UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA TELECOMUNICACIONES

TECNOLOGÍA PLC: ANÁLISIS DE SISTEMAS Y TOPOLOGÍAS ELÉCTRICAS COMO CANALES DE ACCESO A REDES IP.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para obtener el título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR: Orozco, Yoselí.
Urosa, María F.

TUTOR EMPRESARIAL: Lic. Fernando Murillo.

FECHA: Julio, 2006.

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA TELECOMUNICACIONES

TECNOLOGÍA PLC: ANÁLISIS DE SISTEMAS Y TOPOLOGÍAS ELÉCTRICAS COMO CANALES DE ACCESO A REDES IP.

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo, ha evaluado su contenido con el resultado:_____

J U R A D O E X A M I N A D O R

Firma:	Firma:	Firma:
Nombre: _____	Nombre: _____	Nombre: _____

REALIZADO POR: Orozco, Yoselí.
Urosa, María F.

TUTOR EMPRESARIAL: Lic. Fernando Murillo.

FECHA: Julio, 2006.

TECNOLOGÍA PLC: ANÁLISIS DE SISTEMAS Y TOPOLOGÍAS ELÉCTRICAS COMO CANALES DE ACCESO A REDES IP.

Orozco, Yoselí.
yoseli.orozco@gmail.com

Urosa, María F.
mafe.urosa@gmail.com

La tecnología PLC (Comunicaciones por Líneas Energizadas, por sus siglas en Inglés) se ha convertido en una pieza clave para dotar de servicios de banda ancha a lugares donde la penetración de infraestructuras de telecomunicaciones se ha visto limitada, por lo que la tecnología PLC puede ser una alternativa para superar los aislamientos de regiones y localidades cuya ubicación las deja fuera de los ejes del desarrollo y les permita reducir la existente brecha digital. Estos sistemas están en fases de prueba en algunos países y de implementación en otros, donde el punto en común y determinante para su funcionamiento lo representan las pruebas de factibilidad del canal, las cuales comprenden la medición de los parámetros característicos del mismo. A partir de éstos se obtiene la información del comportamiento del medio eléctrico como canal de comunicación, además de las distancias máximas soportadas antes de regenerar la señal. Luego de la implementación del sistema PLC la fase final es la verificación de la calidad de los enlaces, para lo cual se realizaron pruebas utilizando programas para el análisis de tráfico, que permitieron posteriormente establecer un cuadro comparativo entre ésta y otras tecnologías de acceso a banda ancha. Las pruebas de caracterización realizadas demostraron la factibilidad de implementación de la tecnología en el Área Metropolitana de Caracas; además, la verificación de la calidad de los enlaces y el desempeño de los sistemas PLC sustentan la viabilidad de un despliegue masivo.

Palabras claves: canal eléctrico, telecomunicaciones, factibilidad, calidad de enlaces, tecnologías de acceso.

A Dios que me dio la vida que disfruto cada día…
A toda mi familia por apoyarme e impulsarme
a ser lo que hoy soy…
A Kosho por su amor, apoyo y buen humor,
que matizan y dan vida a mis días…
A Mafita, porque no fue mi compañera de tesis,
sino es mi hermana...
A mis amigos y seres queridos, que están
en los buenos y malos momentos...

Yoselí

Dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la fe en mi misma.
A mi familia, quienes desde lejos me alientan a
luchar por mis sueños y orientan mi vida.
A mis amigos y demás seres queridos, por llenar
mis días de alegrías y momentos inolvidables.
A Mivi, por ser mi ángel de la guarda.
A Yoshita mi amiga, compañera y casi
hermana. Tú eres parte de mis logros.

María Fernanda.

Agradecimientos

A la empresa AES Networks Communications, por abrirnos las puertas a un nuevo mundo de conocimientos y experiencias para nuestro desarrollo personal y profesional, brindándonos los recursos humanos, técnicos, organizacionales y financieros necesarios para alcanzar nuestras metas.

Al Lic. Fernando Murillo, por habernos brindado la oportunidad de ser parte del Proyecto BPL de AES Networks Communications, depositando en nosotros un voto de confianza.

A Wilfredo Márquez, quien con paciencia y voluntad permitió que todos nuestros requerimientos fueran canalizados y satisfechos. A través de ti conseguimos el impulso para seguir adelante y superar las adversidades.

A Carlos Chacón, por su amabilidad y sentido del humor, su disposición a escucharnos en todo momento y su atención constante sobre el avance de nuestro trabajo.

A los equipos de Ingeniería y Operaciones de AES NC y Commóvil: Ziruma, Éver, Carlos, Luis, Tulio, Ana, J.D., Vicente, Javier, Pave, Milano, Aldemar y todos los que se nos escapan, por habernos recibido de forma tan cálida, brindarnos un ambiente de trabajo ameno y apoyarnos en la ejecución de las actividades. Gracias por todo!.

A Luis Martínez y José Gregorio Velasco, quienes se convirtieron en guías durante el desarrollo del proyecto. Gracias por brindarnos las herramientas necesarias para ampliar nuestros conocimientos en el ámbito eléctrico y servir de apoyo incondicional para el cumplimiento de nuestros objetivos.

A los amables técnicos electricistas de La Electricidad de Caracas y sus Contratistas, a través de los cuales logramos ejecutar las Campañas de Mediciones.

A los representantes de los condominios y servicios generales de los inmuebles bajo estudio, quienes permitieron nuestro acceso a los mismos y nos ofrecieron la ayuda necesaria para llevar a cabo las caracterizaciones del canal eléctrico.

A las Profesoras Mayra Narváez, Lourdes Ortiz y Neveska Rodríguez, por dedicarnos su tiempo en el desarrollo de los talleres para la elaboración del Tomo y atender de manera incondicional nuestras dudas y sugerencias.

Índice General

	Pág.
Resumen	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice General	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Ecuaciones	viii
Índice de Tablas	ix
Introducción	1
Capítulo I: Planteamiento del Problema	3
I.1. Objetivo General	3
I.2. Objetivos Específicos	4
I.3. Justificación	4
I.4. Limitaciones y alcances	5
Capítulo II: Marco Referencial	6
II.1. Arquitectura de la red eléctrica	6
II.2. Topología eléctrica de las redes de planta interna de los inmuebles del Área Metropolitana de Caracas	7
II.3. Modelo teórico del canal eléctrico	10
II.3.1. Característica Pasa-bajo	10
II.3.2. Atenuación del canal	12
II.3.3. Desvanecimiento selectivo en frecuencia	13
II.3.4. Relación Señal a Ruido (S/R)	14
II.3.5. Propagación multitrayecto de la señal	15
II.3.6. Modelo teórico simplificado del canal eléctrico	16
II.4. Tecnología PLC: Power Lines Communications	17
II.5. Métodos de acoplamiento	21
II.6. Parámetros de medición del desempeño de enlaces Ethernet	23

II.6.1. Disponibilidad 23
II.6.2. Latencia 24
II.6.3. Pérdida de Paquetes 25
II.6.4. Velocidad Neta del Flujo Binario (Throughput) 25
II.7. Sistema de monitoreo y gestión de una red PLC 26
II.8. Antecedentes de Implementación 27
II.8.1. Europa 27
II.8.2. Norteamérica 28
II.8.3. Asia 30
II.8.4. Latinoamérica 30
II.9. Interconexión de red de Telecomunicaciones y la red eléctrica de bajo voltaje 31
II.9.1. Funcionamiento 31
Capítulo III: Metodología – Desarrollo 33
III.1. Fase 1: Documentación 33
III.2. Fase 2: Pruebas de caracterización del canal 34
III.2.1. Pruebas de caracterización del ruido 35
III.2.2. Pruebas de caracterización del canal eléctrico 36
III.3. Fase 3: Medición del desempeño de enlaces PLC 40
III.4. Fase 4: Comparación de Tecnologías de Acceso 43
III.4.1. Medición del desempeño de la red Ethernet del Inmueble 13 43
III.4.2. Comparación del desempeño de la red Ethernet con los dos sistemas PLC instalados en el Inmueble 13 43
III.4.3. Comparación teórica de las características de PLC con otras tecnologías de acceso a banda ancha 44
Capítulo IV: Resultados 45
IV.1. Fase 1: Documentación 45
IV.2. Fase 2: Pruebas de caracterización del canal 45
IV.2.1. Pruebas de caracterización del ruido 45
IV.2.1.1. Análisis de resultados 46

IV.2.2. Pruebas de caracterización del canal 47
IV.2.2.1. Inmuebles residenciales en 120V 48
IV.2.2.2. Inmuebles comerciales en 480V 49
IV.2.2.3. Inmuebles comerciales en 120V 49
IV.2.2.3.1. Análisis de resultados 53
IV.3. Fase 3: Medición del desempeño de enlaces PLC. 55
IV.3.1. Latencia, Disponibilidad y Pérdida de Paquetes 55
IV.3.2. Velocidad efectiva 56
IV.3.2.1. Análisis de resultados 57
IV.4. Fase 4: Comparación de Tecnologías de Acceso 57
IV.4.1. Medición del desempeño de la red Ethernet del Inmueble 13 57
IV.4.1.1. Análisis de Resultados 58
IV.4.2. Comparación del desempeño de la red Ethernet con los dos sistemas PLC instalados en el Inmueble 13 58
IV.4.2.1. Análisis de resultados 59
IV.4.3. Comparación teórica de las características de PLC con otras tecnologías de acceso a banda ancha 59
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones 61
Bibliografía 65
APÉNDICE A: Manual para la medición de parámetros característicos del canal eléctrico LV 67
APÉNDICE B: Características de atenuación en cables de medición 75
APÉNDICE C: Piloto de Tecnología PLC en el auditorio del Inmueble 13 79
APÉNDICE D: Manual para la medición del desempeño de enlaces PLC 85
APÉNDICE E: Formato de mediciones de parámetros del canal eléctrico 90
APÉNDICE F: Comparación de tecnologías de acceso a Banda Ancha 92
APÉNDICE G: Glosario de Términos 94
APÉNDICE H: Sistema de Monitoreo Ilevo 97
ANEXO A: Tabla con Frecuencias de Operación de Equipos PLC 100

Índice de Figuras

Pág.

Figura #1. Arquitectura de la Red Eléctrica 6
Figura #2. Distribución por piso en 480V 8
Figura #3. Distribución con barra en 120V 9
Figura #4: Frecuencias de operación de PLC 10
Figura #5: Características de amplitud y respuesta impulsiva del medio eléctrico LV 12
Figura #6: Atenuación en 20m de cable de baja tensión 12
Figura #7: Atenuación de cables con aislamiento de PVC y Papel 13
Figura #8: Características del ruido ráfaga 14
Figura #9: Carac.de amplitud y respuesta al impulso de un canal de 150m 17
Figura #10: Portadoras en la Modulación OFDM 18
Figura #11: Elementos de la Red PLC 19
Figura #12: Acoplador Eléctrico 20
Figura #13: Cable con acoplamiento capacitivo 21
Figura #14: Gráfico de Atenuación vs. Fcia del cable con acoplamiento capacitivo 22
Figura #15: Cable con acoplamiento inductivo 22
Figura #16: Gráfico de atenuación vs. Frecuencia de cables con acoplamiento inductivo 22
Figura #18: Fases de la metodología 33
Figura #19: Inyección con acoplamiento inductivo 35
Figura #20: Inyección con acoplamiento capacitivo 35
Figura #21: Recepción de la señal con acoplamiento capacitivo 35
Figura #22: Ubicación de los Inmuebles 40
Figura #23: Interfaz del Velocímetro de A BELTRÓNICA 42
Figura #24: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles

residenciales en 120V 48
Figura #25: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles comerciales en 480V 49
Figura #26: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles comerciales (1) en 120V 49
Figura #27: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles comerciales (2) en 120V 50
Figura #28: Gráfica del espectro del canal de una red doméstica 51
Figura #29: Gráfica de la potencia de recepción vs. Distancia, en varios pisos de dos inmuebles 52
Figura #30: Gráfica de las pérdidas por antigüedad en los inmuebles 53
Figura #31: Velocidad de Download de las Redes PLC 56
Figura #32: Velocidad de Upload de las Redes PLC 56
Figura #33: Latencia de las Redes en estudio 58
Figura #34: Velocidad efectiva de conexión de las redes en estudio 59

Índice de Ecuaciones

Pág.
Ecuación #1: Atenuación 10
Ecuación #2: Relación S/R 14
Ecuación #3: Retraso de tiempo en el camino 15
Ecuación #4: Modelo teórico simplificado del canal eléctrico 16
Ecuación #5: Disponibilidad de una red 24

Índice de Tablas

Pág.

Tabla #1: Especificaciones del acoplador capacitivo 21
Tabla #2: Especificaciones del acoplador inductivo 22
Tabla #3: Especificación de equipos iniciales de transmisión y recepción 36
Tabla #4: Características de los inmuebles seleccionados 36
Tabla #5: Especificación de equipos de transmisión y recepción 37
Tabla #6: Características de los inmuebles seleccionados 39
Tabla #7: Características de los sistemas PLC – Inmueble 13 41
Tabla #8: Cronograma de pruebas de desempeño 42
Tabla #9: Valores de referencia de parámetros de desempeño 43
Tabla #10: Resultados de la caracterización del ruido 45
Tabla #11: Resultados promedios de la caracterización del ruido 46
Tabla #12: Parámetros de la caracterización de inmuebles residenciales en 120V 48
Tabla #13: Parámetros de la caracterización en inmuebles residenciales en 480V 49
Tabla #14: Parámetros de la caracterización en inmuebles comerciales (1) en 120V 50
Tabla #15: Parámetros de la caracterización en inmuebles comerciales (2) en 120V 50
Tabla #16: Resultados de medición de Latencia, Disponibilidad y Pérdida de Paquetes 55
Tabla #17: Medición de Velocidad efectiva de Conexión 56
Tabla #18: Parámetros de desempeño de la red de acceso convencional 57

Introducción

PLC *(Power Line Communications)*, también denominada BPL *(Broadband over Power Lines)* es una tecnología de acceso a banda ancha que utiliza la red eléctrica como medio de transmisión de voz y datos. Este sistema tiene sus raíces en los inicios de la década de los 50's. Desde entonces se ha utilizado para los servicios públicos de electricidad en telemetría y control de equipos en las redes eléctricas. A mediados de los años 80's, varias compañías de electricidad y fabricantes de equipos iniciaron la investigación sobre las propiedades y características de la red eléctrica como un medio de telecomunicaciones.

La implementación de esta tecnología está estrechamente relacionada con las características del canal eléctrico que se utilizará como medio de transmisión. La topología de la red PLC dependerá de la infraestructura eléctrica del inmueble y la configuración de los parámetros para su funcionamiento debe ser acorde a los resultados de una caracterización previa del canal. La necesidad de demostrar la factibilidad de despliegue de esta tecnología en el Área Metropolitana de Caracas, representa la razón fundamental del desarrollo de esta investigación, descrita en el Capítulo I.

En el Capítulo II, se ha creado un marco de referencia en el que se exponen los fundamentos de los sistemas de comunicaciones por líneas energizadas, así como los parámetros que definen el medio de transmisión tanto en el aspecto eléctrico como en el de telecomunicaciones.

Seguidamente se presentan los capítulos correspondientes a la metodología aplicada para las fases de documentación, caracterización del canal, medición del desempeño de enlaces PLC y comparación de tecnologías de acceso a banda ancha; así como los resultados obtenidos en cada una de las actividades, los cuales respaldan el cumplimiento de los objetivos trazados.

Por último el Capítulo V acopia las conclusiones y recomendaciones derivadas de esta experiencia, las cuales sustentan la viabilidad de una implementación de la tecnología PLC en la región bajo estudio.

Capítulo I
Planteamiento del Problema

Según datos tomados del sitio en la Internet de la Alianza Abierta Europea de Investigación de PLC (OPERA, *Open PLC European Research Alliance*), existen alrededor de 35 empresas distribuidas en Europa, Estados Unidos, Latinoamérica y países del Oriente como Israel, que están comprometidas en el uso de la tecnología PLC (*Power Line Communications*).

En lo que a Latinoamérica se refiere, se han ubicado varios intentos para implementar servicios IP (*Internet Protocol*) sobre PLC. En Chile, Brasil y Argentina, las pruebas de PLC han estado en proceso desde el año 2.001.

En Venezuela y específicamente en la ciudad de Caracas, La Electricidad de Caracas (a través de su filial de Telecomunicaciones Comerciales: *AES Networks Communications*), ha comenzado a realizar pruebas que permitan identificar y sustentar los casos de aplicación de servicios de banda ancha con tecnología PLC, según la topología de red eléctrica de bajo voltaje (LV, *Low Voltage*) de los inmuebles comerciales y residenciales de esta ciudad.

La posibilidad de demostrar la factibilidad de implantación del sistema, a través de recomendaciones internacionales (OPERA e IEEE), ha permitido que dicha empresa sea una de las pioneras en Venezuela, ofreciendo un nuevo medio de acceso a servicios IP con un alto grado de permeabilidad gracias al uso de la red eléctrica.

I.1. Objetivo General.

- Comprobar y validar que la infraestructura y topología de la red eléctrica en los inmuebles del área metropolitana de Caracas permiten la implementación de la tecnología PLC (*Power Line Communications*) como medio de acceso para los servicios de telecomunicaciones de banda ancha.

I.2. Objetivos Específicos.

- Estudiar los fundamentos teóricos y antecedentes de implementación de la tecnología *Power Line Communications.*
- Identificar los parámetros que caracterizan la red eléctrica de bajo voltaje (LV, *Low Voltage*).
- Realizar pruebas eléctricas de desempeño en las redes eléctricas de planta interna, de inmuebles comerciales y residenciales seleccionados en el área metropolitana de Caracas.
- Determinar los elementos de monitoreo, gestión y administración que requiere un sistema de telecomunicaciones basado en tecnología PLC.
- Verificar la factibilidad de implantación de servicios de telecomunicaciones de banda ancha a través de la red eléctrica LV.
- Sistematizar las pruebas de telecomunicaciones basadas en PLC, en función de los estándares internacionales.
- Comparar el sistema de telecomunicaciones basado en tecnología PLC con sistemas convencionales, a nivel de factibilidad, costos y facilidad de instalación.

I.3. Justificación.

La realización y sistematización de las pruebas de caracterización del canal eléctrico de planta interna, así como la implementación de sistemas PLC que permitan la evaluación de la calidad de los enlaces a nivel de acceso, constituirá un aporte fundamental para la demostración de la factibilidad de despliegue de la tecnología en el Área Metropolitana de Caracas.

I.4. Limitaciones y alcances.

El Trabajo Especial de Grado presentado pretende dar evidencia de la funcionalidad del servicio de banda ancha a través de líneas energizadas de baja tensión, permitiendo la implementación de la tecnología PLC en la Ciudad de Caracas, a través de la sistematización de las pruebas de canal y de calidad de los enlaces a nivel de la red de acceso del sistema, en función de las recomendaciones internacionales y por medio de la compañía *AES Networks Communications.*

La cantidad de inmuebles en el área metropolitana de Caracas sometidos a las pruebas, ha sido limitado por el aspecto logístico, sin embargo el número representa una muestra suficiente para el estudio.

El Trabajo Especial de Grado no contempla la realización de pruebas de interferencia de las señales irradiadas por el sistema con otras bandas del espectro. Las mismas se consideran innecesarias, debido a que la potencia de transmisión de los equipos PLC es configurable y el estudio se limita a redes eléctricas de planta interna, donde los niveles de interferencia son despreciables, debido al sistema constructivo de cableados eléctricos mediante el uso normalizado de canalizaciones metálicas.

Capítulo II
Marco Referencial

II.1. Arquitectura de la red eléctrica.

Una arquitectura similar a la de la red eléctrica implementada en Venezuela es la que se muestra en la siguiente figura:

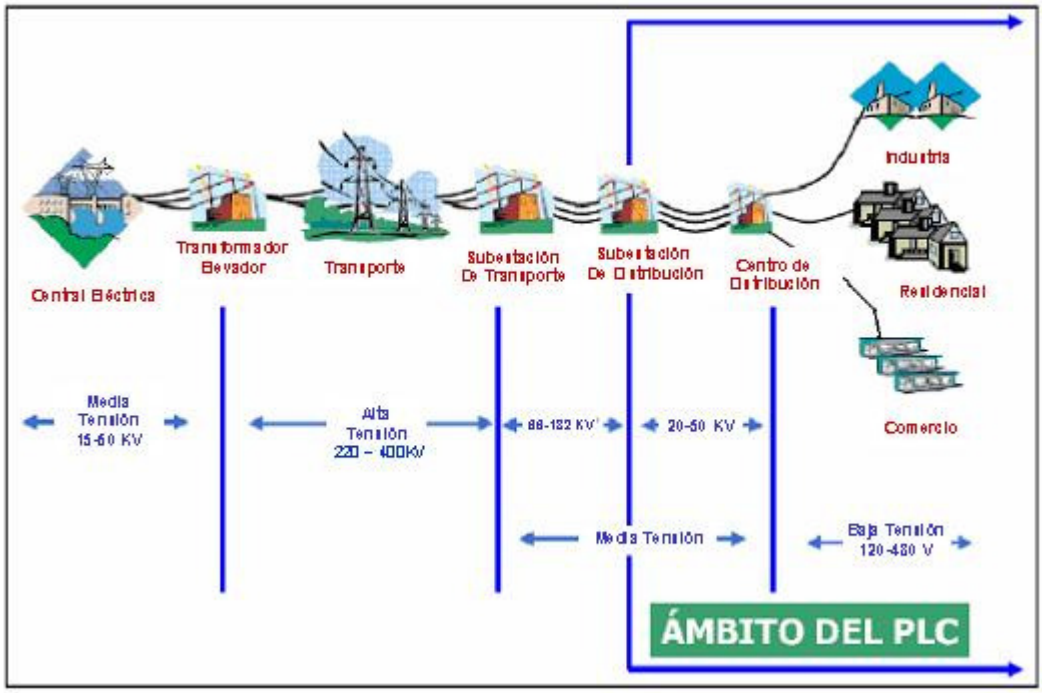


Figura #1: Arquitectura de la Red Eléctrica. (Fuente: FLORES, 2.004: 54).

Una red de distribución eléctrica se divide en cuatro etapas principales.

En la primera etapa se tiene la central eléctrica, donde se genera la energía eléctrica entre 15 y 50KV (Kilovoltios) y abarca desde la central generadora de energía hasta el primer transformador elevador. Después se encuentra la segunda etapa que transporta la energía eléctrica; también es llamada tramo de alta tensión (entre 220 y 400KV) y conduce la energía hasta la subestación de transporte.

Siguiendo con la red, la tercera etapa es de media tensión, la cual se divide en dos tramos de media tensión, el primer tramo abarca desde la subestación de transporte a la subestación de distribución con voltajes que se encuentran entre 66 y 132KV. El segundo tramo tiene voltajes de distribución que se encuentran entre 17 y 50KV, este tramo va desde la subestación de distribución hasta los transformadores de distribución y desde allí hasta las acometidas de los edificios. A partir de este punto es en donde se encuentra el ámbito de trabajo del PLC o BPL en baja tensión.

Por último, la cuarta etapa que es la de baja tensión. Se encuentra entre los 120 y 480V; distribuye la energía dentro de los inmuebles desde la acometida eléctrica hasta los centros de medición, y desde allí hasta los apartamentos y/o locales para uso residencial o comercial, permitiendo el acceso final al servicio eléctrico en forma de corriente alterna de baja frecuencia (60Hz en Venezuela). En este tramo es en el cual se enfocan las pruebas realizadas en el presente estudio.

