirvieran como base para redes de datos de área local[3].

PLC surge en el seno de las empresas eléctricas como una nueva alternativa que, basándose en la infraestructura existente asociada a la distribución eléctrica, pueden complementar las redes existentes de banda ancha suplidas mediante líneas ADSL o con enlaces contratados a operadores de cable y llegar a mucho más usuarios de nuestro país. Desde hace varios años atrás las empresas eléctricas en varios países han usado la tecnología PLC para el envío y recepción de datos para uso simplemente interno de la empresa, pero actualmente, luego de varias investigaciones y pruebas piloto, este sistema orientado a brindar un acceso a Internet a alta velocidad se comercializa en varias ciudades de España como Madrid, Barcelona, Zaragoza y en otros países en el mundo[4].

II. INTEGRACIÓN DE PLC AL SISTEMA NACIONAL

Mediante la integración de PLC al Sistema Eléctrico Nacional, se puede dar servicio de internet a través de las redes existentes tanto en áreas cercanas como alejadas, ya que involucra una de las infraestructuras más extendidas en el territorio nacional como lo es la Red de transmisión eléctrica y de esta forma poder cumplir con los objetivos propuestos en programas de masificación de este servicio. Vive Digital Colombia³ es uno de estos programas que busca promover el uso y apropiación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en diferentes sectores de la vida económica y social de Colombia, y PLC puede ser una solución de última milla para poder ofrecer servicio de Internet a la población sin necesidad de montar una nueva infraestructura, sencillamente un Proveedor de Servicios de Internet (ISP) proporciona los datos a un terminal de onda portadora, el cual se ubica en una subestación eléctrica y se conecta a las redes, por estas redes viajan juntas la señal eléctrica a 60 Hz y la señal de datos a una alta frecuencia, evitando que se afecten entre sí. Muchos países han implementado planes de masificación de Internet en los últimos años. Entre los más exitosos están países como Corea del Sur, Japón, Hong Kong y los países nórdicos, donde los niveles de penetración son mucho mayores que el promedio mundial. Como parte de la investigación desarrollada para la formulación del Plan Vive Digital, se estudiaron distintos casos de diseño e implementación de planes de tecnología alrededor del mundo, y poder ver la importancia de la masificación de la información.

El lugar de integración del sistema eléctrico y de comunicación se da en el transformador o en la subestación de

³ Vive Digital es una organización que trabaja por el uso y apropiación de las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) en diferentes sectores como educación, productividad, gobierno, entre otros.

distribución. Aquí se produce el acoplamiento de la red eléctrica con equipos complementarios que en un extremo se enlazan a una conexión de alta velocidad instalada en la subestación, donde llegara la información obtenida de cada usuario de la red eléctrica y de esta forma esta se convertiría en una central de control donde se analizarán los datos obtenidos. Es por esto que cada usuario tendrá instalado un dispositivo que posibilita el envío y la recepción de datos a través de su instalación eléctrica y la Compañía Eléctrica tendrá un dispositivo de recepción de datos, ubicada en una subestación (o transformador local) y desde este punto, mediante fibra óptica u otro medio, se conecta con el ISP.

III. INFRAESTRUCTURA AVANZADA DE MEDICIÓN (AMI)

La vinculación de las nuevas fuentes de generación al sistema eléctrico requerirá una nueva forma de medición. Dicha medición requiere que pase de ser direccional a bidireccional, que permita no solo la medición de energía procedente de la red, sino que además mida la cantidad de energía que el usuario en hora de poco consumo vende al sistema. AMI es una nueva forma de medición que permite la comunicación en dos vías. Los sistemas AMI cruzan la barrera y van mucho más allá de los sistemas de AMR (Automatic Meter Reading), que solo lo hace en una vía. Los sistemas en los cuales solamente se cuenta con la capacidad de lectura del medidor no se consideran sistemas AMI. AMI se refiere a un sistema que mide, recolecta y analiza el consumo de energía, desde diferentes dispositivos en dos vías. Mediante la inclusión de dispositivos de medida se puede hacer recolección y distribución de información a los usuarios y proveedores de servicio.

Mediante la utilización de AMI se obtiene mejorar la gestión comercial de la empresas mediante la medición remota de medidores, disminución del tiempo del ciclo de facturación, eliminación de errores en lectura y facturación, suspensión y reconexión remota, monitoreo permanente del usuario, seguimiento y control a clientes, venta de energía prepago, medición en tiempo real, etc

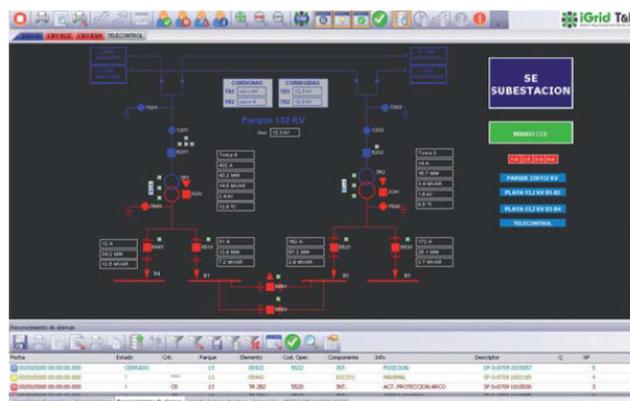


Fig. 2. Visualización de medición. Fuente iGrid T&D

Al igual que AMR, AMI utiliza tres elementos o bloques fundamentales, un sistema de comunicación con los equipos de medida, un sistema de medida y por último un sistema de información (Software).

