

**ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA PLC - POWER LINE
COMMUNICATION (COMUNICACIÓN A TRAVÉS DE LAS LÍNEAS DE
ENERGÍA ELÉCTRICA)**

WILLIAM ELIAS PADILLA ALMEIDA

**DIRECTOR
ENRIQUE VANEGAS CASADIEGO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

2006

**ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA PLC - POWER LINE
COMMUNICATION (COMUNICACIÓN A TRAVÉS DE LAS LÍNEAS DE
ENERGÍA ELÉCTRICA)**

WILLIAM ELIAS PADILLA ALMEIDA

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR
ENRIQUE VANEGAS CASADIEGO
INGENIERO ELECTRICISTA
ESPECIALISTA EN AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

2006

Artículo 107

La Universidad Tecnológica de Bolívar se reserva el derecho de propiedad de los trabajos de grado aprobados y no pueden ser explotados comercialmente sin autorización.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena, Junio de 2006

Cartagena D. T. Y C., Junio de 2006

Señores

COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Con toda atención nos dirigimos a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA PLC - POWER LINE COMMUNICATION (COMUNICACIÓN A TRAVÉS DE LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA) como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electrónico

Atentamente

WILLIAM ELIAS PADILLA ALMEIDA

Cartagena D. T. Y C., Junio de 2006

Señores

COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Cordial saludo:

A través de la presente me permito entregar la monografía titulada ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA PLC - POWER LINE COMMUNICATION (COMUNICACIÓN A TRAVÉS DE LAS LÍNEAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA) para su estudio y evaluación la cual fue realizada por el estudiante WILLIAM ELIAS PADILLA ALMEIDA, de la cual acepto ser su director.

Atentamente,

ENRIQUE VANEGAS CASADIEGO

ING. Electricista, Especialista en Automatización Industrial

AUTORIZACIÓN

Yo WILLIAM ELIAS PADILLA ALMEIDA, identificado con la Cedula de Ciudadanía numero 73.201.202 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar, para hacer uso de mi trabajo de monografía y publicarlo en el catalogo on-line de la biblioteca.

WILLIAM ELIAS PADILLA ALMEIDA

Agradecimientos

A mis Padres Jaime Elias y Mercedes Maria y mi hermano Jaime Antonio por el apoyo incondicional que me han brindado, y por todas las enseñanzas que gracias a ellos he obtenido.

A mi novia, Claudia Milena por todos esos momentos de dificultad en los cuales estuvo siempre para darme ánimos.

A todos los profesores que de una u otra manera influyeron para bien en mi manera de pensar y que con sus conocimientos me dieron las bases para alcanzar este logro.

A mis compañeros de estudio, Mauricio, Mary, Marcela, Sharon, Yesid, Reinaldo, Kenny, Kenny, Iván, entre otros pocos que me han acompañado en estos duros años y siempre me han brindado su apoyo.

Por ultimo pero siendo el mas importante de todos a DIOS Que siempre ha guiado mi lápiz, pensamiento y corazón para ser quien soy hoy en día.

A todos ellos GRACIAS

WILLIAM ELIAS PADILLA ALMEIDA

ABREVIATURAS Y TÉRMINOS

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line ("Línea de Abonado Digital Asimétrica"). Consiste en una línea digital de alta velocidad, apoyada en el par trenzado de cobre que lleva la línea telefónica convencional o línea de abonado.

ASK: Amplitude Shift Keying ("Modulación por Desplazamiento de Amplitud"). Es una forma de modulación en la cual se representan los datos digitales como variaciones de amplitud de la onda portadora.

AT: Alta Tensión.

BT: Baja Tensión.

Calidad de servicio (QoS): QoS es un conjunto de estándares y mecanismos que aseguran la calidad en la transmisión de los datos en programas habilitados para QoS.

CATV: Redes de Televisión por Cable

CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance. Es un protocolo de control de redes utilizado para evitar colisiones entre los paquetes de datos (comúnmente en redes inalámbricas, ya que estas no cuenta con un modo práctico para transmitir y recibir simultáneamente).

CTS: Carrier Frequency Transmisión.

DECT: El estándar DECT define una tecnología de acceso radio para comunicaciones inalámbricas.

DSL: Digital Subscriber Line (“Línea de abonado digital”) es un término utilizado para referirse de forma global a todas las tecnologías que proveen una conexión digital sobre línea de abonado de la red telefónica local: ADSL, ADSL2, ADSL2 + SDSL, IDSL, HDSL y VDSL.

FSK: Frequency Shift Keying (“Modulación por desplazamiento de frecuencia”). Es un tipo de modulación de frecuencia en la cual la señal modulante desplaza la frecuencia de la onda portadora entre valores discretos predeterminados.

GSM: Global System for Mobile communications (“Sistema Global para las Comunicaciones Móviles”). Es un estándar mundial para teléfonos móviles digitales. GSM difiere de sus antecesores principalmente en que tanto los canales de voz como las señales son digitales

GPRS: Global Packet Radio Services. Es una tecnología digital de telefonía móvil. Es considerada la generación 2.5, entre la segunda generación (GSM) y la tercera (UMTS).

IHAV: In-home Audio/Video. Audio y Video para las casas.

Impedancia Característica: Es la relación existente entre la diferencia de potencial aplicada y la corriente absorbida por la línea en el caso hipotético de que esta tenga una longitud infinita.

Kbps: Medida de la velocidad de transmisión medida en miles de Bits Por cada Segundo

MAC: Medium Access Control (“Control de Acceso al Medio”). Subcapa situada en la parte inferior de la capa de enlace de datos (Capa 2 del Modelo de Referencia OSI). La subcapa MAC puede variar dependiendo de los requerimientos de la capa física (por ejemplo Ethernet, Token Ring, WLAN).