II.2. Topología eléctrica de las redes de planta interna de los inmuebles del Área Metropolitana de Caracas.

Los inmuebles bajo estudio del área metropolitana de Caracas presentan los siguientes tipos de infraestructura eléctrica de planta interna:

1. **Distribución con cableado trifásico en 480V:** la fuente de alta tensión, generalmente 12.47KV, llega al cuarto principal de electricidad del edificio, donde se transforma a 480V, se distribuye de manera individual a cada piso y se transforma finalmente a 120V para el acceso final. Esta topología se muestra en la siguiente figura:

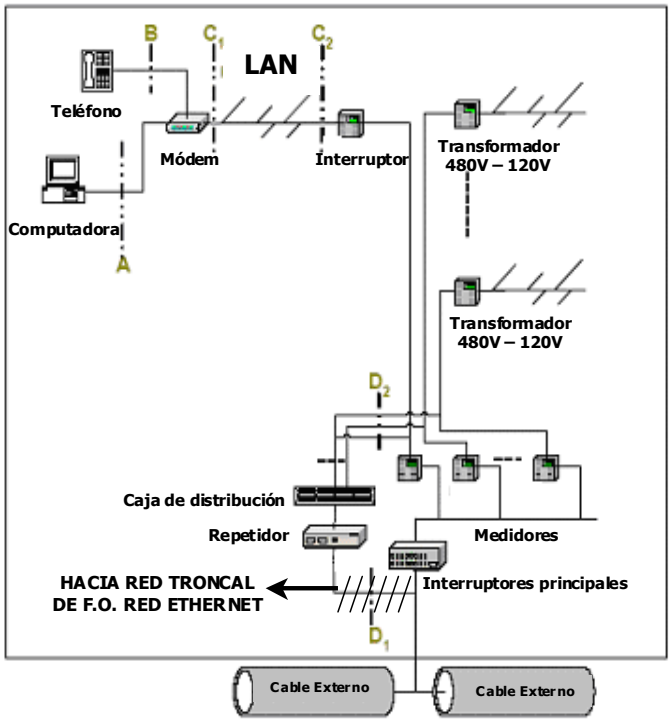


Figura #2. Distribución por piso en 480V. (Fuente: OPERA-D10, 2005).

Para crear la red de telecomunicaciones sobre el cableado eléctrico, se instala un equipo Cabecera PLC que se configura como maestro y se encarga de inyectar la señal de datos justo después de los medidores de cada piso en el circuito de 480V, a través de un dispositivo de distribución (*Distribution box)*.

La recepción de la señal en cada uno de los pisos, debe contar con una etapa previa en la que se realiza un puente (*bypass*) del transformador, a través de otro repetidor PLC, para luego volver a inyectar la señal de datos en el circuito de 120V y finalmente obtener el acceso a través de un módem PLC.

2. **Distribución en barra:** del cuarto principal de electricidad sale una barra en 208/120V de la que se alimentan los tableros de cada piso; como se observa en la siguiente figura:

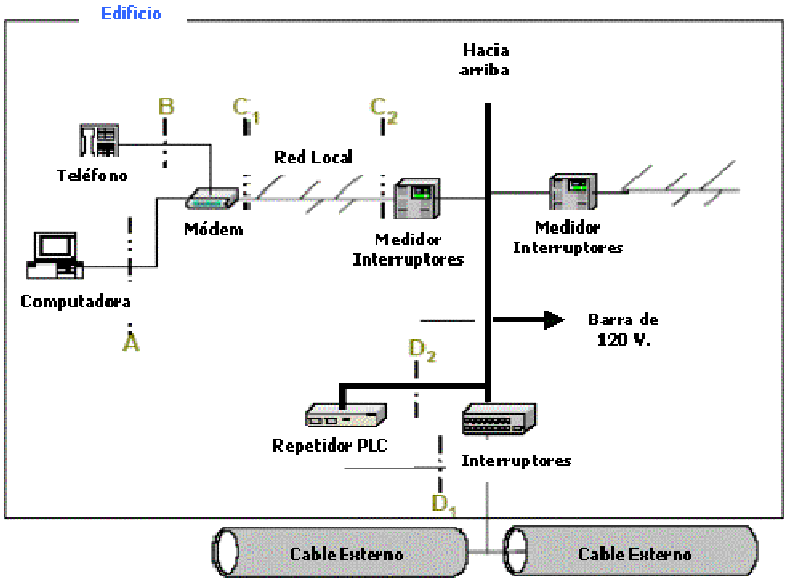


Figura #3: Distribución con barra en 120V. (Fuente: OPERA-D10, 2.005).

En este caso la inyección de la señal de datos es directamente en la barra y puede ser recibida en todos los pisos, pero este método es poco utilizado debido a su poca eficiencia.

3. **Distribución residencial en 120V:** en el cuarto principal de electricidad del inmueble se ubica el centro de medición, desde el cual se distribuye la electricidad en dos fases de 208/120V para cada apartamento. En éstos, en lugar de transformadores, existe sólo un tablero de interruptores (*breakers*).

   Para este tipo de distribución la topología del sistema PLC, es similar a la descrita en el apartado 1, con la excepción que no se requiere un equipo Repetidor en todos los pisos, sino en los que se requiera amplificar la señal.

4. **Distribución comercial en 120V:** desde el cuarto principal de electricidad del inmueble se realiza la distribución de electricidad en 120V para cada piso, en el cual habrá un tablero principal del que se derivan los subtableros ubicados en cada local comercial. La topología del sistema PLC coincide con la de distribución residencial en 120V.

En algunos casos de edificios muy altos la distribución hasta los pisos se hace en alta tensión (12.47 KV) y luego se obtienen 480V y 120V con transformadores en cada nivel.

II.3. Modelo teórico del canal eléctrico.

Normalmente de 3 a 10 cables salen desde la subestación. Estas redes de acceso llegan hasta las acometidas eléctricas ubicadas en las vialidades, luego van hasta los tableros de conexión principales y de ahí a los subtableros dentro de los hogares, oficinas y comercios. Generalmente, estos cables se encuentran bajo tierra en zonas urbanas y en postes (de forma aérea) en zonas rurales.

En redes de acceso, el sistema PLC usa frecuencias mas bajas por las largas distancias (≤10Mhz) y en redes domésticas (*in-house*) se usan frecuencias mayores (10MHz ≤ f ≤ 40MHz), debido a que los circuitos son de longitudes menores.

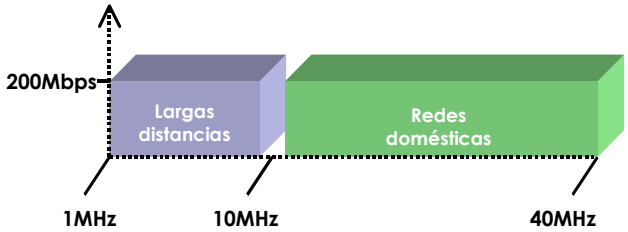


Figura #4: Frecuencias de operación de PLC.

A continuación se describen las principales características del comportamiento del canal eléctrico:

II.3.1. Característica Pasa-bajo.

En telecomunicación, se denomina atenuación de una señal (sea esta acústica, eléctrica u óptica) a la pérdida de potencia sufrida por la misma al transitar por

cualquier medio de transmisión. Así, se introduce una señal eléctrica con una potencia P_{av} en un circuito pasivo, como puede ser un cable; esta sufrirá una atenuación y al final de dicho circuito obtendremos una potencia P_2. La atenuación (A) será igual a la diferencia entre ambas potencias (Fuente: OPERA-D4, 2.005). No obstante, la atenuación no suele expresarse como diferencia de potencias sino en unidades logarítmicas como el decibelio, como sigue:

$$A(f) = 10.\log_{10}\left(\frac{P_{av}(f)}{P_2(f)}\right) \quad (dB)$$

Ecuación #1: Atenuación. (Fuente: OPERA-D3, 2.005)

Con:

Pav(f): potencia de entrada, de la fuente.

P2(f): potencia en el puerto 2, en la salida.

Las mediciones de atenuación en el canal deben conllevar a definir, además, la distancia máxima de propagación de la señal en el medio antes de requerir la instalación de un repetidor BPL.

En Caracas, las redes principales están usualmente bajo tierra, las cuales son construidas para transferir energía con pocas pérdidas, pero no son idóneas para la transferencia de datos, puesto que las pérdidas del dieléctrico en el aislamiento del cable, genera una característica pasa-bajo (más atenuación a mayor frecuencia).

En las gráficas siguientes puede observarse la característica pasa bajo *(low pass)* del medio eléctrico. La atenuación aumenta significativamente con la frecuencia. La respuesta impulsiva del canal es una secuencia de pulsos con distancias, amplitudes y polaridades aleatorias.

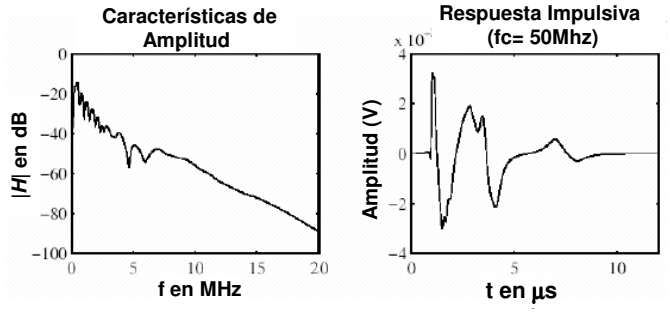


Figura #5: Características de amplitud y respuesta impulsiva del medio eléctrico LV. (Fuente: OPERA-D4, 2.005).

II.3.2. Atenuación del canal.

Las características de las redes eléctricas son variables en tiempo y espacio, debido a que dependen del tipo de cargas conectadas, así como la conexión y desconexión de las mismas en instantes indeterminados. Además, el comportamiento pasa bajo de estas redes depende del tipo de cable, la distancia y la frecuencia de transmisión.

En un segmento de 20m de cable eléctrico utilizado en redes de planta interna, hasta 240V, la característica de atenuación es la siguiente:

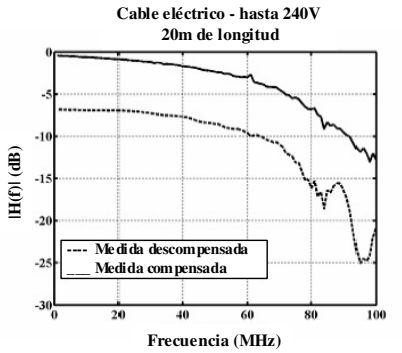
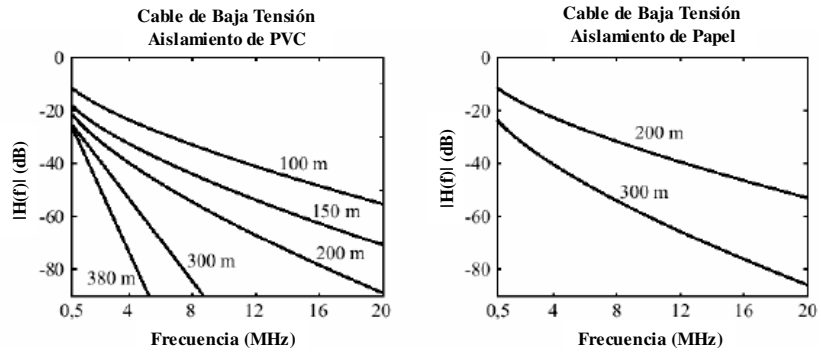


Figura #6: Atenuación en 20m de cable de baja tensión. (Fuente: ISPLC, 2.004).

La línea punteada corresponde a la atenuación del cable eléctrico y los acopladores utilizados para la prueba, mientras que la línea continua presenta la medida compensada, sin considerar la atenuación introducida por los acopladores.

A continuación se muestra la característica pasa bajo de dos cables con diferente aislamiento y con longitudes de 100 a 380 metros. Nótese que la atenuación introducida por el canal es mayor en los casos de cables con aislamiento de PVC:



Figuras #7: Atenuación de cables con aislamiento de PVC y Papel.
(Fuente: OPERA-D4, 2.005)

En general, un sistema PLC no puede funcionar a frecuencias mayores a 5MHz en longitudes que superen los 380m.

A pesar de que se conocen las características de los cables empleados en circuitos eléctricos de acceso, su comportamiento no puede ser predecible una vez canalizados en dichas redes, por lo que se hace necesaria una caracterización del canal en cada caso de implementación, que permita verificar la factibilidad de funcionamiento de la tecnología PLC.

II.3.3. Desvanecimiento selectivo en frecuencia.

La red entre la subestación y las premisas del usuario tiene una estructura similar a la de una red de radios móviles que consiste en una radiobase y celdas.

Cada transición en las conexiones de los cables a lo largo de la propagación de la señal, representa cambios de impedancias que causan reflexiones, caminos adicionales de propagación (usualmente recorren vías mas largas) que causan ecos

por retraso de tiempo. Esto se traduce en propagación multitrayecto de la señal con desvanecimiento selectivo de frecuencia (Fuente: OPERA-D3, 2.005).

II.3.4. Relación Señal a Ruido (S/R).

El ruido es una señal indeseable en los canales de transmisión. En el caso de líneas energizadas *(PL, Power Lines)* existen varias fuentes de ruido, entre las cuales se encuentran: equipos que se conectan y desconectan de los tomacorrientes, generadores, motores eléctricos, entre otros.

El ruido en el canal PL es totalmente variable y aleatorio; por lo que no tiene un modelo único. Pueden encontrarse diversos tipos, pero el de mayor interés para PL es el ruido ráfaga (*burst noise*). En la figura que se muestra a continuación, se observa la característica del ruido ráfaga presente en canales eléctricos, el cual tiene potencias máximas hasta de -40dBm y una ocupación máxima del espectro hasta 10Mhz (Fuente: OPERA-D4, 2.005).

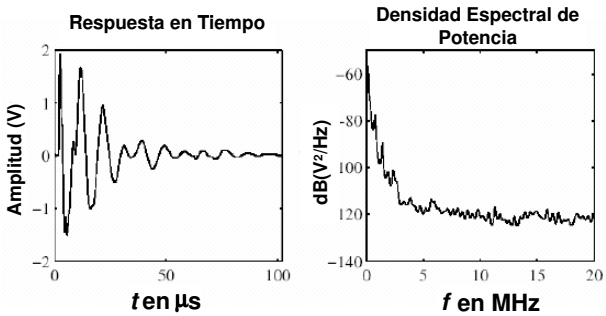


Figura #8: Características del ruido ráfaga (Fuente: OPERA-D4, 2.005).

La relación Señal a Ruido, medida en dB, permite definir el grado de robustez del sistema ante el ruido del canal. Su definición matemática es la siguiente:

$$S/R = P_{nav} - A(f) - N(f) \quad (dB)$$

Ecuación #2: Relación S/R. (Fuente: OPERA-D3, 2.005).

Con:

Pnav: potencia de entrada en dBm.

A(f): atenuación del canal.

N(f): ruido en dBm.

El valor de referencia de este parámetro lo define el diseño del sistema PLC y las especificaciones de los equipos utilizados en su implementación.

II.3.5. Propagación multitrayecto de la señal.

El coeficiente de transmisión es el 1 menos el módulo del coeficiente de reflexión. El retraso de tiempo del camino es:

$$\tau = \frac{d_i}{V_p}$$

Ecuación #3: Retraso de tiempo en el camino. (Fuente: OPERA-D4, 2.005).

Con:

di: distancia del canal.

Vp: velocidad de fase.

- Canales Simétricos: un canal es simétrico si las cargas a sus extremos son iguales.
- Canales Asimétricos: el coeficiente de reflexión es mayor o igual a 1. Mientras mas reflexiones y transiciones ocurran a lo largo del canal, menor es el índice de reflexión.

II.3.6. Modelo teórico simplificado del canal eléctrico.

En la mayoría de los casos, el factor g_i no depende de la frecuencia y describe solo el peso del canal. Este es el modelo a utilizar en la mayoría de los casos:

$$H(f) = \sum_{i=1}^{N} g_i . e^{-(a_0 + a_1 f^k).d_i} . e^{-j.2.\pi.f.\frac{d_1}{V_p}}$$

Ecuación #4: Modelo teórico simplificado del canal eléctrico. (Fuente: OPERA-D4, 2.005).

Con:

i	Número del trayecto. El trayecto con menor retardo tiene *i*=1.
$\mathbf{a_0}$,$\mathbf{a_1}$	Parámetros de atenuación.
k	Exponente del factor de atenuación (usualmente entre 0.2 y 1).
$\mathbf{g_i}$	Factor de peso para el trayecto *i*, en general complejo, puede interpretarse físicamente como el factor de reflexión / transmisión.
$\mathbf{d}_i$	Longitud del trayecto *i*.
$\mathbf{t}_i$	Retardo del trayecto *i*.

De aquí se deduce lo siguiente:

- La dependencia de frecuencia puede ser ajustada con el exponente k.
- Un valor de a_1 menor genera un impulso en tiempo más ancho y un valor mayor de a_1 genera un impulso más angosto, pero con mayor amplitud.
- Para modelar el canal es necesaria la respuesta al impulso del mismo.
- El parámetro d_1, indica la longitud del canal. Mientras más grande sea este parámetro, mayor será el retardo.

- Doblando la longitud del canal, no sólo se aumenta el retardo, sino que la amplitud del impulso se va a la mitad y se duplica el gradiente de atenuación.

- El factor de peso g_i, determina la altura del impulso. Sin modificar los demás parámetros, la amplitud es proporcional a este factor.

En la figura siguiente, se observa la respuesta al impulso de un canal de 150m de longitud sin bifurcaciones. Se aprecia la característica pasa bajo del canal, con poca atenuación en este caso.

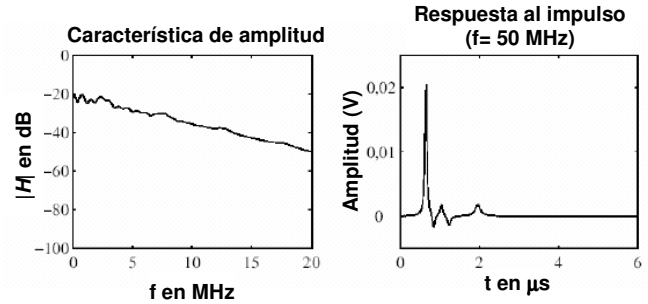


Figura #9: Característica de amplitud y respuesta al impulso de un canal de 150m.
(Fuente: OPERA-D4, 2.005).

En redes de distribución de 120V, existe la presencia de un número mayor de reflexiones debido a la cantidad de bifurcaciones, las cuales se presentan con menos frecuencia en distribuciones de 480V. Para la etapa de acceso del sistema PLC se usan frecuencias más altas debido a las cortas distancias que se recorren (Fuente: OPERA-D4, 2.005).

II.4. Tecnología PLC: *Power Lines Communications.*

La tecnología PLC (*Power Line Communications*), también llamada BPL (*Broadband over Power Lines*), está basada en la transmisión de datos utilizando como infraestructura la red eléctrica. Esto implica la capacidad de ofrecer,

mediante este medio, cualquier servicio basado en IP, como VoIP, Internet, videoconferencia, datos a alta velocidad, entre otros; lo que supone que el acceso a Internet estará disponible en cualquier punto donde llegue la red eléctrica (Fuente: WIKIPEDIA, 2.005).

La señal utilizada para transmitir datos a través de la red eléctrica es de 1.5 a 40Mhz, la cual difiere de la frecuencia de la red eléctrica convencional (60Hz), esto supone que la posibilidad de interferencias entre ambas señales es prácticamente nula, además la potencia de transmisión es de 50mW aproximadamente.

PLC emplea una red conocida como Red de Potencia Condicionada de Alta Frecuencia (HFCPN, *High Frequency Conditioned Power Network)*, la cual permite la transmisión simultánea de energía y datos. La modulación utilizada por el sistema es OFDM (Orthogonal *Frequency Division Multiplexing)* también llamada modulación por multitono discreto, la cual es una modulación que consiste en enviar la información modulando en QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) o en PSK *(Phase Shift Keying)* alrededor de 30 o 40 portadoras de diferente frecuencia, según los equipos PLC (Fuente: FLORES, 2.004: 59).

El uso de OFDM arroja tasas altas de datos y minimiza el ruido, porque permite trabajar los bits como parejas, un bit de enlace de bajada (*downlink*) y otro de enlace de subida (*uplink*). El uso de frecuencias ortogonales evita interferencia entre las diferentes subportadoras, por lo que se logra alta eficiencia espectral.

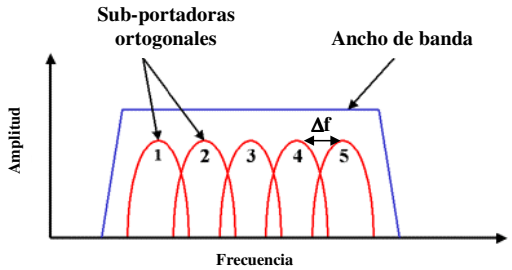


Figura #10: Portadoras en la Modulación OFDM.

La modulación OFDM de portadoras de alta frecuencia permite que las señales de corriente alterna y de PLC compartan el mismo medio de transmisión, sin producir distorsiones mutuas y logrando la optimización del mismo. Además, determina la independencia del sistema PLC a la presencia de corriente en las líneas eléctricas, excepto a nivel de alimentación de los equipos.

En general, la arquitectura de las redes PLC consta de dos sistemas formados por tres elementos:

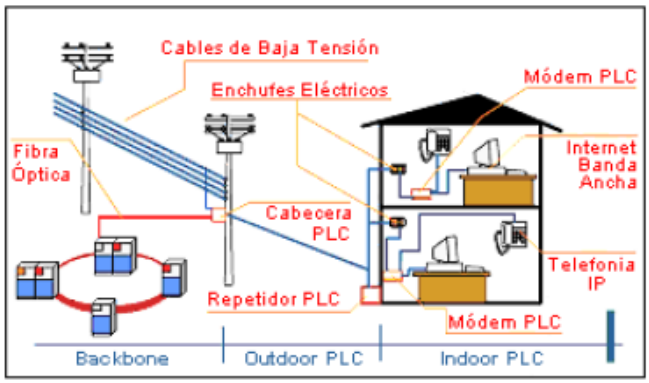


Figura #11: Elementos de la Red PLC. (Fuente: FLORES, 2.004: 55).

El primer sistema denominado "de exterior" (*outdoor*), cubre el tramo de lo que en telecomunicaciones se conoce como "última milla", y que para el caso de la red PLC comprende la red eléctrica que va desde el lado de baja tensión (LV) del transformador de distribución hasta el medidor de la energía eléctrica. Este primer sistema es administrado por un equipo cabecera (HE, *Head End*) que conecta a esta red con la de transporte de telecomunicaciones o *backbone*. De esta manera este equipo cabecera inyecta a la red eléctrica la señal de datos que proviene de la red de transporte de telecomunicaciones.

El segundo sistema se denomina "de acceso" (*indoor)*, y cubre el tramo que va desde el medidor hasta los tomacorrientes ubicados en los locales de los inmuebles. Para ello, este sistema utiliza como medio de transmisión el cableado eléctrico interno y las protecciones y dispositivos de control de la red eléctrica del usuario. El interlocutor entre el equipo cabecera y el módem es el repetidor PLC,

el cual representa el segundo elemento de la red y se encarga de administrar hasta 256 clientes.

Este equipo Repetidor o *Home Gateway*, normalmente se instala en el entorno del medidor de energía eléctrica (o en cada transformador de 480 a 120V en otros casos de distribución eléctrica) y es una combinación de un equipo en las premisas del cliente (CPE, *Customer Premises Equipment*) con un HE. Se puede usar como repetidor para amplificar la señal transmitida a grandes distancias o donde exista excesiva atenuación, e incluso como un enrutador para implementar una LAN (Red de Área Local) doméstica. El primer componente del Repetidor 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 en el tramo *indoor*.