IV. LOCALIZACION DE FALLAS

Mediante la tecnología PLC se puede también resolver el problema de localización de fallas mediante la integración de los módems del PLC en el transformador y de esta forma hacer que la detección de fallas se haga en un menor tiempo.

La localización de fallas en una red de distribución es mucho más difícil que en una red de transmisión, por lo general las funciones de protección y la localización de fallas asociadas a ellos están en la subestación.

Debido a la topología compleja de aguas abajo de red, el valor calculado está lejos de ser lo más preciso para un rápido y confiable servicio de restauración, por lo que cualquier método que ayuda a localizar las fallas, tan pronto como sea posible será una buena alternativa, y con la tecnología PLC se conseguirá dar solución a ese tipo de problemas.

V. MEDICIÓN INTELIGENTE EN COLOMBIA

En Colombia, recientemente la empresa EMCALI, invirtió en la implementación de la tecnología PLC para la medición, control de consumos de energía. Mediante la tecnología denominada TWACS (de las siglas en inglés Two-Way Automated Communications System), que provee una comunicación única bi-direccional sobre las líneas de energía para recolectar, comunicar, analizar, y manejar información sobre el consumo de electricidad, agua y gas.

Electricaribe también adelanta un proyecto en zonas subnormales como Nelson Mandela, cumpliendo con las disposiciones del Gobierno Nacional, a través de su Ministerio de Minas y Energía. Mediante este proyecto se implementó un sistema de “medida inteligente” que ofrezca mejores beneficios para las comunidades. El sistema de medición es centralizado e integra tecnología de medida, de telecomunicaciones y de información, con el objetivo de reducir las pérdidas no técnicas que tiene actualmente la empresa y verificar la calidad del suministro eléctrico.

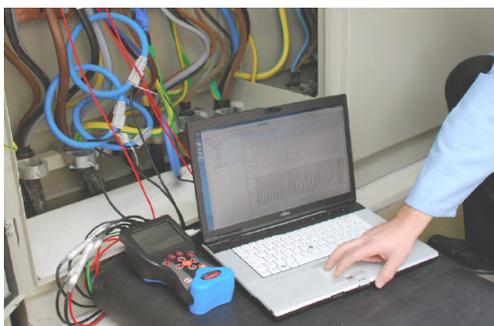


Fig 3. Medición de calidad de energía. Fuente: METREL.

El sistema permite la gestión integral de los Clientes de la empresa, y los demás elementos de una red de energía que puedan ser operados en forma remota. Este cuenta con los siguientes elementos: Contadores Electrónicos con Gestión Remota, Dispositivos de Activación de Desactivación de contadores, Dispositivos de Lectura y Medición de consumo de Energía, Sistemas de Comunicaciones (GPRS, PLC, RF, Otros), Sistema de Gestión de Dispositivos de Red, HW para la implementación de la Solución, y poder observar lecturas, alarmas de sobrecargas, balances de energía por transformador, etc. La información que se recibe en el centro de control permite facturar, enviar y asesorar a los clientes, además tendrán acceso a su consumo y lectura de un display. Adicionalmente, con la instalación del display, el cliente puede conocer su lectura diaria y así calcular y controlar su consumo en cualquier instante.

VI. VENTAJAS DE LA MEDICIÓN INTELIGENTE

Mediante la medición inteligente se tiene tranquilidad y confianza, por ser una facturación exacta al evitar el error humano, además de comodidad, al evitar la presencia frecuente de técnicos en el predio del cliente y satisfacción del cliente por la reconexión inmediata del servicio y más seguridad física, pues el display estará en un sitio seguro. La Medición Inteligente (AMI), integra redes de comunicación y software para medir, recopilar, almacenar, analizar y utilizar datos sobre consumo de electricidad, así como el funcionamiento a lo largo de todo el sistema.

Mediante la medición inteligente, se tiene una comunicación bidireccional a medidores eléctricos y brinda puntualidad en la facturación, el control de carga, la respuesta a demanda, y la detección, evaluación y oportuna atención en fallas de energía. Con este sistema, las empresas de servicios públicos pueden manejar eficientemente la información de sus clientes, reducir costos y simultáneamente generar innovaciones proporcionando un servicio de atención al cliente de calidad superior. Además se puede dar un valor agregado al servicio de distribución de energía, ofreciendo la posibilidad de tener medición de otros servicios o brindar servicios de valor agregado al cliente.

REFERENCIAS

- [1] ABAD RAMÍREZ, Andrea. Análisis y diseño de un modelo para la lectura de datos de los contadores del servicio de energía eléctrica en un tramo de baja Tensión utilizando la red de suministro de este servicio.
- [2] Automatización de edificios y residencias (Agosto del 2002), Protocolo de transmisión PLC X-10 (en línea), Disponible en: <http://www.electrodepot.com/x10/disposit.htm>
- [3] CAÑETE CORRIPIO, Francisco Javier. Caracterización y Modelado de Redes Eléctricas Interiores como Medio de Transmisión de Banda Ancha. Universidad de Málaga (España).
- [4] Antonio Escobar, José Menéndez, Rebeca Estrella. Diseño e implementación de la última milla del servicio de INTERNET usando las redes eléctricas de media y baja tensión de un sector de la ciudad de Guayaquil usando la tecnología Power Line Communications (PLC).