El tercer elemento de la red PLC lo constituye el módem PLC o módem del cliente, que recoge la señal directamente de la red eléctrica a través del tomacorriente.

Este equipo contiene internamente un acoplador eléctrico, el cual es implementado para separar la señal de datos de la señal eléctrica de baja frecuencia, como se observa en la siguiente figura:

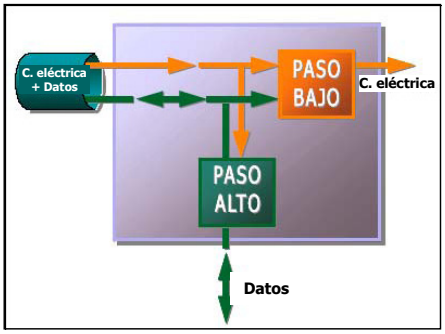


Figura #12: Acoplador Eléctrico. (Fuente: FLORES, 2.004: 59).

II.5. Métodos de acoplamiento.

El acoplador eléctrico es un dispositivo pasivo que contiene dos componentes esenciales: un filtro paso-bajo, el cual separa la corriente eléctrica y otro filtro paso-alto, el cual extrae la señal de alta frecuencia que es la que transporta los datos. Este equipo es el equivalente al distribuidor (*splitter*) del ADSL (*Asymetric Digital Subscriber Line*). Este acoplador también se encarga de inyectar la señal de alta frecuencia (datos) en la red eléctrica, de esta manera tanto la energía eléctrica como las señales de datos que permiten la transmisión de información, comparten el mismo medio.

Para la instalación de los equipos PLC es necesario hacer una serie de adecuaciones en la línea eléctrica; las más comunes hasta ahora han sido los acoplamientos por medio de arreglos inductivos o capacitivos a las frecuencias de corte de interés.

El acoplador capacitivo es una unidad que se utiliza para inyectar y recibir la señal PLC, mediante acoplamiento capacitivo. Tiene las siguientes especificaciones:

Especificaciones		
1	**Voltaje**	Máximo 480VAC
2	**Frecuencia de la línea**	45 a 65Hz.
3	**Resistencia a picos**	3000A (8/20 µsg)

Tabla #1: Especificaciones del acoplador capacitivo.

Este acoplador se muestra en la siguiente figura y su atenuación tiene la característica mostrada posteriormente:

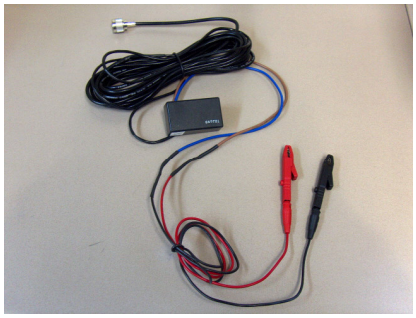


Figura #13: Cable con acoplamiento capacitivo.

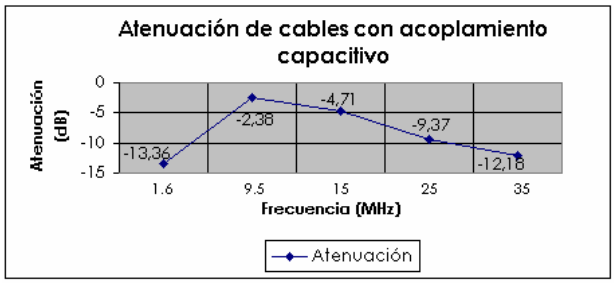


Figura #14: Gráfico de atenuación vs. Frecuencia del cable con acoplamiento capacitivo.

El acoplador inductivo es una unidad que se utiliza para inyectar y recibir la señal PLC, mediante este método de acoplamiento. Tiene las siguientes especificaciones.

Especificaciones		
1	**Corriente de línea**	Máximo 18A.
2	**Frecuencia de la línea**	50/60Hz.
3	**Voltaje de la línea**	100VAC a 480VAC

Tabla #2: Especificaciones del acoplador inductivo.

El cable que posee el acoplamiento es el siguiente y su característica de atenuación se muestra posteriormente:

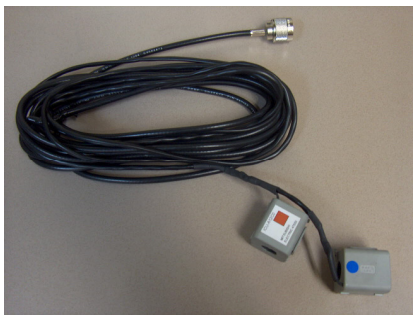


Figura #15: Cable con acoplamiento inductivo.

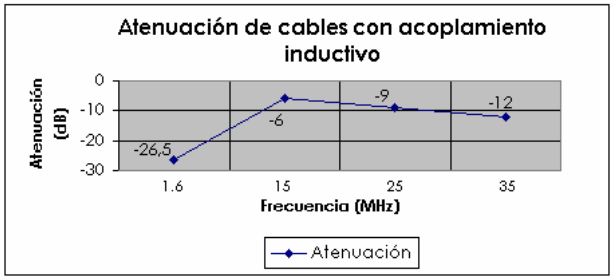


Figura #16: Gráfico de atenuación vs. Frecuencia de cables con acoplamiento inductivo.

Estos arreglos de acoplamiento se utilizan tanto en pruebas de caracterización como implementaciones de sistemas PLC en casos de distribución eléctrica de 120 y 480V.

En las pruebas de caracterización del canal se escoge el método capacitivo o inductivo en función de la accesibilidad a las barras de cobre. La recepción de las señales PLC en 120V se hace generalmente con acoplamiento capacitivo, directamente en los tomacorrientes. En casos de inyección o recepción en tramos de 480V se utiliza acoplamiento inductivo por razones de seguridad.

Las implementaciones de sistemas PLC utilizan acoplamiento inductivo o capacitivo invasivo (con dispositivos que penetran las chaquetas de los cables) en tramos de 480V o 120V, a excepción del usuario final que recibe la señal a través del módem, con conexión al tomacorriente.

II.6. Parámetros de medición del desempeño de enlaces *Ethernet*.

Por medio de las pruebas de captura de paquetes, análisis de flujo de información y verificación de la configuración de equipos activos de red, es posible determinar el nivel de desempeño de una red y optimizar su funcionamiento, lo cual es fundamental en sistemas PLC para garantizar el cumplimiento de los requerimientos de los usuarios finales y el rendimiento de esta tecnología en comparación a otros sistemas de acceso a banda ancha.

Con el propósito de tener un mejor entendimiento de las mediciones de desempeño, a continuación se describen los parámetros de interés:

II.6.1. Disponibilidad.

En términos generales, la disponibilidad se define como la relación entre el tiempo en que una unidad está funcional y el tiempo total.

$$A(\%) = 100x\frac{Tiempo\,de\,uso\,efectivo}{Tiempo\,de\,uso\,total}$$

Ecuación #5: Disponibilidad de una red. (Fuente: UPV, 2.006).

La disponibilidad de la red es el porcentaje de tiempo que el servicio es ofrecido a un lugar dado con la calidad requerida.

Una disponibilidad de la red del 99.7% implica que hay 26 horas de mal funcionamiento al año. Comúnmente, no se aceptan interrupciones de más de 4 horas seguidas. Por tanto se deben implementar procedimientos adecuados para restaurar los fallos en el tiempo requerido.

El límite teórico alcanzable en la medida de la disponibilidad de una red es generalmente 99.999%. Cuantos más "nueves" de esos cinco se tengan de izquierda a derecha, la calidad del servicio ofrecido será mayor. No obstante, en una red de un cierto volumen, este valor será difícilmente alcanzable (Fuente: UPV, 2.006).

Comparar entre sí la disponibilidad de los diferentes equipos ayudará a identificar nodos conflictivos, detectando el origen de los problemas que hacen bajar la disponibilidad de un determinado nodo respecto de los demás.

II.6.2. Latencia.

El retardo o latencia es el tiempo de transmisión de un paquete de datos de longitud determinada, medido en milisegundos, que le toma en ir de un punto a otro en ambos sentidos (ida y vuelta). En este caso los puntos están definidos por los diferentes nodos de la red troncal (Fuente: REDUNO, 2.006).

El retardo puede ser el resultado de diferentes factores. Estos incluyen la velocidad de la computadora del usuario final, el tamaño de la conexión al Internet, servidores Web saturados, enrutamiento en la red de baja calidad (debido

al exceso de saltos o a las distancias muy grandes) o congestión en la red. Solamente algunos de estos factores están bajo el control del Proveedor de Servicios de Internet (el enrutamiento y la congestión). Otros factores como la saturación en servidores Web y el ancho de banda del acceso a Internet del usuario, no tienen ninguna relación con el desempeño de la red de transporte IP.

El retardo en la red puede ser afectado por la velocidad de los circuitos o enlaces de la red, o el retardo de inserción, que se refiere a la tasa a la cual los enrutadores pueden reenviar los paquetes. También puede ser afectado por los retardos de las colas o por los retardos de propagación.

II.6.3. Pérdida de Paquetes.

La pérdida de paquetes esta definida como el porcentaje de paquetes perdidos en una transmisión. Lo contrario a la perdida de paquetes es la cantidad de paquetes recibidos, la cual se define como el complemento de la pérdida de paquetes, es decir 100 menos el porcentaje de pérdida de paquetes (Fuente: REDUNO, 2.006).

La naturaleza del protocolo TCP/IP sobre el cual opera el Internet, permite la posibilidad de que algunos paquetes perdidos sean retransmitidos. De cualquier manera un alto nivel de retransmisiones puede incrementar el tráfico en la red, causando congestión, lo cual provoca que la red se vaya alentando. Si la pérdida de los paquetes es originada por la congestión en la red, el flujo resultante de paquetes retransmitidos puede elevar la congestión en la misma. De esta manera, una red que ofrezca un retardo pequeño y una disponibilidad alta, pero que presente una alta pérdida de paquetes, proporcionará un bajo desempeño.

II.6.4. Velocidad Neta del Flujo Binario (*Throughput*).

Se define como la tasa efectiva a la cual se transmiten o reciben datos, en un tiempo dado. Representa una medida importante de la capacidad de un canal de comunicaciones (Fuente: REDUNO, 2.006).

La caracterización del *throughput* en un canal puede hacerse en base al ritmo binario medio y al ritmo binario más alto ofrecido a todos los usuarios que acceden a él. Usualmente se obtiene la velocidad neta o efectiva como el porcentaje de la tasa de bits recibida entre la transmitida.

II.7. Sistema de monitoreo y gestión de una red PLC.

Los elementos de monitoreo y gestión de una red PLC, no difieren de los empleados en redes tradicionales de acceso a banda ancha (Fuente: ILEVO, 2.006). Al ser una red basada en la transmisión de datos sobre IP los eventos que analiza este sistema son:

- Topología de la red PLC: muestra la ubicación geográfica y jerárquica de los componentes del sistema.

- Rendimiento de los maestros del sistema: se refiere al grado de disponibilidad, confiabilidad y tiempo de respuesta de los equipos cabecera de las celdas.

- Configuración de equipos: regula las frecuencias y ganancias de transmisión, así como el filtrado de direcciones MAC (*Médium Access Control*), creación de VPN (*Virtual Private Network*) y VLAN (*Virtual Local Area Network*), VoIP, entre otros.

- Indicadores SNMP (*Simple Network Management Protocol*): muestra el rendimiento de la red a través del flujo de paquetes, flujo de bytes, errores y último reinicio del sistema.

- Estado de los nodos y enlaces: es medido a través de las respuestas a los paquetes ICMP (*Internet Control Management Protocol*) y la congestión que se detecta en el caso de flujo lento de datos.

Un ejemplo de un Sistema de Monitoreo y Gestión, se muestra en el Apéndice H, donde se describen los parámetros de administración de una Red PLC del fabricante Ilevo, correspondiente a Segunda Generación.

II.8. Antecedentes de Implementación.

II.8.1. Europa.

La red eléctrica de Europa consta de grandes células en las cuales un solo transformador da abasto a 200 casas aproximadamente. Esta topología es mejor para PLC, donde además los cables de la red eléctrica tienen un mejor escudo que ayuda a superar los problemas de radiación y de ruido.

La disponibilidad de banda ancha está limitada en muchos países europeos y además los servicios de DSL (*Digital Subscriber Line*) y cable de banda ancha son los más caros del mundo, consecuentemente, la penetración global de banda ancha es baja, con menos de 2% de penetración por familia en el oeste de Europa. Hay, sin embargo, algunas excepciones de países para esta regla de baja penetración. Esto ofrece potencial para PLC si los costos pueden ser reducidos y el servicio ofrecido por menos de 25€ al mes. De hecho, algunas ofertas del PLC están muy por debajo de este precio (Fuente: FLORES, 2.004: 66).

En Alemania, por ejemplo, la salida de servicios de banda ancha PLC es de aproximadamente 15€ al mes y más 120 a 150€ para la instalación. Alemania es un mercado importante para el PLC, ya que fue uno de los primeros países en implementar la tecnología, existiendo ya en aproximadamente 110.000 hogares, donde la RWE (compañía eléctrica alemana) inició el despliegue comercial en julio de 2001 en Essen. Sin embargo, debido a fuertes presiones por parte de *Deutsche Telecom* y la imposición de niveles de radiación muy estrictos, en septiembre de 2002 el operador se vio obligado a dejar de ofrecer el servicio, al hacerse inviable su plan de negocio.

Las compañías también trabajan en la última milla con tecnología PLC en Austria, Finlandia, Italia, los Países Bajos, Polonia, España, Suecia y Suiza.

España se está tornando rápidamente en un mercado crucial para el PLC. Las compañías principales de energía del país, Endesa e Iberdrola, han sido muy activas en desarrollar la tecnología. Endesa a través de AUNA Telecomunicaciones, empezó una prueba de medio voltaje de 2.500 usuarios en la ciudad de Zaragoza, que anunció el inicio de una nueva tecnología, situación que se ha visto cercenada debido a la decisión de la empresa de detener la comercialización de PLC debido a razones que Endesa no ha hecho públicas. Por su lado Iberdrola parece tomar la iniciativa y seguirá dando el servicio en Madrid y Valencia, donde cuentan con aproximadamente 3.000 contratos.

A continuación se presenta una breve descripción de lo que realizaron algunos de los proveedores de tecnología durante las primeras pruebas realizadas en toda Europa:

NORWEB. Es uno de los actores más importantes en el mercado PLC en el Reino Unido, ésta anunció su retirada del negocio PLC. Según NORTEL, existían suficientes informes que constatan, que el mercado de PLC no era económicamente viable.

DS2. En la actualidad la tecnología que consigue las mayores prestaciones tanto en ancho de banda como en fiabilidad, está basada en los diseños y chips de DS2. Esta compañía Española instalada en Valencia, se dedica al desarrollo y diseño de chips de PLC, actualmente es líder tecnológico en el área. Sus desarrollos son los que permiten tener un mayor ancho de banda teniendo hasta 200Mbps en equipos de la segunda generación. Los adaptadores PLC usados cuentan con tomas a la red eléctrica, al teléfono y a la PC (USB, WiFi y *Ethernet*).

Actualmente, los estudios llevados a cabo en Venezuela utilizan la tecnología DS2, debido a su alto desempeño.

II.8.2. Norteamérica.

Las dificultades abundan en el uso de PLC en Norteamérica:

- La banda ancha está mucho más disponible que en Europa y la penetración doméstica es superior en aproximadamente 15%.
- El precio promedio para usuarios finales de banda ancha es más bajo que en Europa y mucho menor que el precio de las ofertas de PLC.
- La topología de la red eléctrica es más desafiante para el PLC en Norteamérica que en Europa.
- Provoca interferencias RF ya que la cubierta del cable eléctrico es más delgada, por ello, la FCC (*Federal Communications Comission*) ha establecido reglas sobre interferencias máximas.

Algunas de las ventajas en el desarrollo de PLC en Norteamérica, en contraposición a lo presentado anteriormente, son las siguientes:

- Muchos lugares carecen de cobertura de banda ancha, particularmente comunidades más pequeñas y áreas rurales.
- El PLC ofrece la posibilidad de monitorear la demanda mucho más estrechamente y así también puede ser una herramienta útil para aumentar la eficiencia del surtimiento de electricidad.

En esta región la tecnología PLC no se encuentra muy extendida, debido a la complicada topología de la red eléctrica existente, lo que se traduce en altos costos, aunque existe una implementación donde se usan las líneas eléctricas para crear redes locales domésticas.

La FCC ha observado con gran interés desarrollos en el área de comunicaciones de alta velocidad sobre líneas de poder. Las capacidades de transmisión de alta velocidad pueden autorizar a la tecnología PLC para proveer una plataforma alternativa para el despliegue de banda ancha, que puede traer valuables servicios

a consumidores, estimulando la actividad económica, mejorando la productividad nacional y adelantando oportunidades económicas para el público, consistentes con los objetivos de la FCC (Fuente: FLORES, 2.004: 74).

II.8.3. Asia.

La penetración de PLC en Asia es muy pequeña. Sin embargo, tiene gran potencial porque las mayores áreas no están pasadas por líneas de cobre. Japón no tuvo mercado de PLC hasta hace poco, porque no estaba permitido la transmisión de datos sobre líneas de conducción eléctrica (Fuente: FLORES, 2.004: 79).

II.8.4. Latinoamérica.

La poca penetración de telecomunicaciones y las arquitecturas eléctricas de distribución generalmente favorables, hacen a Latinoamérica un mercado con potencial significativo para el PLC. Además, aunque el cable, el bucle local inalámbrico y el DSL están aumentando su penetración en los mercados, la lentitud de su implementación y una falta de líneas disponibles han limitado la elección de consumidores de banda ancha. Esto abre potencialmente la puerta a PLC, tanto en edificios inteligentes, como en la oportunidad de lograr acceso universal mediante PLC a zonas rurales y alejadas de las comunicaciones (Fuente: FLORES, 2.004: 79).

Las pruebas PLC han estado en proceso desde 2001 en Argentina, Brasil y Chile. Sin embargo, la conectividad para los equipos de cabecera (*Head Ends*) cuesta mucho y está limitada en la mayoría de países latinoamericanos. Las áreas donde la conectividad es más penetrante, son esas en las que han destacado las alternativas de banda ancha como DSL y cable.

A pesar de su potencial como un mercado para el PLC, las condiciones en Latinoamérica para una implementación significativa en corto plazo son mixtas. Muchos países incluyendo Argentina, Colombia y Venezuela, están en dificultad económica, sin embargo en Brasil, los suministros han sido activos en el espacio

de las telecomunicaciones por años y pueden verse oportunidades para expandir su papel en un mercado que está sujeto a la desregulación. Por su lado en Venezuela también se están realizando esfuerzos para llevar a cabo pruebas pilotos del canal eléctrico como medio para la transmisión de señales digitales.

II.9. Interconexión de red de Telecomunicaciones y la red eléctrica de bajo voltaje.

Para inyectar y extraer las señales de datos de un sistema PLC se requiere la interconexión de la red de telecomunicaciones convencional y la red eléctrica de planta interna de los inmuebles. Esto se logra a través de un equipo cabecera (*Head End*, primer elemento de la red PLC) que conecta a esta red con la de transporte IP (*Internet Protocol*).

II.9.1. Funcionamiento.

El equipo HE (*Head End*), conectado al Repetidor PLC, se encarga de recibir la señal de datos que proviene de la red de transporte de telecomunicaciones a través de un puerto Óptico o *Ethernet*. La portadora generada por el equipo, en distintos canales de frecuencia de 1.5 a 40Mhz según la aplicación, es modulada por la señal de datos en OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) con más de 1536 subportadoras.

La señal modulada sale del equipo y es inyectada en la red eléctrica de medio o bajo voltaje por medio de una conexión con acopladores inductivos o capacitivos en dos fases (o una fase y neutro) del circuito trifásico.

Las redes de trasporte IP convencionales tienen como interfaz hacia las redes PLC los equipos HE. De esta forma, las señales de datos y la energía comparten el mismo medio de transmisión de manera eficiente en la mayoría de los casos,

puesto que las frecuencias empleadas por la tecnología PLC son muy elevadas en comparación a las de la energía eléctrica (50 o 60Hz.).

En la figura a continuación se observan en detalle las conexiones de los equipos PLC en las etapas de la infraestructura eléctrica de planta interna, para el caso de distribución en tres fases. Del centro de transformación (CT) salen cuatro barras que representan las tres fases y el neutro del circuito trifásico. Como se había dicho anteriormente, la interfaz con la red de datos es el equipo cabecera PLC, el cual en este caso se encuentra conectado a las fases 1 y 2. El repetidor PLC extrae la señal del medio eléctrico, en las mismas fases de inyección y la distribuye a los circuitos de los tomacorrientes del inmueble, a los cuales se encuentran conectados los módems PLC que brindan el acceso a los usuarios finales, a través de teléfonos, computadoras personales, decodificadores de televisión, entre otros.

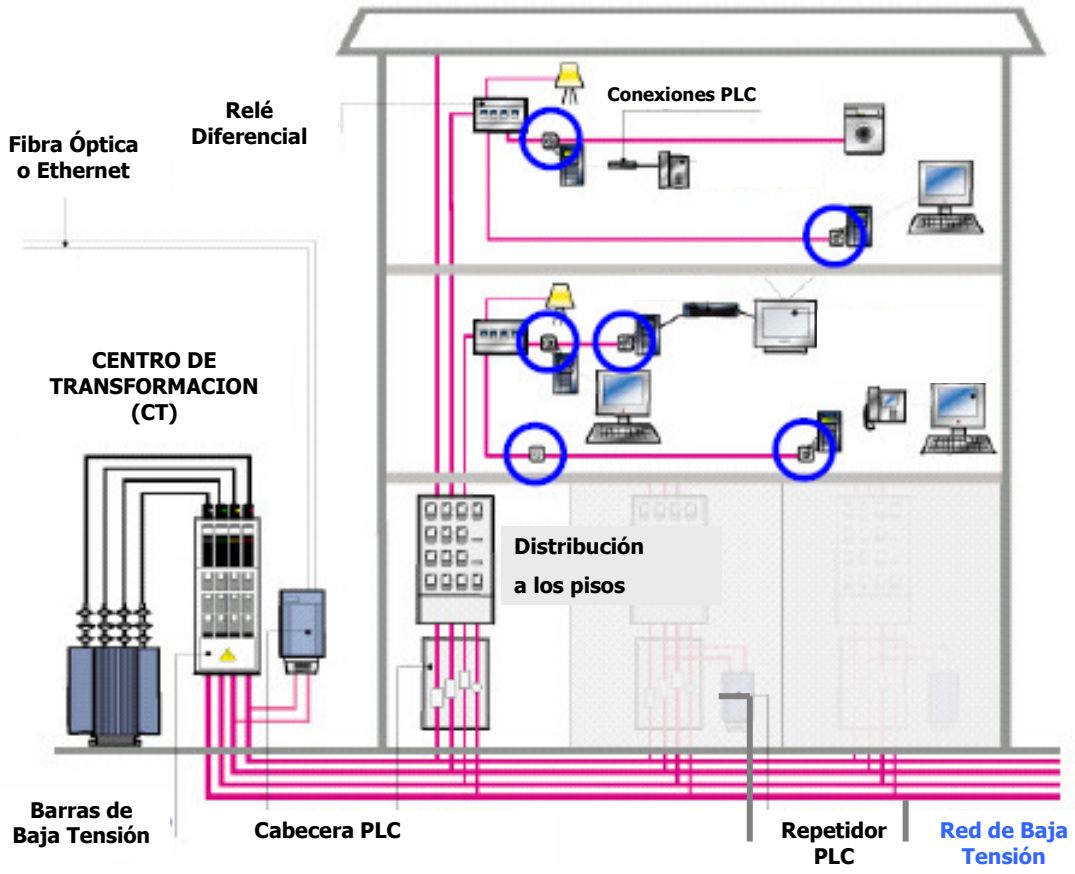


Figura #17: Topología de la Red PLC en baja tensión. (Fuente: ENDESA, 2.003).

Capítulo III
Metodología – Desarrollo

El proyecto desarrollado se ubica en el área de la investigación aplicada y consta de las fases mostradas en la siguiente figura.

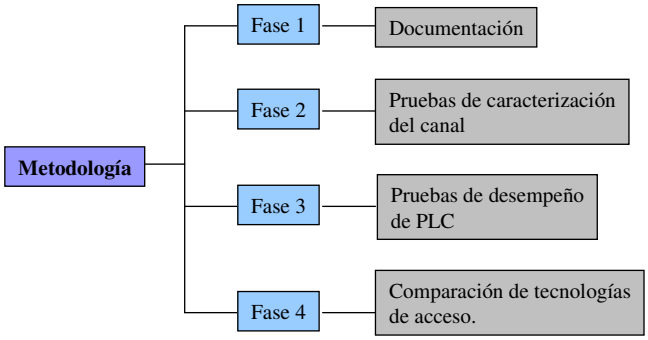


Figura #18: Fases de la metodología.

III.1. Fase 1: Documentación.

El cronograma de trabajo se inició con la revisión de los siguientes aspectos, que contribuyeron a adquirir los conocimientos necesarios sobre la tecnología y a la realización del Capítulo II denominado Marco Referencial.

- Antecedentes de implementación de PLC en otros países: esto permitió sustentar que la factibilidad de implantar la tecnología depende de la topología de las redes eléctricas de cada región. Este hecho fundamenta la necesidad de realizar una caracterización previa del canal antes de la instalación del servicio.

- Estudio de fases de generación, distribución y acceso de la energía eléctrica: se accedió a las fuentes bibliográficas del Centro de Información Técnica de la Electricidad de Caracas, para conocer la topología de la red eléctrica utilizada en Caracas.

- Interconexión del sistema PLC y la red de transporte: se hizo necesario estudiar la interconexión del sistema PLC con la red de transporte de telecomunicaciones, basada en protocolo IP y la técnica de modulación OFDM, para así conocer el método de inyección de la señal de datos en la red eléctrica.

- Resúmenes de documentos de la Alianza OPERA: se realizó la revisión de los siguientes documentos:

  - D3: Mediciones del canal.

  - D4: Postulación teórica del modelo del canal PLC.

  - D10: Guía de referencia para la optimización de la Red de Acceso PLC y su interconexión con la red troncal.

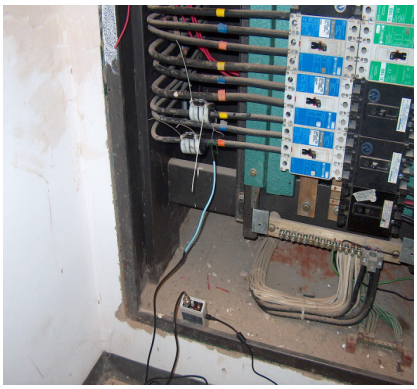
  A través de los mismos, se adquirieron los conocimientos necesarios acerca de los detalles de funcionamiento e implementación de la tecnología y se extrajeron las recomendaciones para el diseño de la metodología de medición de los parámetros característicos del canal eléctrico.

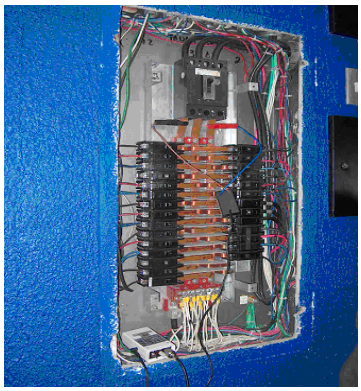
- Topologías de la red eléctrica de planta interna: en el Área Metropolitana de Caracas se identificaron 4 tipos de distribución de energía eléctrica de planta interna, lo que determinó la metodología de realización de las pruebas de caracterización del canal eléctrico.

III.2. Fase 2: Pruebas de caracterización del canal.

La determinación y preparación de las pruebas, conllevó a la realización del "Manual para la medición de parámetros característicos del canal eléctrico LV" (ver Apéndice A), donde se especifican las metodologías de inyección, recepción y análisis de la señal de prueba.

Estas pruebas consisten básicamente en la inyección de una señal en la banda de 1 a 50MHz que abarca el rango de operación de PLC, en dos fases (o una fase y neutro) en baja tensión y su recepción en el tablero en el piso del inmueble donde se desea analizar dicha señal. Esta inyección / recepción se muestra en las figuras siguientes y se logra a través de acopladores inductivos (Figura #20) o capacitivos (Figuras #20 y #21), que permiten adaptar las señales al medio eléctrico (ver Apéndice B).





Figuras #19 y #20: (19) Inyección con acoplamiento inductivo.
(20) Inyección con acoplamiento capacitivo.

Figura #21: Recepción de la señal con acoplamiento capacitivo.

III.2.1. Pruebas de caracterización del ruido.

Las primeras pruebas se realizaron según las topologías especificadas en el Capítulo I y utilizando los siguientes equipos:

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Transmisor	Equipo repetidor PLC. Banda de operación: 19 a 22.8MHz. Potencia de transmisión: 23mW. Impedancia de salida: 50Ω.
Receptor	Analizador de espectro HP modelo 8591E. Banda de operación de 1.5Mhz a 23GHz. Impedancia de entrada: 50Ω. Potencia máxima a la entrada: 30dBm.

Tabla #3: Especificación de equipos iniciales de transmisión y recepción.

En este caso, siguiendo la metodología descrita, se realizaron las pruebas de caracterización del canal eléctrico en los siguientes inmuebles del Área Metropolitana de Caracas:

Inmueble	Tipo	Ubicación	Antigüedad (años)	Cantidad de pisos	Topología*	Voltaje (V)	Fases de inyección
A	Comercial	Av. El Vigía. Santa Rosa.	5	9	1	480-120	1 y 3
B		Av. Rómulo Gallegos. Los Palos Grandes.	30	15	4	120	
C		Av. Vollmer, San Bernardino.	25	25	1	480-120	

* Ver Topología eléctrica de las redes de planta interna en el Marco Referencial.

Tabla #4: Características de los inmuebles seleccionados.

A través de estos ensayos, se logró verificar el comportamiento del ruido típico presente en el canal eléctrico (ruido ráfaga), más no la realización de una caracterización completa de las redes eléctricas de planta interna, debido a que el equipo generador no trabajaba en todo el espectro de operación de PLC, sino en la banda de frecuencia de 19 a 22.8MHz, por lo que se continuó con una siguiente etapa de mediciones que complementó la anterior.

III.2.2. Pruebas de caracterización del canal eléctrico.

Esta segunda etapa se llevó a cabo empleando un equipamiento especial para la caracterización de canales eléctricos, el cual considera las especificaciones técnicas y operativas de PLC: canales de subida y bajada, espectro de operación,

potencia de los equipos y conectividad entre los transmisores y receptores según la sensibilidad de los mismos. De igual forma, se empleó un voltímetro que permitió obtener los valores de voltajes y corrientes en las líneas eléctricas bajo prueba. A continuación se presentan las especificaciones de los equipos empleados:

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Transmisor	Generador de ruido marca PROMAX, modelo PROPOWER - 1. Banda de operación: 1 a 50MHz. Potencia de transmisión: 0dBm ± 2 dBm. Margen de tensiones 12VDC. Impedancia de salida 50Ω.
Receptor	Analizador de espectro marca PROMAX, modelo PROPOWER - 5. Banda de operación: 1 a 50MHz. Impedancia de entrada: 50Ω. Margen de medida: -80dBmV a 20dBmV. Precisión: ± 2dB.
Voltímetro	Voltímetro con pinza amperimétrica marca FLUKE. Margen de medida de corriente: 0 a 999.9A ± 2%. Margen de medida de voltaje: 0 a 600.0V ± 1%. Rango de frecuencia: 5 a 400Hz. Rango de impedancias: 0 a 6000Ω ± 1.5%.

Tabla #5: Especificación de equipos de transmisión y recepción.

Los parámetros que se obtienen en cada medición y que son fundamentales para la determinación de la factibilidad de un enlace son los siguientes:

- Rango de frecuencias: se define como alto o bajo según las frecuencias de operación de PLC. El rango será bajo cuando la frecuencia esté por debajo de los 10MHz y alto cuando se encuentre entre 10 y 40MHz.

- Atenuación.

  - Atenuación de cables: se obtiene en función del acoplamiento utilizado en la transmisión y recepción de la señal, de acuerdo a las características de atenuación mostradas en el Apéndice B.

  - Atenuación del canal: se calcula en función de la potencia de la señal inyectada en un punto del inmueble y la recibida en otro extremo, sin considerar las pérdidas introducidas por los cables de medición.

- Desvanecimiento selectivo en frecuencia: se determina por medio del espectro de ocupación de la señal recibida. Se considera como

desvanecimiento selectivo en frecuencia a todos aquellos declives de la señal donde la potencia sea menor o igual a –45dBm.

- Potencia de la señal recibida: se obtiene de los datos arrojados por el equipo de recepción. Se toma una potencia máxima para cada rango de frecuencias utilizado por PLC (alto o bajo).

- Relación señal a ruido (S/R): este parámetro es arrojado por el equipo receptor. Igualmente se consideran sólo los valores máximos en los rangos de operación de la tecnología PLC (alto o bajo).

La factibilidad de implementación del sistema en un enlace viene dada por los valores de los parámetros mencionados anteriormente, lo que se muestra a continuación:

1. El parámetro sensibilidad de los equipos PLC, determina la potencia mínima de recepción. Si la potencia recibida es menor que la sensibilidad de los equipos PLC, no es factible la instalación del sistema sin una etapa previa de amplificación de la señal.

2. El resultado de la medición del parámetro S/R indica si los equipos PLC garantizan el funcionamiento del sistema ante la presencia de ruido. Se debe comparar el resultado obtenido con las especificaciones técnicas de los equipos.

3. Durante las pruebas los equipos analizador de espectro y generador deben establecer comunicación en al menos dos canales de operación.

La selección de la muestra de inmuebles se realizó en función de los siguientes parámetros:

- Antigüedad: se refiere a los años de construcción. En la muestra se consideran edificaciones con un máximo de 40 años y un mínimo de 2 años de antigüedad. Estos valores son de difícil obtención, por lo que han sido estimados.

- Cantidad de pisos: este parámetro tomó en cuenta todos los niveles del inmueble. La muestra abarca inmuebles de 1 a 20 niveles.

- Ubicación: para lograr una representación significativa del Área Metropolitana, se eligieron edificios en puntos estratégicos.

- Topología: se refiere al tipo de distribución de la energía eléctrica en planta interna (Ver Marco Referencial). La muestra consideró sólo los casos de distribución en 480V y en 120V.

Los inmuebles seleccionados de acuerdo a los parámetros planteados, se muestran a continuación:

Inmueble	Tipo	Ubicación	Antigüedad (años)	Cantidad de pisos	Topología*	Voltaje (V)	Fases de inyección
1	Residencial	Avenida Neverí, calle Auyantepuy. Bello Monte	40	15	3	120	1 y 2
2		Av. Páez, calle Monte Elena. El Paraíso	18	17			
3		Calle 3, Urb. Juan Pablo II. Montalbán 3.	20	20			
4	Comercial	Av. Río Caura, Redoma de Prados del Este.	30	6	1	480 - 120	1 y 3
5		Av. Rómulo Gallegos, Los Palos Grandes.	30	15	4	120	
6		Av. Francisco de Miranda, Buena Vista. Petare.	15	2.			
7		Boulevard de Sabana Grande.	35	4			
8		UCAB – Postgrado	16	3			
9		UCAB – Edif. Cincuentenario	2	7			
10		UCAB – Labs. Telecom..	2	1			
11		Av. Francisco de Miranda. Los Palos Grandes.	15	22	1	480 - 120	
12		Final Av. Ppal. Las Mercedes.	50		4	120	
13		Av. Vollmer. San Bernardino.	25	30	1	480 - 120	

* Ver Topología eléctrica de las redes de planta interna en el Marco Referencial.

Tabla #6: Características de los inmuebles seleccionados.

La siguiente figura muestra la distribución geográfica de los inmuebles en estudio. La misma se hizo con la finalidad de cubrir de la manera más amplia las principales urbanizaciones del Área Metropolitana de Caracas.

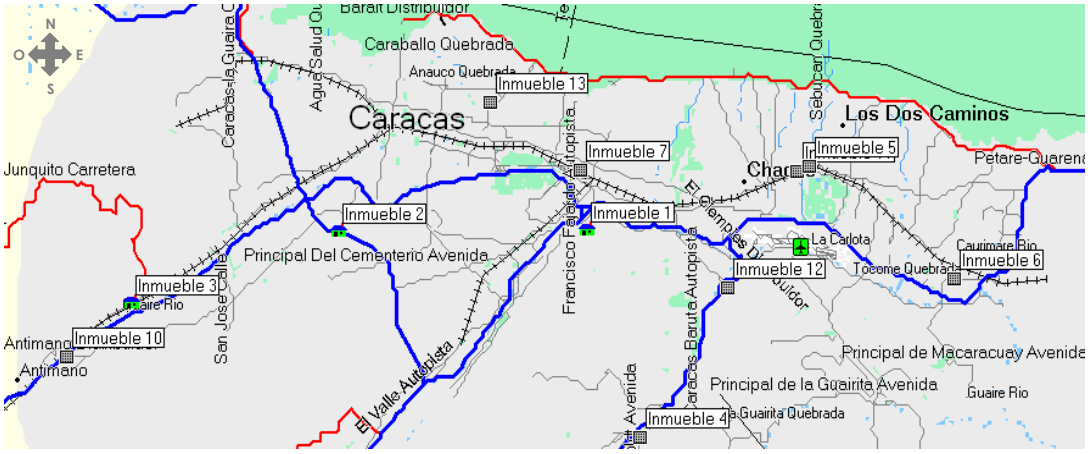


Figura #22: Ubicación de los Inmuebles.

Es importante destacar que las pruebas realizadas en el Inmueble 13, contribuyeron a confirmar la implementación de un demo de la tecnología, que permitió poner en práctica las técnicas de instalación y operación de los sistemas de transmisión de datos por líneas energizadas (ver Apéndice C), además de un gráfico comparativo de la atenuación presentada en cada piso del inmueble.

III.3. Fase 3: Medición del desempeño de enlaces PLC.

Con el fin de verificar la factibilidad de transmisión simultánea de energía y servicios de acceso a banda ancha proporcionados por los sistemas PLC, se realizó un conjunto de pruebas que permitieron medir los parámetros de desempeño descritos en el apartado II.6 del Marco Referencial, las cuales son aplicables a redes cuyo acceso final emplea interfaces *Ethernet*. Estas mediciones se hicieron en dos sistemas PLC de diferentes fabricantes y tecnologías, instalados en el Inmueble 13, siguiendo las técnicas descritas en el "Manual de medición del desempeño de enlaces PLC", mostrado en el Apéndice D. Las características de las redes bajo estudio se muestran en el siguiente cuadro:

Red	Generación	Velocidad de Transmisión	Canales de Transmisión	ISP	Fases de Inyección	Nº Usuarios	AdeB Total
1	1	45Mbps	Configuración Manual	Interno	1 y 3	2	8Mbps
2	2	200Mbps	Configuración automática	Externo	1 y 2	16	

Tabla #7: Características de los sistemas PLC – Inmueble 13.

Las topologías de ambas redes es similar, debido a que el HE se encuentra instalado en el sótano, donde se ubica el centro de transformación de media a baja tensión. El acceso a Internet es proporcionado por dos proveedores diferentes, pero en ambos casos el ancho de banda total es de 8 Mbps. El equipo repetidor se ubica en el séptimo nivel del inmueble, el cual realiza el *bypass* hacia los circuitos de 120V, en los que se conectan los módems para el acceso final.

La metodología empleada para realizar las pruebas en las redes bajo estudio se resume a continuación:

1. **Medición de disponibilidad, latencia y pérdida de paquetes:**

El comando *ping (Packet Internet Groper)* es una herramienta utilizada para probar conectividad, enviando un paquete de información y recibiendo la respuesta en tiempo del destino (Fuente: ZONAGRATUITA, 2.006).

Se generó una prueba de *ping* entre dos terminales, con sistemas operativos Windows 2000, empleando 500 paquetes de prueba por cada intervalo de poleo realizado, a las horas especificadas más adelante. Las características de los paquetes empleados en la prueba fueron: el tamaño del paquete de 65500 bytes (Tamaño de un paquete IP) con un TTL (tiempo de descarte o *time to live*) de 128ms.

La medición de la disponibilidad se hizo contabilizando el número de pruebas exitosas en función de la cantidad total de pruebas realizadas y el porcentaje de pérdida de paquetes se calculó en función de la cantidad total de paquetes enviados y perdidos, obtenidos a través de la herramienta *ping*.

2. Medición de velocidad de conexión:

Los usuarios de las redes bajo estudio no presentan una velocidad de acceso configurada o comprometida, por lo que se hace inviable el cálculo de una velocidad efectiva de flujo de bits (*throughput*) en ausencia de una velocidad de referencia.

El valor determinable es la velocidad real de la conexión en subida y bajada, para lo cual se ha hecho uso del "velocímetro" de alta precisión, ofrecido de forma gratuita por la página Web www.abeltronica.com. A través del mismo se asigna una dirección IP de salida al terminal solicitante y se realizan una secuencia de intentos de comunicación contra un servidor en el país seleccionado por la persona que realiza la prueba; que en este caso fue Argentina. La figura siguiente muestra la interfaz de la herramienta:

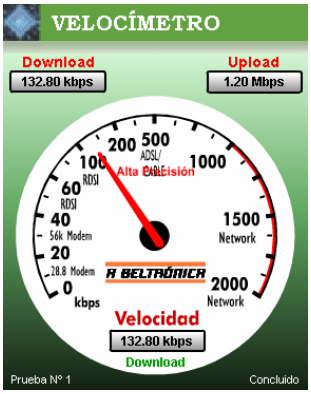


Figura #23: Interfaz del Velocímetro de A BELTRÓNICA.

Las pruebas de desempeño realizadas, en cuanto a latencia y velocidad efectiva de conexión, se realizaron según el siguiente cronograma:

Día	Fecha	Pruebas con Ping	Pruebas de Velocidad	Hora de mayor tráfico
1	05/06/06	1	1,2,3	10:30am
		2	4,5,6	2:30pm
2	06/06/06	3	7,8,9	10:30am
		4	10,11,12	2:30pm

Tabla #8: Cronograma de pruebas de desempeño.

La eficiencia de las redes PLC se determinó comparando los resultados obtenidos con los parámetros de funcionamiento óptimo de las mismas, los cuales se muestran a continuación:

Parámetro	Valor Esperado
Disponibilidad	≥ 99.99 %
Latencia	≤ 300ms.
% Paquetes Perdidos	1
Velocidad Mínima de *Upload*	Según lo configurado
Velocidad Mínima de *Download*	

Tabla #9: Valores de referencia de parámetros de desempeño.

III.4. Fase 4: Comparación de Tecnologías de Acceso.

Para realizar la comparación de las tecnologías de acceso a banda ancha, se realizaron las siguientes actividades:

III.4.1. Medición del desempeño de la red *Ethernet* del Inmueble 13:

Estas pruebas se realizaron con el fin de obtener parámetros de desempeño de una red *Ethernet* operativa de gran escala. En este caso, la LAN convencional posee un ancho de banda total de 16Mbps, el cual se distribuye de forma variable y asimétrica entre 3000 usuarios, aproximadamente.

El cronograma de las mediciones realizadas, así como la metodología empleada, se corresponde con lo descrito en la fase anterior, de manera que la evaluación se hiciera de forma paralela y bajo las mismas condiciones.

III.4.2. Comparación del desempeño de la red *Ethernet* con los dos sistemas PLC instalados en el Inmueble 13:

Los resultados obtenidos en el apartado anterior, se utilizaron como referencia para evaluar los casos de funcionamiento ideal de las redes de acceso PLC (parcialmente operativas), más no para realizar una comparación directa entre ambas tecnologías de acceso, debido a la diferencia significativa entre las condiciones de uso y operación de las mismas.

III.4.3. Comparación teórica de las características de PLC con otras tecnologías de acceso a banda ancha:

Con el fin de comparar las prestaciones de la tecnología PLC con respecto a otras, a nivel de velocidades, distancias máximas y costos, se elaboró un cuadro comparativo que resume estas características, las cuales fueron obtenidas a través de enciclopedias y estudios similares publicados en Internet.

Capítulo IV
Resultados

IV.1. Fase 1: Documentación.

Los resultados de esta fase se corresponden con la adquisición de los conocimientos necesarios para el manejo de la tecnología PLC, lo que se traduce en la elaboración del Marco Referencial de este documento y el Manual para la medición de parámetros característicos del canal eléctrico LV.

IV.2. Fase 2: Pruebas de caracterización del canal.

IV.2.1. Pruebas de caracterización del ruido.

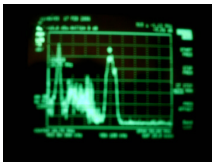
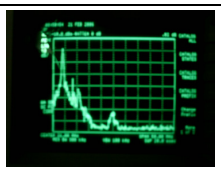
Inmueble	Espectro del canal	Características del Ruido			
		Ancho de banda	Potencia Máxima (dBm)	Potencia Mínima (dBm)	Relación S/R (19 – 22.8MHz)
A		600KHz a 6MHz	-50	-60	30.8
B		600KHz a 12MHz.	-30	-80	52.8
C		500KHz a 8MHz	-20	-40	12.8

Tabla #10: Resultados de la caracterización del ruido.

IV.2.1.1. Análisis de resultados.

A través de éstos resultados se pueden verificar las características del ruido presente en los canales eléctricos de planta interna, las cuales se muestran a continuación:

Característica	Valores Promedios
Ancho de banda.	567KHz a 8.67MHz
Potencia máxima.	-33.33dBm.
Potencia mínima.	-60dBm.
Relación señal a ruido (en el rango de 19 a 22.8MHz).	32.

Tabla #11: Resultados promedios de la caracterización del ruido.

Los datos mostrados se obtienen promediando los valores mínimos y máximos obtenidos en las 3 mediciones realizadas.

Estos resultados se corresponden con lo explicado en el Marco Referencial, donde el ruido tiene potencias máximas hasta de –40dBm y una ocupación máxima del espectro hasta 10Mhz.

La ocupación en el espectro del ruido podría afectar a los canales de frecuencia 1, 4, 5, 7, 9, 12 y 13, de los equipos PLC de primera generación y los canales 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13 y 14 de los equipos de segunda generación (Ver Anexo A, donde se muestran las tablas con las frecuencias de operación de los equipos). En general, la potencia de transmisión y el tipo de modulación empleada por los equipos PLC permiten que la señal sea robusta ante las potencias del ruido en el canal eléctrico.

En los casos de estudio, se obtiene una relación Señal a Ruido alta, debido a que la frecuencia de transmisión utilizada se encuentra 10MHz por encima del espectro de ocupación del ruido.

IV.2.2. Pruebas de caracterización del canal.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la caracterización del canal de los inmuebles seleccionados, según la metodología descrita en el Capítulo III. Los mismos se han clasificado de acuerdo al tipo de inmueble (residencial o comercial), según la tabla #6 mostrada en la Fase 2 de la Metodología. Es importante destacar que para efectos del estudio, se han tomado los casos menos favorables en los siguientes inmuebles:

- En la Universidad Católica Andrés Bello se consideró únicamente la caracterización realizada en los Laboratorios de Telecomunicaciones.
- En los edificios donde se realizó la recepción de la señal en varios niveles, se tomó en cuenta el resultado de la prueba en donde los equipos transmisor y receptor eran más distantes.

En cada caso se presenta un gráfico del espectro de las señales obtenidas, acompañado de una tabla que contiene los parámetros de interés para la investigación, de las que posteriormente se deriva el análisis de resultados. Adicionalmente en el Apéndice E se muestra el formato utilizado para registrar los datos obtenidos en cada una de las mediciones.

IV.2.2.1. Inmuebles residenciales en 120V:

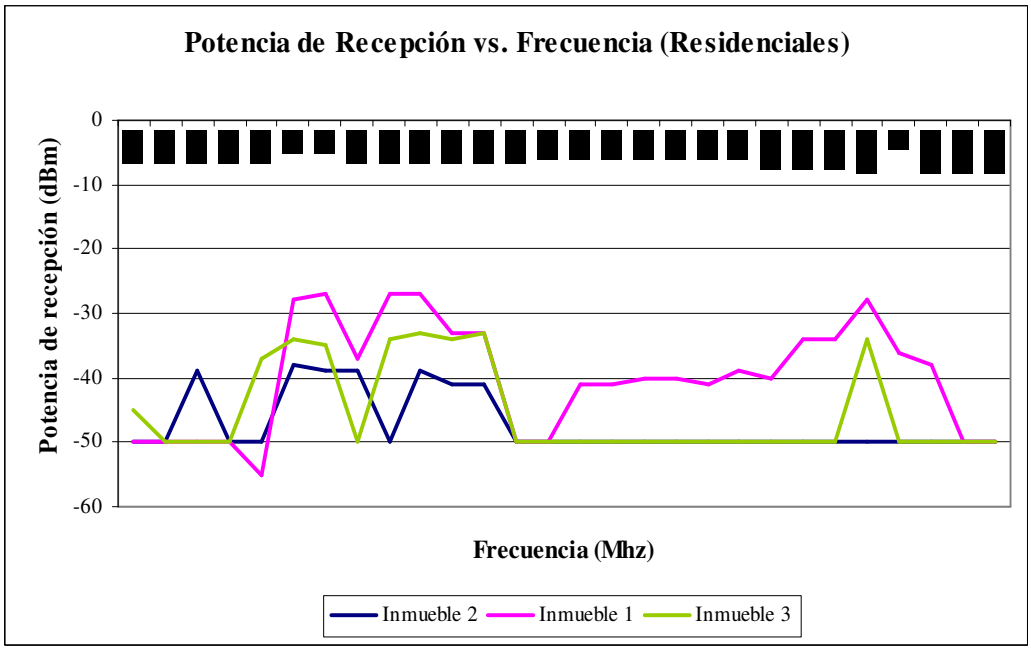


Figura #24: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles residenciales en 120V.

Inmueble	Rango de frecuencia	Pérdidas de cables (dB)	S/R máx.	Nº de desvanec.	Pmáx de recepción (dBm)	Pérdidas del canal (dB)	Distancia Tx / Rx (pisos)
1	Bajo	19.12	20	3	-25	5.88	2
	Alto	17.75	10	2	-28	10.25	
2	Bajo	19.12	14	4	-38	18.88	17
	Alto	17.75	13	Todo el rango.	---	---	
3	Bajo	19.12	62	3	-33	13.88	10
	Alto	17.75	15	2	-34	16.25	

Tabla #12: Parámetros de la caracterización de inmuebles residenciales en 120V.

IV.2.2.2. Inmuebles comerciales en 480V:

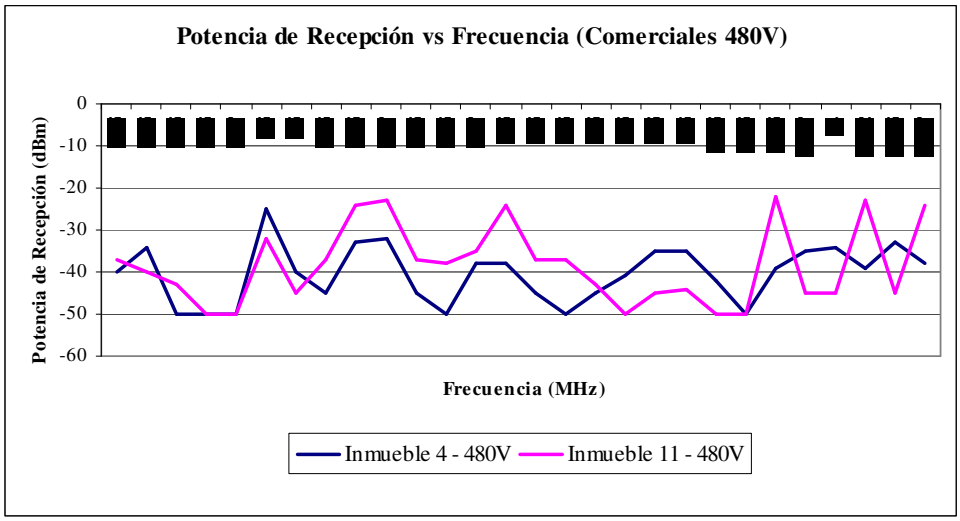


Figura #25: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles comerciales en 480V.

Inmueble	Rango de frecuencia	Pérdidas de cables (dB)	S/R máx.	Nº de desvanec.	Pmáx de recepción (dBm)	Pérdidas del canal (dB)	Distancia Tx / Rx (pisos)
4 – 480V	Bajo	19.12	11	3	-25	5.88	2
	Alto	17.75	62	2	-33	15.25	
11 – 480V	Bajo	19.12	16	2	-23	3.88	21
	Alto	17.75	16	4	-22	4.25	

Tabla #13: Parámetros de la caracterización en inmuebles residenciales en 480V.

IV.2.2.3. Inmuebles comerciales en 120V:

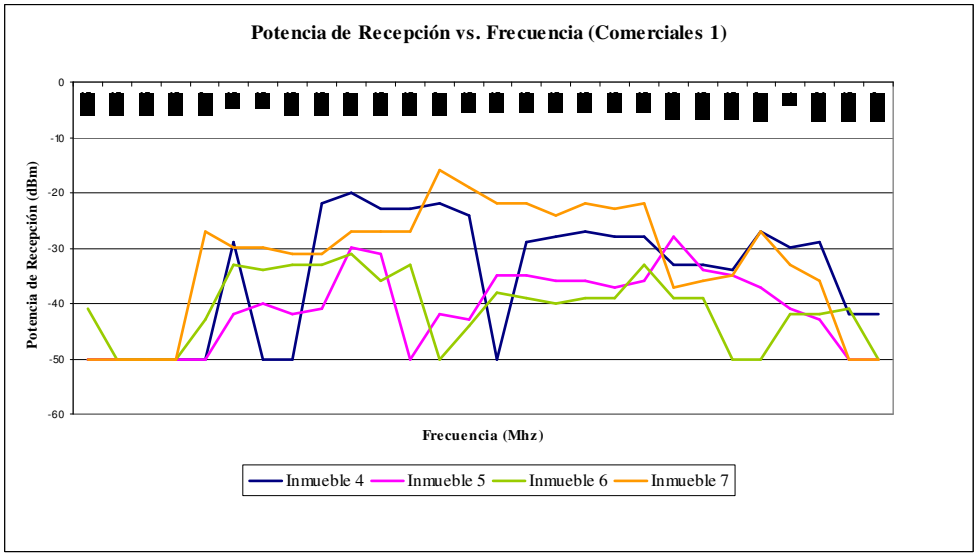


Figura #26: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles comerciales (1) en 120V.

Inmueble	Rango de frecuencia	Pérdidas de cables (dB)	S/R máx.	Nº de desvanec.	Pmáx de recepción (dBm)	Pérdidas del canal (dB)	Distancia Tx /Rx(pisos)
4	Bajo	15.74	2	2	-20	4.26	1
	Alto	17.5	1	1	-24	6.5	
5	Bajo	15.74	13	2	-30	14.26	2
	Alto	17.5	64	1	-28	10.5	
6	Bajo	19.12	64	2	-31	11.88	1
	Alto	17.75	17	1	-33	15.25	
7	Bajo	15.74	1	1	-16	0.26	3
	Alto	17.5	1	1	-22	4.25	

Tabla #14: Parámetros de la caracterización en inmuebles comerciales (1) en 120V.

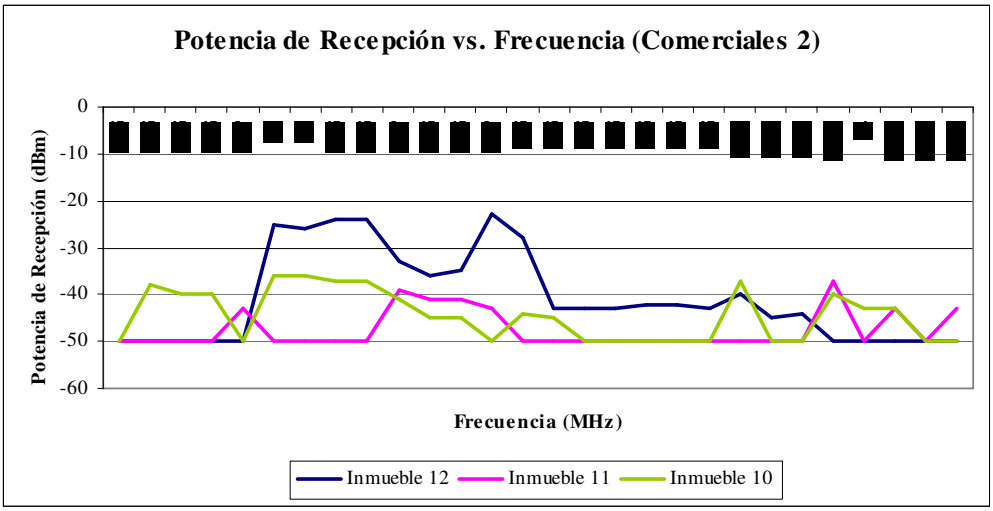


Figura #27: Gráfica de Potencia de Recepción vs. Frecuencia en inmuebles comerciales (2) en 120V.

Inmueble	Rango de frecuencia	Pérdidas de cables (dB)	S/R máx.	Nº de desvanec.	Pmáx de recepción (dBm)	Pérdidas del canal (dB)	Distancia Tx / Rx (pisos)
10	Bajo	19.12	20	3	-36	16.88	1
	Alto	17.75	18	3	-37	19.25	
11	Bajo	15.74	6	3	-39	23.26	21
	Alto	17.5	1	3	-37	19.5	
12	Bajo	15.74	1	1	-23	7.26	1
	Alto	17.5	1	1	-40	22.5	

Tabla #15: Parámetros de la caracterización en inmuebles comerciales (2) en 120V.

Espectro en redes domésticas.

Con el fin de verificar la atenuación característica de las redes eléctricas de planta interna en el tramo de acceso final, se hace un análisis de las potencias de

recepción en función de la frecuencia, dentro de un apartamento del inmueble 3, lo que se muestra en la siguiente figura:

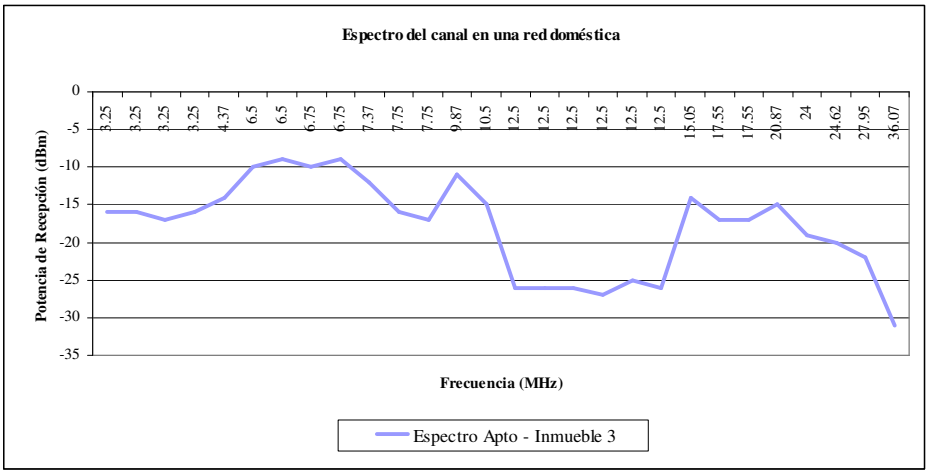


Figura #28: Gráfica del espectro del canal de una red doméstica.

A través del espectro de esta señal, se evidencia una mejor propagación en el rango de frecuencias bajas; sin embargo la cantidad de desvanecimientos es mínima y las potencias recibidas en el rango alto, siguen siendo satisfactorias para la operatividad del sistema PLC.

Distancia máxima de transmisión.

En la siguiente figura se muestra una gráfica comparativa de dos casos en los que se realizaron mediciones en varios pisos del mismo inmueble (inmuebles 11 y 13), con el fin de determinar un patrón de atenuación en función de la cantidad de pisos entre el transmisor y el receptor y en consecuencia, una distancia máxima de transmisión antes de necesitar la instalación de un repetidor que regenere la señal de datos.

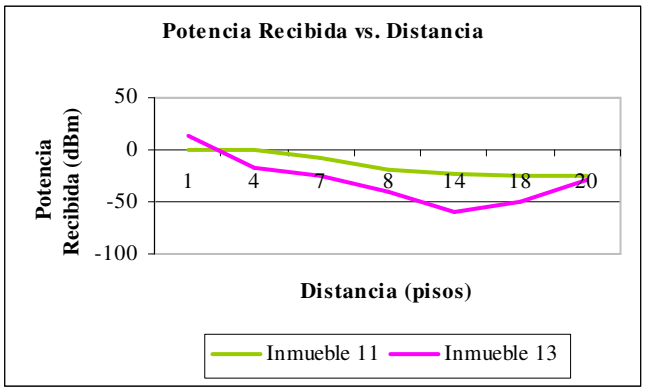


Figura #29: Gráfica de la potencia de recepción vs. Distancia, en varios pisos de dos inmuebles.

En el inmueble 11, la potencia recibida disminuye a medida que aumenta la distancia entre el transmisor y el receptor, pero esta característica se estabiliza a partir del piso 14, con una potencia promedio de –28dBm.

En el segundo caso, correspondiente al inmueble 13, se observa un aumento de la potencia de recepción a partir del piso 14, hasta llegar a unos –30dBm en el nivel 20.

Pérdidas por antigüedad.

Al hacer un estudio comparativo de las pérdidas introducidas por el canal eléctrico y los años aproximados de construcción de los inmuebles se identifica una tendencia en la que a mayor antigüedad se presenta una menor atenuación de la señal, así como una menor cantidad de desvanecimientos selectivos en frecuencia. Estos resultados se muestran en la siguiente gráfica:

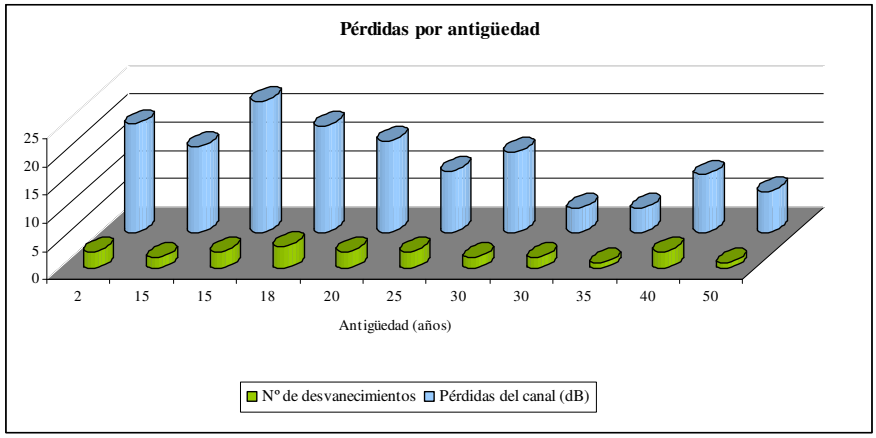


Figura #30: Gráfica de las pérdidas por antigüedad en los inmuebles.

IV.2.2.3.1. Análisis de resultados.

Desvanecimiento selectivo en frecuencia:

- En redes eléctricas residenciales con distribución de 120V, se presenta una mayor cantidad de desvanecimientos selectivos en el rango de operación de PLC de frecuencias bajas, además de desvanecimientos selectivos prolongados en frecuencias por encima de los 10MHz, puesto que es en este tramo donde existe un gran número de cargas conectadas de manera desbalanceada y una mayor cantidad de bifurcaciones, que generan reflexiones en la propagación de la señal.

- En redes eléctricas comerciales con distribución de 120V, se presenta una gran cantidad de desvanecimientos selectivos, pero la ocupación espectral de la señal es mayor y con niveles de potencia más altos que en los casos residenciales.

Atenuación del canal y potencias máximas:

- En los segmentos de red con distribución de 480V se presenta una atenuación menor (hasta –15dB) en comparación con los casos de 120V (hasta –23.3dB).

- En inmuebles residenciales, la atenuación es mayor que en los comerciales con distribución de 120V. En los primeros se alcanzan potencias de recepción hasta de –25dBm, mientras que en los segundos pueden llegar hasta –16dBm. Esto se debe a que en edificaciones residenciales la electricidad se distribuye en 2 fases y con cables de menor calibre, mientras que en los comerciales la distribución se realiza en 3 fases y con cables de 250 MCM generalmente.

Espectro en redes domésticas:

- Con las pruebas realizadas se demuestra que es factible la implementación del sistema PLC en las redes de acceso final, utilizando el rango alto de frecuencias (10 a 40MHz).

Distancias máximas de transmisión:

- La medida de atenuación por metro característica de los cables eléctricos, a las frecuencias de operación de PLC, no es aplicable cuando éstos se encuentran canalizados en redes de planta interna.

- A partir de los estudios realizados, se verifica que no existe un patrón lineal de atenuación en función de la distancia, ya que esta relación depende de la cantidad de cargas conectadas en cada fase, el número de bifurcaciones, el cambio de calibre de los cables y las rutas de canalización hasta cada piso de un inmueble; así, en el último piso de un edificio la señal recibida puede presentar una potencia mayor que en un nivel inferior, según las características de la red eléctrica.

- En vista de que no existe un método de predicción de la atenuación que se presenta en cada nivel de un inmueble, es necesario realizar una caracterización sistemática en varios pisos, que arroje una tendencia en el comportamiento de la propagación de la señal.

Antigüedad de los inmuebles:

- La tendencia de pérdidas en el canal y desvanecimientos en función del número de años identificada en el apartado anterior, se debe fundamentalmente a que la calidad de los conductores y las canalizaciones empleadas anteriormente en las redes de planta interna, supera a los usados en la actualidad. El cobre utilizado en los conductores presentaba menos aleaciones, el aterramiento era óptimo y las canalizaciones se realizaban con tuberías de metal, en lugar de PVC.

IV.3. Fase 3: Medición del desempeño de enlaces PLC.

Los resultados de las pruebas de desempeño realizadas según la metodología descrita en la Fase 3 del Capítulo de Metodología, se presentan a continuación:

IV.3.1. Latencia, Disponibilidad y Pérdida de Paquetes.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las pruebas realizadas a través del comando Ping en las redes PLC de primera y segunda generación, instaladas en el Inmueble 13.

Medición de latencia, disponibilidad y pérdida de paquetes									
Día	Prueba	% Pqs. Perdidos		Latencia (ms.)					
		Red 1	Red 2	Mín.		Máx.		Media	
				Red 1	Red 2	Red 1	Red 2	Red 1	Red 2
1	1	0,6	0,2	230	100	370	300	261	145
	2	1	1,2	240	100	590	321	270	133
2	3	0,6	0,6	210	100	480	411	230	184
	4	0,8	1	220	100	360	310	220	144

Tabla #16: Resultados de medición de Latencia, Disponibilidad y Pérdida de Paquetes.

IV.3.2. Velocidad efectiva.

En este caso los resultados obtenidos de las pruebas de velocidad, realizadas a través del medidor ubicado en el sitio Web de Abeltrónica, se muestran en la siguiente tabla:

Medición de Velocidad Efectiva de Conexión					
Día	Prueba	Velocidad Efectiva Promedio (Kbps)			
		Download		Upload	
		Red 1	Red 2	Red 1	Red 2
1	1	73,79	73,21	664,45	512,5
	2	82,64	61,2	562,72	428,4
2	3	73	69,16	338	484,14
	4	76,43	72,01	376	504,1

Tabla #17: Medición de Velocidad efectiva de Conexión.

Con estos resultados se elaboran gráficos comparativos de las velocidades de subida y bajada de ambas redes, los cuales se exponen a continuación:

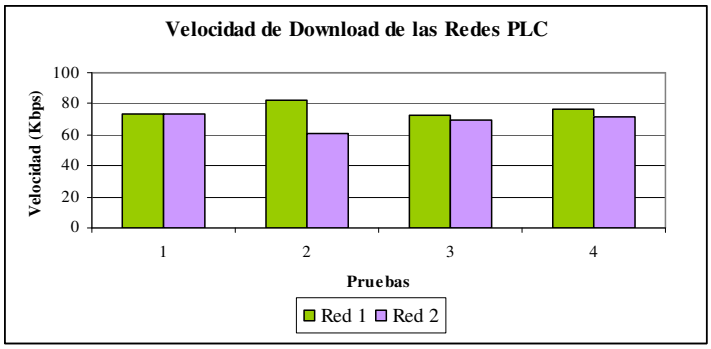


Figura #31: Velocidad de *Download* de las Redes PLC.

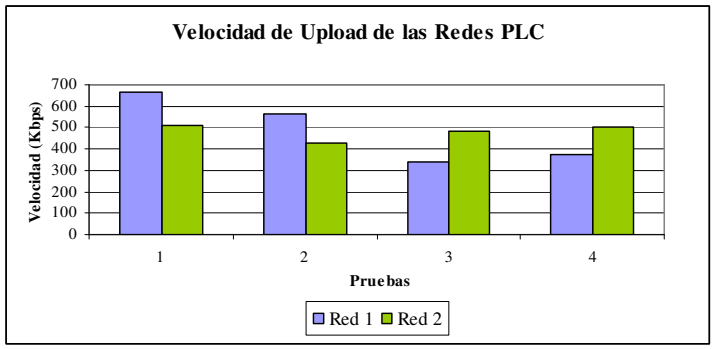


Figura #32: Velocidad de *Upload* de las Redes PLC.

IV.3.2.1. Análisis de resultados.

Latencia, Disponibilidad y Pérdida de Paquetes.

- Se observa que los valores más altos de latencia los presenta la Red de Primera Generación (hasta 590ms.), mientras que la de Segunda Generación alcanza en su valor más alto los 411ms.
- A pesar de lo anterior, la latencia media en ambas redes PLC cumple con los parámetros de funcionamiento óptimo establecidos en el Marco Referencial.
- El porcentaje de paquetes perdidos satisface en la mayoría de los casos a los valores establecidos en el Marco Referencial, sólo en un caso la Red 2 supera esta referencia en 0,2%.

Velocidad efectiva.

- En ambos casos, la velocidad de bajada (*download*) es menor que la de subida (*upload*), debido a que la primera presenta mayor demanda en horas de tráfico máximo de las redes.
- En la mayoría de las pruebas realizadas, la red de Primera Generación presenta velocidades de acceso mayores a las de la red de Segunda Generación, pero con una diferencia casi despreciable. Esto se debe a que a pesar de que el ancho de banda total disponible es el mismo (8Mbps), los ISPs son diferentes.

IV.4. Fase 4: Comparación de Tecnologías de Acceso.

IV.4.1. Medición del desempeño de la red *Ethernet* del Inmueble 13:

En la tabla que se muestra a continuación se resumen los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño de la red en cuestión, cuya metodología coincide con las de medición de desempeño de Redes PLC:

Parámetros de desempeño de la red de acceso convencional			
Latencia Promedio (ms.)	% Pqs. Perdidos	Velocidades promedio efectivas (Kbps)	
		Download	Upload
110	0,2	63	633,5

Tabla #18: Parámetros de desempeño de la red de acceso convencional.

IV.4.1.1. Análisis de Resultados.

- Los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño realizadas en la red de acceso tradicional del Inmueble 13, cumplen en su totalidad con los parámetros de referencia para el óptimo funcionamiento de la misma.

IV.4.2. Comparación del desempeño de la red *Ethernet* con los dos sistemas PLC instalados en el Inmueble 13:

El gráfico mostrado a continuación, representa una comparación entre los valores de latencia obtenidos en las dos redes PLC bajo estudio y se toma como referencia la Red de Acceso Tradicional del mencionado inmueble.

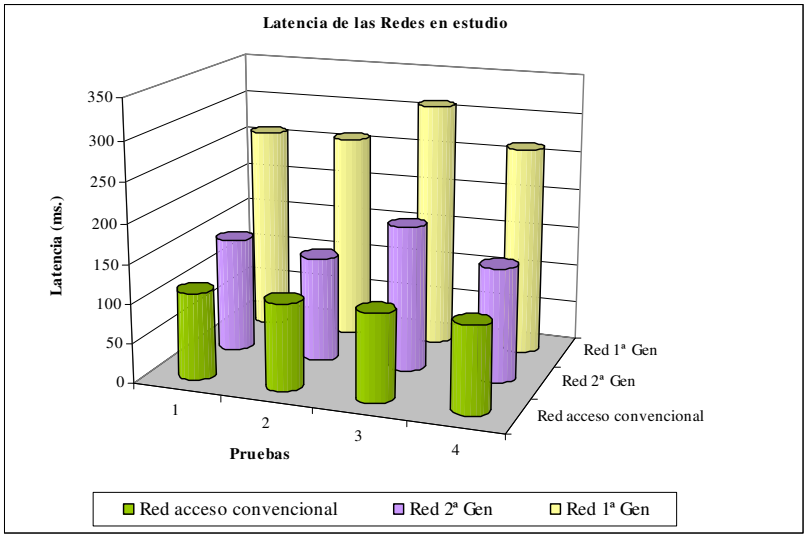


Figura #33: Latencia de las Redes en estudio.

En este caso se comparan las velocidades efectivas de conexión de las redes mencionadas. Para efectos prácticos se muestran las velocidades de acceso promedio, sin especificar los valores de subida y bajada:

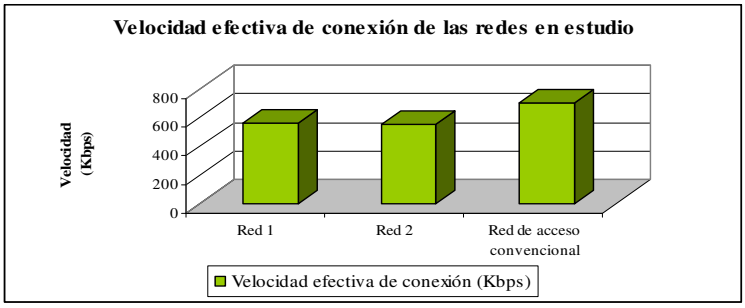


Figura #34: Velocidad efectiva de conexión de las redes en estudio.

IV.4.2.1. Análisis de resultados.

- Con respecto a la latencia, las redes PLC presentan un retardo variable y mayor que el de la red de acceso convencional.
- Las velocidades de acceso alcanzan valores mayores en la red de acceso convencional, a pesar de tener un mayor número de usuarios.
- Lo anterior se debe a que las configuraciones de las redes son diferentes. Además, el ancho total de la LAN convencional supera en 8Mbps al de las redes PLC. Una configuración adecuada de los equipos que conforman los sistemas PLC optimizaría sus capacidades y elevaría las velocidades de acceso.

IV.4.3. Comparación teórica de las características de PLC con otras tecnologías de acceso a banda ancha.

En el Apéndice F se muestra una tabla que presenta una comparación de las 6 tecnologías de acceso a banda anda ancha más comunes. Entre ellas se encuentran:

- HFC – Híbrido de Fibra y Cable.
- ADSL – Línea Digital del Suscriptor Asimétrica.
- PLC – Comunicaciones por líneas energizadas.

- WiFi – Fidelidad Inalámbrica.
- FTTH – Fibra hasta el hogar.
- 3G – Tercera generación celular.

Del mencionado cuadro, se extraen las siguientes conclusiones:

- Tal como se indica en el Marco Referencial, una de las ventajas de PLC radica en que se implementa sobre las líneas eléctricas de los inmuebles, lo que se traduce en un ahorro en los costos de instalación; pero esta no es una característica única del sistema, porque tecnologías como HFC, ADSL y 3G parten del mismo principio.
- En cuanto a velocidades de acceso el sistema FTTH se sitúa en el primer lugar ofreciendo hasta 1Gbps, seguido de PLC con velocidades de acceso de 200Mbps de la segunda generación.
- Para la instalación de ADSL es necesario el uso de filtros por cada microteléfono, para separar la señal telefónica convencional de la digital. En el caso de PLC, la señal no interfiere con la de corriente, por el uso de frecuencias separadas en el espectro.
- Los costos de instalación del servicio PLC desafían a los de ADSL, con márgenes muy estrechos de diferencia. A nivel de renta mensual PLC es el más económico (de 15 a 25$), seguido de ADSL (de 30 a 350$).
- Las distancias máximas alcanzadas por el sistema PLC compiten con las de ADSL, pero el primero ofrece velocidades mayores. Por otro lado se tiene que WiFi ofrece altas velocidades (hasta 54Mbps) pero con distancias de alcance muy cortas (100m) y con sensibilidad a interferencias externas.
- Finalmente se puede decir que las características investigadas y probadas de la tecnología de comunicación sobre líneas energizadas se corresponden con las obtenidas para la elaboración del Marco Referencial y el cuadro comparativo.

Capítulo V
Conclusiones y Recomendaciones

La elaboración del Trabajo Especial de Grado ha constituido un aporte significativo para el despliegue de la tecnología PLC en el Área Metropolitana de Caracas.

Las revisiones bibliográficas realizadas contribuyeron a la creación de un Marco Referencial sobre los fundamentos de los sistemas de comunicaciones por líneas energizadas, aplicables según la topología eléctrica existente en Venezuela.

En base al estudio de los antecedentes de implementación en otros países, se evidencia la necesidad de una caracterización del canal eléctrico, donde se analice el comportamiento de los parámetros típicos de este medio de transmisión.

La ausencia de una metodología de caracterización, conllevó al diseño de manuales que sistematizan las pruebas de factibilidad de implementación de PLC, tanto en el aspecto eléctrico como en el de desempeño de enlaces.

De las pruebas realizadas, se derivan una serie de conclusiones que se exponen a continuación.

En primer lugar, las pruebas de caracterización del ruido presente en las redes eléctricas de planta interna, comprobaron que el mismo no representa una interferencia significativa en la transmisión de señales PLC.

Posteriormente, los resultados arrojados por el estudio realizado a 13 inmuebles distribuidos en el Área Metropolitana de Caracas demostraron que es factible un despliegue de la tecnología en los casos comerciales y residenciales de esta región.

Un análisis detallado de estos resultados permite concluir que a pesar de que la implementación de PLC es 100% viable, cada locación presenta características

claramente diferenciadas que impiden la estimación de un patrón de comportamiento de los canales eléctricos.

Otro factor del que depende la transmisión satisfactoria de señales de datos por el medio eléctrico, es el cumplimiento del código eléctrico nacional en cuanto a las canalizaciones de las redes e instalaciones de dispositivos eléctricos.

En general, se puede decir que el medio de transmisión tiene un comportamiento más favorable en etapas de distribución de 480V; así como en el rango de frecuencias bajas de operación de PLC. Además, las pérdidas de potencia de la señal dependen de los cables de conexión de los equipos, el cableado y topología de la red eléctrica, las cargas conectadas a ella y la antigüedad de los inmuebles. Las pérdidas por distancia son mínimas e independientes de la cantidad de pisos entre el transmisor y el receptor, debido a que no en todos los niveles existe el mismo balance de cargas conectadas a la red eléctrica.

Los resultados de las pruebas de desempeño de la tecnología permiten concluir que la calidad del servicio de acceso a banda ancha, por medio de líneas energizadas, compite con la brindada por las redes tradicionales, ofreciendo inclusive velocidades mayores. Por otro lado, la evaluación económica en cuanto a costos de instalación y renta mensual del servicio, convierte a PLC en una nueva alternativa para los usuarios. Esto se sustenta a través del cuadro comparativo en el que se resumen las principales características de las tecnologías más difundidas de acceso a redes IP.

Por último, en el aspecto de monitoreo y gestión de un sistema PLC, se emplean los mismos fundamentos de una red *Ethernet*: estado de los nodos, disponibilidad de los enlaces, actualizaciones, congestión, entre otros. En particular el sistema de gestión observado plantea la posibilidad de monitorear la calidad del canal físico.

De la experiencia del Trabajo Especial de Grado realizado se derivan las siguientes recomendaciones:

1. Seguir las normas de seguridad para el trabajo en ambientes de baja y media tensión.

2. Llevar a cabo la caracterización del canal eléctrico como fase previa a la implementación de sistemas PLC.

3. Realizar las pruebas de factibilidad tomando en cuenta las señales recibidas en al menos 3 pisos del inmueble (comercial o residencial) de manera de obtener un comportamiento general de la red eléctrica de planta interna en cuestión.

4. Como complemento al apartado anterior, se debe realizar la prueba de espectrometría en al menos 1 apartamento o local de la edificación de interés, de manera de comprobar la viabilidad del uso del rango de frecuencias bajas o altas en el acceso final.

5. Las pruebas de caracterización del canal deben ser efectuadas en las horas de mayor uso de las redes eléctricas, debido a que se logra un dimensionamiento basado en el caso de transmisión menos favorable.

6. Los inmuebles residenciales deben poseer canalizaciones independientes hasta las premisas del usuario, así se evita la interferencia en las comunicaciones que se establecen por las líneas eléctricas (*crosstalk*).

7. En inmuebles industriales y comerciales la alimentación eléctrica para circuitos de tomacorrientes y luminarias, deben ser independientes; de esta forma se garantiza que el ruido producido por los circuitos de iluminación no interfiera con las señales PLC.

8. En caso de que la señal inyectada no sea recibida en alguno de los predios del cliente se pueden aplicar métodos que regulen las ganancias del equipo cabecera y del repetidor, además del estudio de voltajes y corrientes de fase que permitan identificar y corregir problemas de desbalance entre las cargas de la red que generen reflexiones intolerables por el sistema PLC.

9. Para una caracterización más amplia del canal eléctrico se recomienda el empleo de un analizador de espectro que permita medir el ruido presente en

los circuitos, así como almacenar un gráfico del espectro, para posteriores revisiones en caso necesario.

10. Para futuras pruebas, se recomienda el empleo de un modelo estadístico que permita una escogencia óptima de la cantidad y ubicación de los inmuebles.

11. Para certificar los enlaces de un sistema PLC implementado, es recomendable realizar un análisis de desempeño que abarque al menos 2 días consecutivos.

12. En el caso de que se desee realizar un despliegue en otras regiones del país, será necesario realizar pruebas que sustenten la factibilidad de transmisión de datos en las redes eléctricas de interés.

Bibliografía

Bilal, O; Liu, E; Gao, Y y Coronen, T. (2.003). Design of Broadband Coupling Circuits for PowerLine Communication. [http://www.isplc2004.unizar.es/OSAMA%20BILAL.pdf]. (6 Junio 2.006).

Flores, E. (2.004). Análisis de las telecomunicaciones por cable eléctrico, así como los condicionantes tecnológicos, económicos y regulatorios en países emergentes como México [Documento en línea]. Tesis de Grado, TEC de Monterrey, México. Disponible: http://www.gestionypoliticapublica.cide.edu/. (18 Noviembre 2.005).

OPERA. (2.005). Theorical postulation of PLC channel model (D4). [http://www.ist-opera.org/downloads/D4_Theoretical_Post.zip]. (6 Diciembre 2.005).

OPERA. (2.004). Reference guide on implementation, installation, management and operation of PLC distribution networks (D10). [http://www.ist-opera.org/downloads/D10/D10_Reference_Guide_Optimization.pdf]. (22 Noviembre 2.005).

OPERA. (2.004). Report of channel measurement campaigns (D3). [http://www.ist-opera.org/downloads/D3_Channel_Measurments.zip]. (22 Noviembre 2.005).

REDUNO. (2.006). Metodología para la medición de latencia y pérdida en la red IP. [http://200.33.150.85:8080/idx_metodologia.php]. (29 Mayo 2.006).

Soriano, J; De Quesada, R y Maroni, P. Disponibilidad de la red. [http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_4/instalac/cliente/dispon.htm]. (30 Mayo 2.006).

Zona Gratuita. (2.006). Ping y Tracert. [http://www.zonagratuita.com/a-cursos/hacking/Ping.htm]. (29 Mayo 2.006).

APÉNDICE A

Manual para la medición de parámetros característicos del canal eléctrico LV.

DESCRIPCIÓN

Las fases para la realización de las pruebas, caracterización del canal e implementación de la tecnología de comunicaciones sobre líneas energizadas se representan en el siguiente diagrama de bloques:

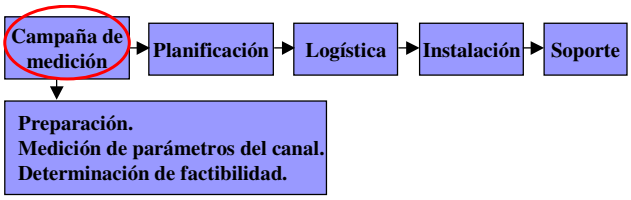


Figura #1. Etapas de implementación del sistema BPL.

La etapa de interés en este caso es la Campaña de Medición, que contempla la medición de los parámetros que caracterizan el canal eléctrico de las zonas e inmuebles escogidos, a fin de determinar la factibilidad técnica de instalación de la tecnología.

Este conjunto de pruebas previas tienen como finalidad lo siguiente:

- Evitar la inversión de tiempo y dinero en canales eléctricos no idóneos para la implantación de la tecnología.
- Lograr un funcionamiento óptimo del sistema PLC, con configuraciones acordes a los resultados de los parámetros medidos.

PREPARACIÓN

1. Seleccionar el área de realización de las pruebas.
2. Determinar la muestra de inmuebles representativa dentro del área de pruebas seleccionada.
3. Obtener los mapas de topología de la red eléctrica LV del área y los inmuebles escogidos.
4. Preparar el equipamiento requerido, especificado en este manual.
5. Determinar la ubicación tanto de los puntos origen y destino de la red Ethernet del inmueble, como de los equipos transmisores y receptores de las pruebas, de acuerdo a los lugares de interés para la posterior instalación de equipos PLC y según las referencias indicadas en este manual.
6. Preparar las planillas a ser llenadas durante las pruebas de medición.
7. Diseñar el cronograma de las mediciones según el tiempo efectivo de trabajo necesario.
8. Organizar al personal correspondiente según el cronograma diseñado.
9. Considerar las siguientes normas de seguridad:

- Si se trabaja sobre dispositivos energizados en baja tensión (LV), es necesario utilizar los instrumentos mencionados a continuación:
  - Guantes de MV y LV.
  - Mantas de MV y LV.
  - Herramientas Aisladas.
  - Calzado y casco de Seguridad.
  - Mangas de Goma de Alta Tensión.
  - Visor de seguridad.

Figura #2. Guantes

Figura #3. Cascos

Figura #4. Visor

- No trabajar en zonas húmedas.
- Si se trabaja en sótanos:
  - Verificar con un explosímetro la ausencia de gases inflamables.

Figura #5. Explosímetro

  - Verificar ausencia de tensión.

- Haber recibido cursos previos de seguridad para trabajar en áreas bajo tensión.

Actividad	Días				
	1	2	3	4	5
Seleccionar área de las pruebas	■				
Determinar muestra de inmuebles	■				
Obtener mapas de topología eléctrica	■				
Preparar equipamiento requerido	■				
Determinar la ubicación de Tx y Rx según topología	■				
Preparar las planillas para almacenar resultados		■			
Coordinar el equipo de trabajo y cuadrillas de apoyo		■			
Considerar las normas y equipamiento de seguridad		■			
Realización de pruebas en un inmueble			■		

Tabla #1. Tiempo estimado para la caracterización del canal PL de un inmueble.

REFERENCIAS

Las referencias de las pruebas son:

1. **DISTANCIAS**

   En interiores (*indoor*): Distancias menores a 60 metros de cableado interno LV.
   Se realizan las pruebas de recepción con el transmisor en el punto donde se desea inyectar la señal de datos y el receptor a distancias de 20, 40 y 60 metros desde dicho punto.
   En exteriores (*outdoor*): Distancias de 60 a 350 metros de cableado externo LV. Las pruebas son similares a las anteriores, con el receptor en distancias de referencia de 150, 250 y 350 metros desde el punto de inyección.

2. **POTENCIAS**

- Cada una de las pruebas, *Indoor* y *Outdoor* se harán en el rango de potencia desde la mínima hasta la máxima suministrada por el equipo transmisor.

3. FRECUENCIA

Las pruebas se realizarán en la banda de frecuencias de 1MHz a 40 MHz, configurando el transmisor para transmitir una señal centrada en 20Mhz, con 40Mhz de ancho de banda.

4. RESULTADOS

Las consideraciones sobre factibilidad deberán realizarse según los resultados de los peores escenarios encontrados en la realización de las mediciones.

Las mediciones se deben hacer en ambos sentidos del enlace, cada una a las distancias, potencias y frecuencia especificadas, lo que resulta un total de 18 mediciones *Indoor* y 18 mediciones *Outdoor* (tres distancias de referencia a tres valores de potencia, en ambos sentidos del enlace) para cada parámetro del canal.

MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL CANAL

Los parámetros a ser medidos se mencionan a continuación:

1. Atenuación.
2. Desvanecimiento selectivo en frecuencia.
3. Nivel de ruido (*burst noise* o ruido ráfaga).
4. Coeficiente de reflexión o relación de onda estacionaria (ROE).

Los resultados de cada medición deben ser almacenados en los archivos de la memoria del Analizador de Espectro y en las planillas diseñadas para la sistematización de las pruebas.

1. ATENUACIÓN

1.1. Definición:

La atenuación es la cantidad de potencia que pierde una señal a lo largo de su recorrido a través de un canal, se define matemáticamente como sigue:

$$A(f) = 10 \log_{10} (P_{av}(f) / P_2(f)) \text{ (dB)}$$

Con:

Pav(f): potencia de entrada, de la fuente.

P2(f): potencia en el puerto 2, en la salida.

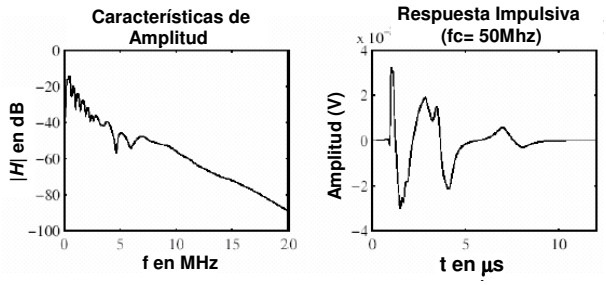


Figura #6. Características de amplitud y respuesta impulsiva del medio eléctrico LV.

En la gráfica anterior puede observarse la característica pasa bajo del medio eléctrico. La atenuación aumenta significativamente con la frecuencia. La respuesta impulsiva del canal es una secuencia de pulsos con distancias, amplitudes y polaridades aleatorias.

Las mediciones de atenuación en el canal deben conllevar a definir, además, la distancia máxima de propagación de la señal en el medio antes de requerir la instalación de un repetidor BPL.

1.2. Equipamiento requerido:

De acuerdo a la Alianza Europea de Investigación Abierta de PLC (OPERA), los equipos a colocar en el lado transmisor son:

- Analizador de espectro.
- Elementos acopladores.
- Acoplador a líneas eléctricas.
- Cocodrilos aislados para conexiones.

En el lado receptor:

- Acoplador a líneas eléctricas.
- Analizador de espectro con módulo de memoria para almacenar data.

1.3. Medición:

- Para la medición de atenuación se coloca un generador de señales, en el punto de la red donde se desearía inyectar la señal de datos del sistema BPL, tal como lo indica la siguiente figura. Esto se realiza generalmente en el tablero principal del cuarto eléctrico del inmueble, en 2 fases del circuito.

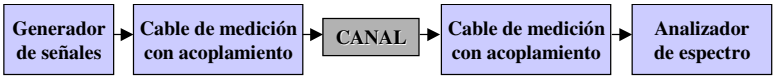


Figura #7. Esquema de instalación de equipos Transmisor y Receptor para medición de parámetros.

- Tanto el generador como el receptor deben estar acoplados (acopladores de PL) al medio eléctrico para evitar reflexiones, por esto la existencia de cables de medición con acoplamiento.
- Los equipos deben contar con una etapa de atenuación que los proteja del alto voltaje, usualmente esto se encuentra internamente en cada uno de ellos.
- Colocar en el punto de recepción el analizador de espectro. Este punto comúnmente es un tablero principal de un piso o un apartamento del inmueble.
- En este punto se debe captar la señal transmitida, para lo cual el equipo receptor debe estar configurado a la misma frecuencia de la misma o realice un barrido del espectro (1 a 40MHz).
- Variar el nivel de potencia de transmisión de ser necesario.
- Almacenar las imágenes de las señales recibidas en la memoria del equipo receptor.

2. DESVANECIMIENTO SELECTIVO EN FRECUENCIA

2.1. Definición:

Se define como la atenuación máxima de la señal a determinadas frecuencias.

2.2. Medición:

Este parámetro es deducible de los resultados de la medición de atenuación, generalmente similares a los de la figura #6, puesto que el desvanecimiento estará representado por los puntos máximos de atenuación que sufre la señal a frecuencias específicas. Estas frecuencias deberán ser excluidas de los canales de operación de los sistemas PLC.

3. NIVEL DE RUIDO

3.1. Definición:

El ruido es una señal indeseable en los canales de transmisión. En el caso de líneas de corriente existen varias fuentes de ruido, entre las cuales se encuentran: equipos que se conectan y desconectan de los tomacorrientes, generadores, motores eléctricos, entre otros.

El ruido en el canal PL es totalmente variable y aleatorio; por lo que no tiene un modelo único. Pueden encontrarse diversos tipos, pero el de mayor interés para líneas energizadas es el ruido ráfaga o *Burst Noise*.

El aspecto de este ruido es similar al que muestra la siguiente figura:

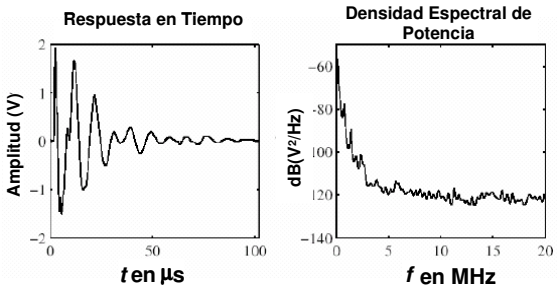


Figura #8. Características del ruido ráfaga.

3.2. Equipamiento requerido:

(1) Medición de ruido característico del canal (transmisor apagado):

- Acoplador a líneas eléctricas.
- Analizador de espectro con módulo de memoria para almacenar data.

(2) Medición de ruido empleando un generador de ruido aleatorio:

- Generador de ruido aleatorio.
- Acoplador a líneas eléctricas.
- Cocodrilos aislados para conexiones.

En el lado receptor:

- Acoplador a líneas eléctricas.
- Analizador de espectro con módulo de memoria para almacenar data.

3.3. Medición:

- La medición del ruido en el canal eléctrico se hará de dos maneras:

(1) Con el transmisor apagado, se mide en el receptor (analizador de espectro) el ruido presente en el canal sin transmisión de datos, generalmente entre 1.5 y 10 Mhz.
(2) Con un generador de ruido *random* en un punto, se mide en otro punto la señal de salida en el mismo ancho de banda, a la potencia máxima del generador.

- Repetir las pruebas a las 6 distancias de referencia especificadas, lo que resulta un total de 12 mediciones.
- Obtener la potencia promedio del ruido detectado en el receptor en todos los casos medidos (según las referencias de distancias), indicada en uno de los parámetros medidos por el analizador de espectro.
- Almacenar los resultados.

3. RELACIÓN SEÑAL A RUIDO (S/R)

4.1. Definición:

La relación Señal a Ruido, medida en dB (decibeles), permite definir el grado de robustez del sistema ante el ruido del canal. Su definición matemática es la siguiente:

$$SNR(f) = P_{nav} - A(f) - N(f) \text{ (dB)}$$

Con:

Pnav: potencia de entrada en dBm.
A(f): atenuación del canal.
N(f): ruido en dBm.

El valor de referencia de este parámetro lo define el diseño del sistema PLC y las especificaciones de los equipos utilizados en su implementación.

4.2. Medición:

- Tomar el resultado de las mediciones del apartado (1).
- El factor S/R es uno de los parámetros medidos por el analizador de espectro.
- En caso de no poder ser medido directamente, puede calcularse mediante la ecuación anterior o con el cociente de potencia recibida entre potencia del ruido en dB.

5. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN (VSWR)

5.1. Definición:

Indica la cantidad de impedancia que se acopla y el grado de reflexión de la señal transmitida. En las redes eléctricas el grado de reflexión es alto debido a los continuos cambios en las características del cableado y el uso aleatorio de los tomacorrientes. Puede tomarse como referencia lo siguiente: ROE = 1 es muy bueno, ROE= 4 es muy malo.

5.2. Equipamiento requerido:

- Analizador de Espectro o Medidor de ROE en el lado receptor, bajo el mismo esquema de los casos anteriores.

5.3. Medición:

- En ambos casos, los equipos indican el parámetro ROE directamente, el cual debe ser registrado en las planillas de mediciones de canal.

DETERMINACIÓN DE FACTIBILIDAD

La instalación de un sistema PLC será factible según los resultados arrojados por las mediciones anteriores:

4. La mínima potencia de recepción la determinan las especificaciones técnicas del equipo PLC, en el parámetro de "sensibilidad". Si la potencia de recepción es menor que la sensibilidad de los equipos PLC, no es factible la instalación del sistema.
5. El resultado de la medición del parámetro Relación Señal a Ruido indica si los equipos PLC garantizan el funcionamiento del sistema ante la presencia de ruido. Se debe comparar el resultado obtenido con las especificaciones técnicas de los equipos.
6. La banda de operación del sistema no debe coincidir con ninguno de los rangos de desvanecimiento selectivo en frecuencia identificados en el apartado (2) de parámetros medidos.
7. Se debe colocar un equipo repetidor PLC antes de superar la distancia máxima de transmisión, es decir, antes de que la señal se pierda por la atenuación.
8. Un buen canal de comunicaciones debe tener un coeficiente de reflexión o ROE entre 1 y 2. Puede ocurrir que el coeficiente sea mayor y el sistema PLC funcione, ya que ciertos equipos superan este inconveniente. Lo ideal es buscar un compromiso entre los parámetros del canal según el diseño del sistema y las prestaciones que de éste se esperan.

APÉNDICE B

Característica de atenuación en cables de medición.

1. OBJETIVO.

Obtener los valores de atenuación en función de la frecuencia, de los cables con acoplamiento capacitivo e inductivo, usados en la medición de canales eléctricos, para implementación de la tecnología PLC.

2. CABLE CON ACOPLAMIENTO CAPACITIVO.

El acoplador capacitivo es una unidad que se utiliza para inyectar y recibir la señal de datos, mediante acoplamiento capacitivo. Tiene las siguientes especificaciones.

Parámetros		Especificaciones
1	Voltaje	Máximo 420VAC
2	Frecuencia de la línea	45 a 65Hz.
3	Resistencia a picos	3000A (8/20 µsg)

Tabla #1: Especificaciones del acoplador capacitivo.

A este acoplador se le adapto a un cable RG-58 para medir los parámetros de la línea eléctrica mediante el analizador de espectro. Este se muestra en la siguiente figura:

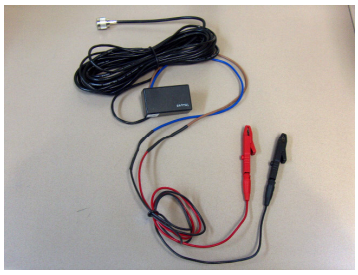


Figura #1: Cable con acoplamiento capacitivo.

A este cable se le realizaron pruebas en el laboratorio con la finalidad de medir su atenuación y tener este valor de pérdidas en la pruebas de caracterización del canal eléctrico. El experimento consistió en la inyección de una señal de potencia 0dBm (-30dB), con impedancia de 50Ω y a través de un voltímetro analógico se medió la señal a la salida en mV.
Se eligió este valor de potencia a la entrada ya que está en el rango de potencia que genera el equipo de cabecera de PLC, que va de 0dBm a –16.89dBm que corresponde a valores entre 1 y 50mW.
Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla, los cuales permitieron la realización de la gráfica mostrada posteriormente.

Frecuencia (MHz)	Atenuación (dB)
1.6	-13.36
9.5	-2.38
15	-4.71
25	-9.37
35	-12.18

Tabla #2: Valores de atenuación del cable con acoplamiento capacitivo.

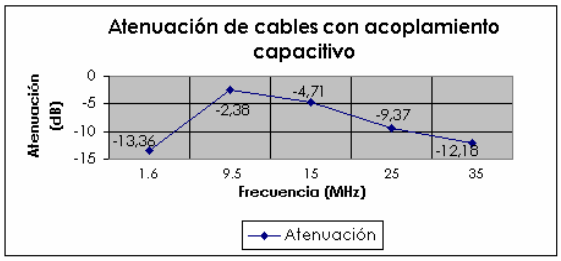


Figura #2: Gráfico de atenuación vs. Frecuencia del cable con acoplamiento capacitivo.

De la tabla y la gráfica mostradas se concluye que la frecuencia de 9.5MHz es de resonancia para el condensador del acoplador, ya que en dicho valor de frecuencia se obtienen muy bajas pérdidas.

3. CABLE CON ACOPLAMIENTO INDUCTIVO.

El acoplador inductivo es una unidad que se utiliza para inyectar y recibir la señal PLC, mediante este método de acoplamiento. Tiene las siguientes especificaciones.

Parámetros		Especificaciones
1	**Corriente de línea**	Máximo 18A.
2	**Frecuencia de la línea**	50/60Hz.
3	**Voltaje de la línea**	100VAC a 400VAC

Tabla #3: Especificaciones del acoplador inductivo.

Al igual que en el caso anterior, a este acoplador se le adapto a un cable RG-58 para medir los parámetros de la línea eléctrica mediante el analizador de espectro. La pruebas son iguales a las descritas en el punto anterior, inyectando así una potencia a la entrada de 0dBm con una impedancia de 50Ω. El cable bajo prueba es el siguiente:

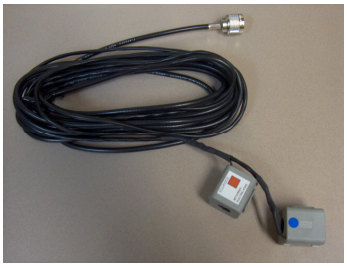


Figura #3: Cable con acoplamiento inductivo.

Apegados al objetivo de esta actividad, los valores de atenuación arrojados en función de la frecuencia son los mostrados a continuación:

Frecuencia (MHz)	Atenuación (dB)
1.6	-26.5
15	-6
25	-9
35	-12

Tabla #4: Especificaciones del acoplador inductivo.

Al tabular los datos, se expresan gráficamente de la siguiente forma:

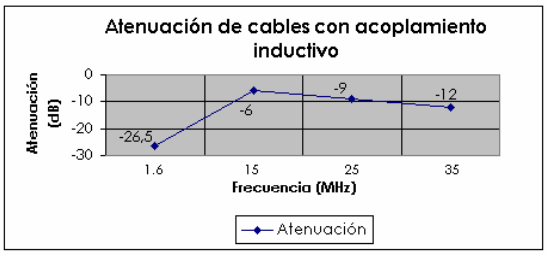


Figura #4: Gráfico de atenuación vs. Frecuencia de cables con acoplamiento inductivo.

Esta gráfica es similar a la que se muestra en las especificaciones técnicas de la unidad, como sigue:

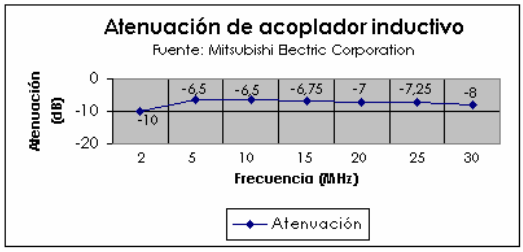


Figura #5: Gráfica de atenuación vs. frecuencia. Fuente: Mitsubishi Electric Corporation

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

1. La gráfica obtenida del cable con acoplamiento inductivo es similar a la suministrada por el fabricante Mitsubishi Electric Corporation, pero con una diferencia, debido a que la primera se realiza en un rango un poco más amplio y además el acoplador tenía incorporado el cable RG-58 que tiene una distancia considerable (aprox. 3metros) lo que introduce pérdidas adicionales.

5. CONCLUSIONES

- Los valores obtenidos se reflejan en la atenuación total que presenta la señal medida y observada en el analizador de espectro, lo que lleva a que este valor se le resten los mostrados en las tablas anteriores.
- El acoplador capacitivo presenta una frecuencia de resonancia, ubicada en 9.5MHz.
- El cable con acoplamiento inductivo arroja pérdidas mayores a las del capacitivo en el rango de interés.
- Se recomienda sustituir los cables por otros fabricados por alguna empresa especialista en el área, que tengan mejor calidad de empalme y use otro tipo de cable, introduciendo así menor atenuación.

APÉNDICE C

Piloto de Tecnología PLC en el Auditorio del Inmueble 13.

1. OBJETIVO:

Implementar la tecnología PLC en el auditorio del Inmueble 13.

2. METODLOGÍA:

2.1. ELABORACIÓN DE ACOPLADORES INDUCTIVOS:

Se procedió a adaptar unos acopladores inductivos que trabajan en un ancho de banda de 2 a 40MHz, haciéndole una espira de alambre, el cual esta recubierto de un barniz aislante. Este cable, llamado también cable con datos o *Módem Winding*, es el que lleva la señal de datos de 480VAC hasta el equipo repetidor.

La figura siguiente muestra lo descrito anteriormente:

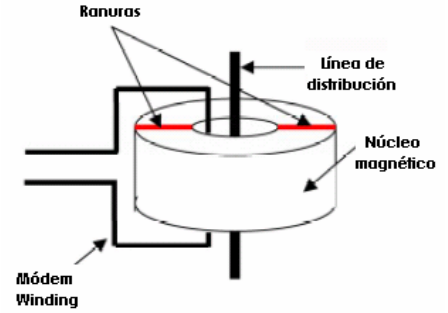


Figura #1: Estructura de un acoplador inductivo.

La especificaciones de la bobina utilizada, se muestran en la siguiente tabla.

CARACTERÍSTICA	
Modelo del acoplador	Clamp Coupler
Código	25/100/21 – C / 03.04
Tipo de cable soportado	Cable de voltaje con aislamiento AC 24KV.
Banda de frecuencia	2.0 a 40MHz.
Voltaje	500 Voltios AC DC 60Hz 200V.
Corriente	300 Amp.
Temperatura	40ºC.

Tabla #1: Especificaciones del acoplador inductivo fabricado.

2.2. MEDICIONES EN EL CUARTO ELÉCTRICO #1:

Se hizo una medición de las características del canal eléctrico, en el cuarto eléctrico #1, que es el ubicado entre las entradas del auditorio. Este se muestra a continuación:

Figuras #2-3: Cuarto eléctrico del auditorio.

Al realizar la medición se midieron los parámetros de potencia de la señal (dBm) y relación señal a ruido. Para esto se conectó un cable con acoplamiento capacitivo, a través de unos caimanes. Los valores obtenidos se encuentran en la tabla siguiente:

CANAL	POTENCIA (dBm)	RELACIÓN S/N
UL12	-45	62
UI5	-36	38
DI6	-37	40
DI12	-42	34
DI13	-42	35
DI14	-38	35

Tabla #2: Valores de potencia y relación señal a ruido con acoplamiento capacitivo - 480VAC.

A pesar de que estos resultados son bastante satisfactorios, se descarta hacer la inyección / extracción de la señal en este punto, porque este tablero no alimenta al tomacorriente deseado. Por esta razón se hicieron las pruebas previas del canal en el cuarto eléctrico #2, que se encuentra adyacente al ascensor ejecutivo.

La distribución de los cuartos eléctricos y el tomacorriente mencionado, se muestra en la figura a continuación:

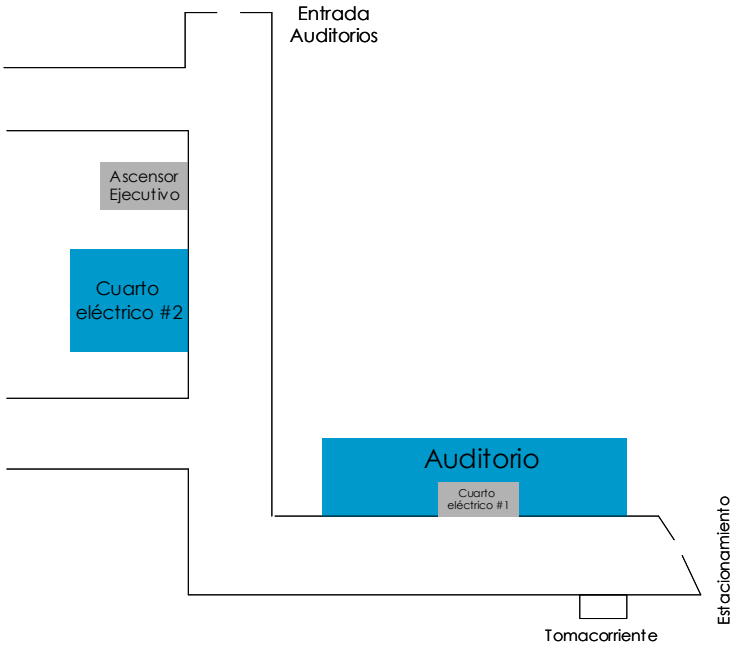


Figura #4: Plano de distribución de los cuartos eléctricos 1 y 2

2.3. MEDICIONES EN EL CUARTO ELÉCTRICO #2:

Se procedió a hacer las mediciones previas del canal, con el fin de verificar su factibilidad como medio de comunicaciones digitales.

Se conectaron a las fases 1 y 3 (marrón y amarilla) del Tablero de Alta Tensión (TAP2) del nivel de interés, los caimanes que tienen el cable con acoplamiento capacitivo y de aquí al analizador de espectro.
Los resultados obtenidos son los siguientes:

CANAL	POTENCIA (dBm)	RELACIÓN S/N
UL5	-31	40
DL6	-30	>41
DL12	-34	39
UL13	-34	38
DL14	-34	>36
UL7	-37	38
DL8	-36	37

Tabla #3: Valores de potencia y relación señal a ruido con acoplamiento capacitivo - 480VAC.

Los valores mostrados, no resultan ser mejores a los obtenidos en la medición del cuarto eléctrico #1, pero son tolerables por el nivel de sensibilidad de los equipos, por lo que se procedió a hacer la implementación de la tecnología en este punto.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PLC:

Para llevar la señal de datos hasta el tomacorriente que se muestra en la figura #4, en primer lugar se colocaron las bobinas en las fases 1 y 3 del tablero principal de 480V (TAP2), de manera de extraer la señal de datos que inyecta el equipo de cabecera, ubicado en el tablero principal de uno de los sótanos; y se midieron nuevamente los parámetros de potencia y relación señal a ruido de dicha señal:

CANAL	POTENCIA (dBm)	RELACIÓN S/N
UL5	-37	>44
DL6	-36	42
DL12	-44	>37
UL13	-44	36
DL14	-43	>36

Tabla #4: Valores de potencia y relación señal a ruido con acoplamiento inductivo - 480VAC.

Las potencias mostradas resultaron ser menores que las medidas anteriormente, pero tolerables; esto indica que se obtienen mayores pérdidas con el acoplador inductivo fabricado, que con el capacitivo.
Finalmente a estas bobinas se les colocó en el extremo libre un conector DB9 macho, para su conexión con el equipo repetidor. Luego se procedió a realizar el puente (*bypass*)del transformador de voltaje como se muestra a continuación, para llevar la señal de datos al circuito en 120V que se deseaba, en este caso estaba presente en el tablero de baja tensión (TBP2).

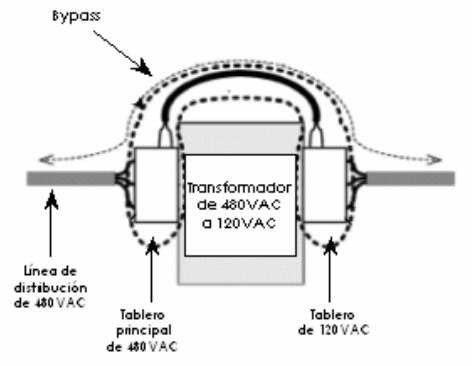
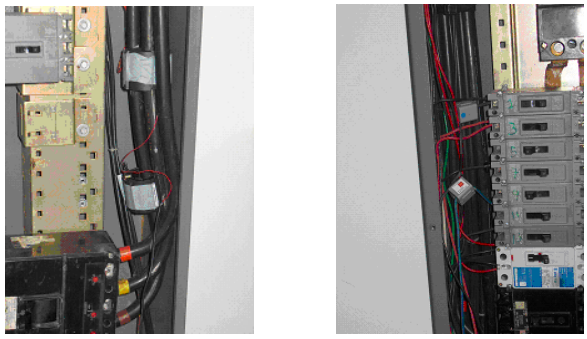


Figura #5: Esquema del *bypass*.

El objetivo de este procedimiento (puenteo o *bypass*) es evitar el paso de la señal por el transformador de 480VAC a 120VAC, ya que este es un elemento que atenúa la señal, impidiendo que llegue con suficiente potencia de recepción. Esto se logra a través del equipo repetidor utilizado.

En las figuras siguientes se muestran: el tablero principal de 480VAC y el de 120VAC, que es donde se recoge y se inyecta la señal de datos, respectivamente, con los acopladores inductivos. En el caso que nos ocupa la inyección se hizo en el circuito número 1 en el tablero de baja tensión (TBP2).



Figuras #6-7: Acopladores inductivos en 480VAC y 120VAC.

Luego de esto se conectó un módem o CPE (*Client Premises Equipment*) en el tomacorriente deseado (ver figura siguiente), para verificar que la señal de datos llegaba y este equipo lograra el enlace (o *link*) con el repetidor. Esto llevó a probar en varios tomacorrientes, resultando estar presente en los circuitos 1, 3 y 4 del Tablero de Baja Tensión (TBP2), a pesar de haberla inyectado sólo en el circuito 1.

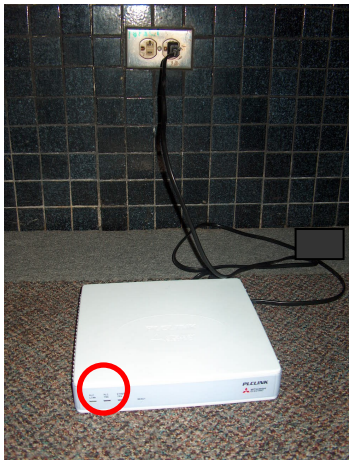


Figura #8: Conexión del Módem.

En el tomacorriente deseado, los parámetros medidos son los siguientes:

CANAL	POTENCIA (dBm)	RELACIÓN S/N
DI13	-35	>42
UI14	-34	>44
DI12	-43	>37
DI10	-40	>39

Tabla #5: Valores de potencia y relación señal a ruido con acoplamiento inductivo – 480VAC.

Es importante mencionar que en este caso los canales medidos, son diferentes a los medidos en los casos previos, ya que el módem y el repetidor trabajan en el link 2; a diferencia del equipo de cabecera y el repetidor que pueden trabajar en cualquier otra banda de frecuencia, en este caso se usó el link 12-14. Las bandas de transmisión mencionadas manejan las siguientes frecuencias:

Tipo de tarjeta PLC	Link	Upstream		Downstream	
		Inicio (MHz)	Fin (MHz)	Inicio (MHz)	Fin (MHz)
Link 2	**Link 2**	13.800	16.300	19.000	22.800
Link 12/14	**Link 12**	2.015	4.515	5.530	8.030
	Link 14	2.000	4.500	5.520	9.220

Tabla #6: Frecuencias de trabajo de los link PLC.

La conexión con el repetidor que se instaló en el cuarto eléctrico del nivel AP2 es la siguiente:

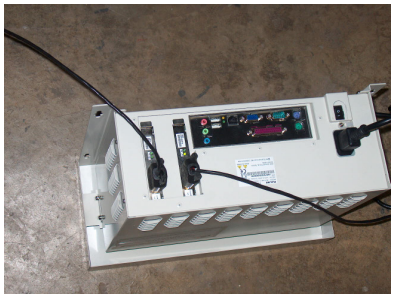


Figura #9: Conexión con el repetidor en 480VAC – 120VAC.

APÉNDICE D

Manual para la medición del desempeño de enlaces PLC

1. Descripción

El presente manual contiene las instrucciones necesarias para realizar las mediciones de ciertos parámetros que permitan medir el desempeño de un enlace PLC.

2. Objetivo

Presentar una guía que permita certificar la operatividad de un sistema PLC.

3. Metodología

Las pruebas de disponibilidad, latencia, pérdida de paquetes y velocidad efectiva de la conexión, deberán realizarse a las horas de mayor tráfico en la red y por dos días consecutivos, como se indica en cada caso.

3.1 Medición de disponibilidad, latencia y pérdida de paquetes:

Para esta prueba se necesitan dos terminales del sistema PLC, disponibles durante dos días consecutivos. Las siguientes instrucciones deberán ejecutarse durante las hora de mayor tráfico en la mañana y la horas de mayor tráfico en la tarde de cada día:

- Escoja dos (2) terminales que posean acceso al sistema PLC.
- Desde los terminales, abra la ventana de comandos de Windows “cmd”.
- Identifique las direcciones IP (*Internet Protocol*) de los terminales escogidos, bien sea por las propiedades de la Conexión de Red o ejecutando *ipconfig* desde la ventana de comandos del sistema operativo.
- Ejecute el comando *ping* utilizando la dirección IP del segundo terminal, con una cantidad de 500 peticiones, de 65500 bits de tamaño y 128 ms. de TTL:

ping –n 500 –l 65500 –i 128 (Dir IP 2)

La ejecución del *ping* aparecerá de la siguiente forma:

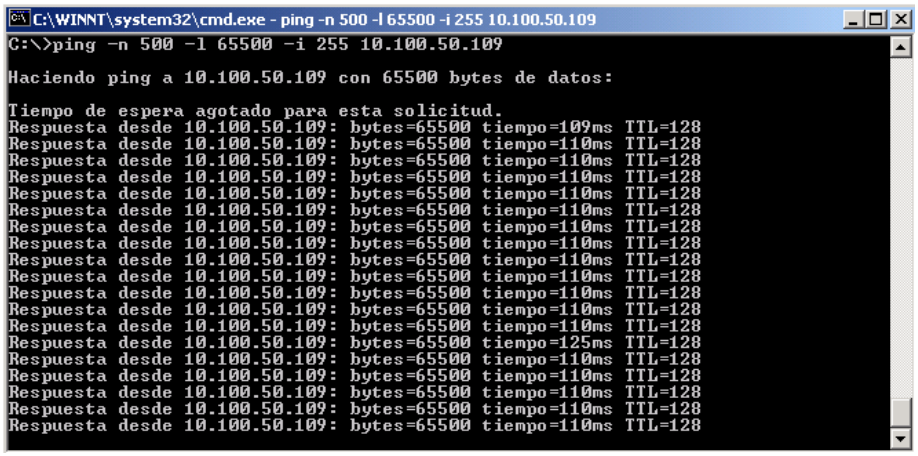


Figura #1: Ejecución del *ping* desde la ventana de comandos de Windows.

- Espere hasta que la instrucción haya finalizado.
- Aparecerán una serie de resultados como en el ejemplo que se muestra en la figura siguiente:

```
Estadísticas de ping para 10.100.50.109:
    Paquetes: enviados = 500, recibidos = 499, perdidos = 1 (0% perdidos),
Tiempos aproximados de recorrido redondo en milisegundos:
    mínimo = 109ms, máximo =  125ms, promedio =  109ms
```

Figura #2: Resultados del *ping* desde la ventana de comandos de Windows.

- Almacene estos resultados en la planilla diseñada para tal efecto, que se muestra a continuación:

PLANILLA DE ALMACENAMIENTO DE PARÁMETROS DE DESMPEÑO DE ENLACES PLC												
Responsable de las Pruebas:												
Dirección del Inmueble:												
							Fechas:	Día 1		Día 2		
Medición de Latencia, Pérdida de Paquetes y Disponibilidad												
Día	**Prueba**	**Hora**	**IP Tx**	**IP Rx**	**Parámetros de Tx**			**Resultados**				
					Nº Pqs.	Tamaño (Bytes)	TTL (ms)	Pqs. Recibidos	% Pqs. Perdidos	***Latencia (ms)***		
										Mín	Máx	Media
1	1	Mañana:			500	65500	128					
	2	Tarde:										
2	3	Mañana:										
	4	Tarde:										
Observaciones:												
Medición de Velocidad Efectiva de la Conexión												
Día	**Prueba**	**Hora**	**Servidor**	**Velocidad Máx. (Kbps)**		**Velocidad Mín. (Kbps)**		**Velocidad Efectiva Promedio (Kbps)**				
				Upload	Download	Upload	Download	Upload	Download			
1	1,2,3	Mañana:										
	4,5,6	Tarde:										
2	7,8,9	Mañana:										
	10,11,12	Tarde:										
Observaciones:												
Parámetros de Certificación												
Disponibilidad		**Latencia (ms)**		**% Pqs. Perdidos**		**Velocidad de Conexión (Kbps)**						
Esperada	Real	Esperada	Real	Esperado	Real	***Configurada***		***Efectiva Promedio***				
						Upload	Download	Upload	Download			
≥ 99.99 %		≤ 200		0,1								
ENLACE PLC CERTIFICADO:				**SI**			**NO**					

Tabla #1: Formato para la medición del desempeño de la red.

3.2 Medición de la velocidad efectiva de la conexión:

Una vez que la red PLC se encuentre activa y configurada para la salida a Internet, siga los siguientes pasos para determinar la velocidad efectiva de conexión:

- Repita estas pruebas tres veces, por cada hora en la que se estima el mayor tráfico de la red PLC durante la mañana y la tarde, por dos días consecutivos, como se muestra en el siguiente cuadro:

Pruebas	Día	Hora de mayor tráfico
1,2,3	1	Mañana
4,5,6		Tarde
7,8,9	2	Mañana
10,11,12		Tarde

Tabla #2: Plan de mediciones.

- Desde uno de los terminales de la red PLC, abra el buscador en Internet disponible.
- Si el equipo posee un programa que impide la apertura de ventanas emergentes, desactívelo.
- Acceda a la página web: http://www.abeltronica.com/velocimetro/pt/?idioma=es&newlang=es
- Seguidamente, usted verá la siguiente imagen:

Figura #3: Interfaz del Velocímetro de A BELTRÓNICA.

- Seleccione un país de Latinoamérica en el menú desplegable.
- Presione el botón “PRUEBE AHORA”, ubicado en la parte inferior.
- Espere el resultado de la prueba.
- Repita el procedimiento tres veces, de la manera indicada anteriormente.
- Al hacer las pruebas, se debe haber desplegado una ventana emergente de “Informe”, con las Tablas de las mediciones realizadas. Un ejemplo es mostrado a continuación:

Informe

Tabla de mediciones

PRUEBA Nº	FECHA / HORA	IP USUARIO	SELECCIONADO	DOWNLOAD		UPLOAD	
				KBps	Kbps	KBps	Kbps
1	13-06-2006 08:05:06	200.1.15.16	Argentina	16.60	**132.80**	151.14	**1209.12**
2	13-06-2006 08:52:54	200.1.15.16	Argentina	17.21	**137.68**	122.69	**981.52**
3	13-06-2006 08:54:00	200.1.15.16	Venezuela	12.03	**96.24**	122.16	**977.28**
4	13-06-2006 09:13:23	200.1.15.16	Venezuela	14.91	**119.28**	31.92	**255.36**

Gráfico de las mediciones
(Valores en kbps)

Figura #4: Ventana emergente con el informe de las mediciones.

- Almacene los resultados siguiendo el procedimiento de envío del Informe a un correo electrónico, ubicado en la parte inferior de la misma ventana. Introduzca la dirección de correo indicada por el coordinador de las pruebas.
- Complete los recuadros de la planilla anexada, correspondientes a las pruebas de velocidad.

4. Resultados

Los resultados obtenidos serán aceptables según las siguientes referencias:

Parámetro	Valor Esperado
Disponibilidad	≥ 99.999 %
Latencia	≤ 200 ms.
% Paquetes Perdidos	0,1
Velocidad Mínima de *Upload*	Depende de la configuración de las velocidades
Velocidad Mínima de *Download*	

Tabla #3: Valores aceptables para un enlace PLC.

APÉNDICE E

Formato de mediciones de parámetros del canal eléctrico.

FORMATO MEDICIÓN DE PARÁMETROS DEL CANAL ELÉCTRICO			
Campo	**Resultados/Observaciones**		
General			
Lugar, fecha y hora de medición			
Antigüedad del inmueble			
Cantidad de pisos en el inmueble			
Medición realizada por			
Distancia entre transmisor y receptor			
Voltaje			
Georeferencia			
Número de medidor			
Transmisor			
Tipo de equipo	HeadEnd ☐	Repeater ☐	Generador de ruido ☐
Ubicación			
Fase			
Acoplamiento			
Corriente de fase	1-neutro:	2-neutro:	3-neutro:
Voltaje de línea	1-2:	2-3:	1-3:
Voltaje de fase	1-neutro:	2-neutro:	3-neutro:
Receptor			
Tipo de equipo	Repeater ☐	MODEM ☐	Analizador de espectro ☐
Ubicación			
Atenuación			
Nivel de referencia			
Fase			
Acoplamiento			
Corriente de fase	1-neutro:	2-neutro:	3-neutro:
Voltaje de línea	1-2:	2-3:	1-3:
Voltaje de fase	1-neutro:	2-neutro:	3-neutro:
Selección inicial del tipo de			
Parámetro de medición			
Ancho de banda			
Frecuencia central			
Resultados obtenidos			
Potencia del ruido	Máx:	Mín:	
Ancho de banda del ruido			
Frecuencia(s) de desvanecimiento			
Potencia de Transmisión	**Potencia de recepción**		
0dBm	Máx:	Mín:	
Parámetros leídos de otros archivos			
Nombre del archivo			
Fuente del archivo			
Observaciones adicionales			

VALIDO PARA IMPLEMENTACIÓN ☐ SI ☐ NO

APÉNDICE F

Comparación de Tecnologías de Acceso a Banda Ancha.

Comparación de Tecnologías de Acceso a Banda Ancha

Tecnología	Uso del espectro	Capacidad	Distancia máxima	Costos de instalación	Costos del servicio (mensual).	Ventajas	Limitaciones
HFC - Hibrido de Fibra y Coaxial (Hybrid Fiber Coax): Cable TV y Cable Módems	7 - 860MHz. Comúnmente de 7 a 550MHz con 6MHz por canal	40Mbps por canal, con actulización hasta 50Mbps. Ancho de banda por usuario de 0.5 a 3Mbps.	Se instalan amplificadores para extender la distancia, con esto se puede llegar hasta los 100Km.	Módem: entre 90 y 150$.	Entre 30 y 50$.	Usa la red existente de Televisión por cable.	Ancho de banda: 1) Limitado por canal. 2) Compartido por muchos ususarios. 3) Asimétrico. 4) Muy bajas velocidades de subida de datos (upstream). 5) Necesidad de amplificar la señal. 6) Sucepctible en algunos casos a interferencias externas.
ADSL - Línea de Abonado Digital Asimétrica (Asymmetric Digital Subscriber Line)	Hasta 1.1MHz.	12Mbps @ 0.3Km 8.4Mbps @ 2.7Km 6.3Mbps @ 3.6Km 2Mbps @ 4.8Km 1.5Mbps @ 5.4Km	Distancia máxima de 5.4Km.	Divisores de frecuencia + módem: desde 40$ hasta 300$.	Desde 30$ hasta 350$.	UsA la infraestructura telefónica existente, es decir el par trenzado.	Ancho de banda: 1) Limitado, el cual es sensible a la distancia. 2) Asimétrico. 3) Tasas de subida más bajas.
PLC - Comunicaciones por Líneas Energizadas (Power Line Communications)	De 1 a 40MHz	Máxima de 200Mbps (Segunda generación).	De 1 a 3Km.	Módem: entre 90 y 150$.	Entre 15 y 25$.	Usa las redes eléctricas ya existentes.	1) Altos costos de implementación cuando no es un servicio masivo. 2) Posible interferencia con bandas de frecuencia de radio aficionados.
FTTH - Fibra hasta el hogar (Fiber to the Home)	En el orden de los THz.	Hasta 1Gbps por canal por fibra.	20Km.	Activación de fibra por usuario: 1500$. Terminación de fibra: 100$. Módem: 300$	Entre 1000 y 2000$.	Ancho de banda relativamente ilimitado.	Requiere de la implementación de una red de acceso nueva de fibra.
3G - Tercera Generación Celular	De 1.92 a 1.98GHz (Banda libre) De 2.11 a 2.17GHz (Banda licensiada).	Hasta 2Mbps por suscriptor móbil.	Área de cobertura de la red del cliente.	Teléfono móvil celular 3G: entre 100 y 400$.	A partir de 30$	Terminales móbiles. Corre sobre la infraestructura celular existente.	1) Espectro costoso. 2) Aplicaciones limitadas
WiFi - Fidelidad Inalámbrica (Wireless Fidelity)	En las siguientes bandas libres: 2.7 y 5.4GHz.	11 y 54Mbps.	Hasta de 100m.	Equipo inalámbrico (Ej. enrutador, punto de acceso): a partir de 100$.	A partir de 30$, porque es necesaria la contratación de un acceso a banda ancha.	Compatible con el Ethernet. Estandar IEEE 820.11a/b/g	1) Sólo para aplicaciones de redes locales (LAN). 2) Problemas de seguridad.

APÉNDICE G

Glosario de Términos.

-3-
3G: Tercera generación celular.

-A-
ADSL: Asymetric Digital Subscriber Line, Línea Digital Asimétrica del Suscriptor.

-B-
Backbone: Red Troncal.
BPL: Broadband over Power Lines, Banda Ancha sobre Líneas Energizadas.
Breaker: interruptor.
Burst noise: Ruido Ráfaga.
Bypass: puente.

-C-
CPE: Customer Premises Equipment, Equipo en los Predios del Cliente.
CT: Centro de Transformación.

-D-
DB: Decibeles.
DBm: Decibeles milivatios.
Distribution Box: Caja de Distribución.
Downlink: Canal de bajada.
DSL: Digital Subscriber Line, Línea Digital del Suscriptor.

-E-
EDC: Electricidad de Caracas.

-F-
FCC: Federal Communication Comision, Comisión Federal de Comunicaciones.
FTTH: Fiber To The Home, Fibra hasta el hogar.

-H-
HE: Head End, equipo cabecera.
HFC: Hybrid Fiber Coax, Híbrido de Fibra y Coaxial.
HFCPN: High Frequency Conditioned Power Network, Red de Energía Condicionada de Alta Frecuencia.
Home Gateway: Puerta de Enlace Doméstica (Repetidor).
HV: High Voltage, Alto Voltaje.

-I-
ICMP: Internet Control Management Protocol, Protocolo de Control y Administración de Internet.
Indoor: interior.
In house: doméstica.
ISP: Internet Service Provider.

-K-
KV: Kilovoltio.

-L-
LAN: Local Area Network, Red de Área Local.
LV: Low Voltage, Bajo Voltaje.

-M-
MAC: Media Access Control, Control de Acceso al Medio.
MCM: Mil Circular Mil.
MHz: Megahertz.

-O-
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia.
OPERA: Open PLC European Research Alliance, Alianza Abierta Europea de Investigación de PLC.
Outdoor: exterior.

-P-
PC: Personal computer, Computadora Personal.
Ping: Packet Internet Groper, Agrupador de Paquetes de Internet.
PL: Power Line, Línea Energizada.
PLC: Power Line Communications, Comunicaciones por Líneas Energizadas.
PSK: Phase Shift Keying, Codificación por Fase Alternada.
-Q-
QAM: Quadrature Amplitude Modulation, Modulación por Cuadratura de Amplitud.

-R-
RF: Radio Frecuencia.
ROE: Relación de Onda Estacionaria.
Rx: Receptor.

-S-
SNMP: Simple Network Management Protocol, Protocolo Simple de Administración de Red.
Splitter: Distribuidor.
S/R: Relación Señal a Ruido.

-T-
TCP: Transport Control Protocol, Protocolo de Control de Transporte.
Throughput: Velocidad Efectiva.
TTL: Time to Live, Tiempo de Descarte.
Tx: Transmisor.

-U-
Uplink: Canal de subida.
USB: Universal Serial Bus, Bus Serial Universal.

-V-
V: Voltio.
VLAN: Virtual Local Area Network, Red Virtual de Área Local.
VoIP: Voice over Internet Protocol, Voz sobre Protocolo Internet.
VPN: Virtual Private Network, Red Privada Virtual.

-W-
WiFi: Wireless Fidelity, Fidelidad Inalámbrica.

APÉNDICE H

Sistema de Monitoreo de Ilevo.

Funciones principales.

- **Provisionamiento:** configuración del sistema para un nuevo usuario.
- **Monitoreo:** monitoreo de todos los componentes de la red PLC.
- **Actualización:** instalación de nuevas versiones del programa oficial del fabricante.
- **Cobro:** sólo disponible para la versión 2.0.

El *host* es instalado en el Centro de Operación de la Red (NOC, *Network Operation Center*) del operador, con una buena respuesta en el tiempo de conexión con el equipamiento PLC. El NMS-500 es construido con 5 módulos independientes, unidos entre sí a través de una base de datos. Cada módulo ofrece diferentes funciones:

- **Función de provisionamiento:** esta función es ofrecida por el Administrador de Despliegue. Estos módulos permiten al operador, modificar, agregar o eliminar cualquiera de los equipos de la red: cabecera, repetidor, CPE a la base de datos. La entrada puede ser hecha:
    - De forma interactiva.
    - Importando archivos.
- **Función de monitoreo:** es ofrecida a través de una interfaz gráfica. Este módulo le ofrece al operador de la red, 3 ventanas:
    - Vista de topológica: muestra todos los equipos cabecera y repetidores de la red PLC (Ver Figura siguiente). La información de los CPEs puede ser accedida a través de una vista detallada de cada master.

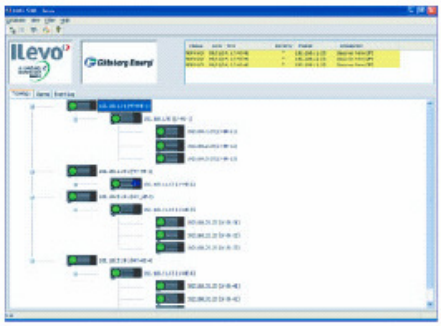


Figura #1: Vista topológica.

    - Ventana con lista de alarmas: muestra dinámicamente todas las alarmas que han aparecido y no han sido notificadas al operador (Ver figura siguiente). Esta lista incluye el *test* de conectividad, medición de velocidad y cambio de configuración.

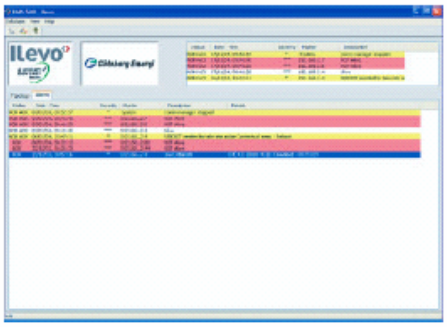


Figura #2: Ventana con lista de alarmas.

    - Ventana de eventos: muestra todas las alarmas ocurridas. El operador puede aplicar filtros y elegir el método para analizar todo el historial de un evento (Ver figura siguiente). Éstos son además exportados a un archivo .csv, para un tratamiento más manejable.

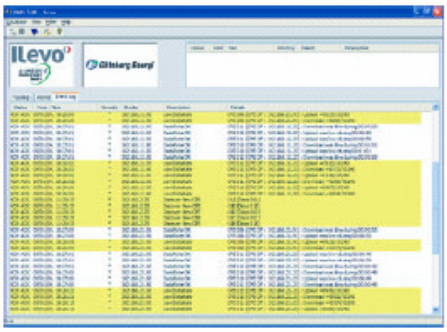


Figura #3: Ventana con eventos.

- **Función de actualización:** es ofrecida por el Administrador de Actualización. Este módulo le ofrece al operador:
    - Especificar donde está localizado el archivo con la imagen del nuevo programa del fabricante (De un servidor FTP).
    - Seleccionar a todos los equipos maestros que requieren una actualización.
    - Enviar a todos los maestros la actualización. Luego de esto se envía un acuse de recibo para asegurar que la actualización fue hecha correctamente.
- **Función de comunicación:** todas las comunicaciones de los equipos PLC son llevadas por el Administrador de Comunicaciones (*CommManager*). Este modulo usa los protocolos: SNMP V2c y Telnet.

Es posible personalizar el NMS, de acuerdo a:

1. El logo del operador.
2. Programas extras pueden ser llamadas desde la consola, sólo con hacer clic en el menú de la derecha.

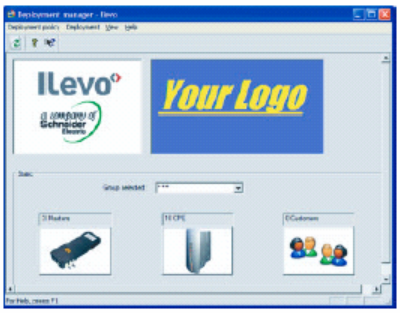


Figura #4: Personalización del NMS.

Rendimiento.
En una arquitectura simple, todos los módulos y la base de datos son instaladas en la misma plataforma. Esta solución es capaz de controlar sitios de tamaño medio (menos de 500 puntos). Más allá de este punto puede ser necesario distribuir el sistema hacia otro *host*.

Número de alarmas y eventos.
El estado de una alarma puede ser "*default*" (por omisión) o "alarma" . El número de eventos almacenados es limitado por una política de "Primero en entrar, primero en salir".

Tiempo de respuesta.
Este aspecto depende de la configuración del Administrador de Comunicaciones (CommManager). Debe ser adaptado al tiempo de la red de acceso.

ANEXO A

Tablas con Frecuencias de Operación de Equipos PLC.

TIPO DE TARJETA PLC	LINK	UPSTREAM		DOWNSTREAM	
		Start (MHz)	Stop (Mhz)	Start (MHz)	Stop (Mhz)
Tarjeta Link 1/4	Link 1	2.460	4.960	7.925	11.725
	Link 4	8.575	11.075	2.460	6.260
Tarjeta Link 2	Link 2	13.800	16.300	19.000	22.800
Tarjeta Link 3	Link 3	26.700	29.200	34.200	38.000
Tarjeta Link 5-9	Link 5	5.236	7.736	11.250	13.750
	Link 6	11.250	13.750	5.236	7.736
	Link 7	6.492	8.992	11.250	13.750
	Link 8	11.250	13.750	6.492	8.992
	Link 9	5.236	7.736	11.250	13.750
Tarjeta Link 10/11	Link 10	16.311	18.811	22.740	26.490
	Link 11	22.750	25.250	16.311	18.811
Tarjeta Link 12/13	Link 12	2.015	4.515	5.530	8.030
	Link 13	5.530	8.030	2.015	4.515

Tabla #1: Frecuencias de operación de equipos PLC de Primera Generación. (Fuente: Mitsubishi Electric CO).

Canal de frecuencia	Frecuencia	Ancho de banda	Variación de frecuencia
DL1	9.87	3.7	0.02
UL1	3.25	2.5	0
UL2	15.05	2.5	-0.01
DL3	36.07	3.7	0.04
UL3	27.95	2.5	0.02
DL4	4.37	3.7	0.02
UL4	10.5	2.5	0
DL5	12.5	2.5	0
UL5	6.5	2.5	0
DL6	6.5	2.5	0
UL6	12.5	2.5	0
DL7	12.5	2.5	0
UL7	7.75	2.5	0
DL8	7.75	2.5	0
UL8	12.5	2.5	0
DL9	12.5	2.5	0
UL9	12.5	2.5	0
DL10	24.62	3.7	0.02
UL10	17.55	2.5	-0.01
DL11	17.55	2.5	-0.01
UL11	24	2.5	0
DL12	6.75	2.5	0
DL12	20.87	3.7	0.02
UL12	3.25	2.5	0
DL13	3.25	2.5	0
UL13	6.75	2.5	0
UL14	3.25	2.5	0
DL14	7.37	3.7	0.02

Tabla #2: Frecuencias de operación de equipos PLC de Segunda Generación.

(Fuente: Analizador de Espectro Promax Propower – 5).