Mbps: Medida de la velocidad de transmisión medida en millones de Bits Por cada Segundo

MT: Media Tensión

Last Mile (Última milla): Son los cables de la red que van desde la estación transformadora hasta las residencias.

LLC: Logical Link Control (“Control de Enlace Lógico”)

OSI: Open Systems Interconnection (“Modelo De Interconexión De Sistemas Abiertos”). El modelo de referencia OSI se ha convertido en el modelo principal para las comunicaciones por red.

PLC: Power Line Communications. Comunicaciones A través de Redes de Energía

PSK: Phase Shift Keying (“modulación por desplazamiento de fase”). PSK es una forma de modulación angular consistente en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos

RCS: Ripple Carrier Signalling.

RED HFC: Hybrid Fiber Coaxial. Red de distribución óptica la cual conecta una red de acceso CATV a una WAN.

SNR: Signal to Noise Ratio. Relación Señal a Ruido.

TDMA: Time Division Multiple Access. Tecnología que distribuye las unidades de información en alternantes slots de tiempo proveyendo acceso múltiple a un reducido número de frecuencias.

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System (“Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal”) Es el sistema de telecomunicaciones móviles de tercera generación.

WAN: Wide Area Network. Red de Area Extensa.

WiMax: Worldwide Interoperability for Microwave Access, (“Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas”). Es un estándar de transmisión inalámbrica de datos (802.16d) diseñado para ser utilizado en el área metropolitana o MAN proporcionando accesos concurrentes en áreas de hasta 48 kilómetros de radio y a velocidades de hasta 70 Mbps, utilizando tecnología portátil LMDS.

WLAN: Wireless Local Area Network. (“Red de Área Local Inalámbrica”). Es un sistema de comunicación de datos inalámbrico flexible muy utilizado como alternativa a la LAN cableada o como una extensión de ésta.

WLL: Wireless Local Loop. Bucle local Inalambrico

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 TECNOLOGÍAS DE ACCESO	3
1.1 Área de acceso a las telecomunicaciones	3
1.1.1 Construcción de nuevas redes de acceso	5
1.1.2 Uso de la infraestructura existente en el área de acceso	8
1.2 Comunicación a través de la red eléctrica	10
1.2.1 Perspectiva	10
1.2.2 Historia de PLC	13
1.2.3 Redes de energía eléctrica	14
2 REDES PLC	16
2.1 Estructura de las redes de acceso PLC	16
2.2 Redes PLC in-home	17
2.3 Elementos de una red PLC	19
2.3.1 Elementos de red básicos	19
2.3.2 Repetidor	21
2.3.3 Gateway	23
2.4 Conexión a la red central	25
2.4.1 Tecnologías de comunicación para redes de distribución PLC	25
2.4.2 Topología de las redes de distribución PLC	26
2.5 PLC en redes de media tensión	29

3	CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES PLC	31
3.1	Topología de red	31
3.1.1	Topología de las redes de energía de baja tensión	31
3.1.2	Organización de las redes de acceso PLC	33
3.1.2.1	Posición de la estación base	33
3.1.2.2	Segmentación de la red	34
3.1.3	Estructura de las redes PLC in-home	37
3.2	Características de un canal de transmisión PLC	39
3.2.1	Caracterización del canal	39
3.2.2	Características del cable de transmisión PLC	40
3.2.2.1	Ancho de banda	42
3.2.3	Modelamiento de un canal PLC	42
3.3	Modulación	44
3.3.1	Método de modulación combinado	45
3.4	Influencia de la carga en la comunicación	49
3.4.1	Efecto de la carga cuando es conectada a la subestación	50
3.4.2	Efecto de la carga cuando es conectada a una caja de conexiones	51
4	TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN PLC	52
4.1	LonWorks (Local Operation Networks)	52
4.1.1	Tecnología LonWorks	53
4.1.2	Componentes Del Sistema LonWorks	55
4.2	Consumer Electronic Bus (CEBus)	57
4.2.1	Tecnología CEBus	58
4.2.2	Protocolo CEBus	58
4.2.3	Estructura Del Paquete CEBus	59
4.3	Passport y plug-in PLX	61
4.4	X-10	62
4.4.1	Teoría de la transmisión en X-10	63

4.5	PowerPacket	64
4.5.1	Tecnología PowerPacket.....	65
4.5.2	Formato de la trama PowerPacket	66
4.6	Tecnología Homeplug de Cogency	67
5	APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA PLC	69
5.1	Acceso a Internet.....	69
5.2	PLC como red de área local	71
5.3	Audio y video in-home con MAC PLC con soporte de las redes vecinas	72
5.4	PLC para el control de irrigación	73
5.5	PLC sobre automóviles.....	74
5.6	PLC en Colombia	76
5.7	Ventajas y desventajas de la tecnología PLC.....	77
6	CONCLUSIONES	80
	BIBLIOGRAFÍA	82

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura general de las redes de telecomunicaciones.....	4
Figura 2. Estructura de una red inalámbrica móvil.....	7
Figura 3. Estructura de red inalámbrica fija (WLL).....	7
Figura 4. Estructura de red de acceso DSL.....	9
Figura 5. Estructura de una red de acceso CATV.....	10
Figura 6. Distribución de frecuencias ETSI TS 101 867.....	13
Figura 7. Tipos de redes de energía eléctrica.....	15
Figura 8. Estructura de una red de acceso PLC.....	16
Figura 9. Estructura de una red PLC in-home.....	18
Figura 10. Funciones de un modem PLC.....	20
Figura 11. Repetidor PLC.....	21
Figura 12. Red PLC con repetidores.....	22
Figura 13. Conexión Directa de un abonado PLC.....	24
Figura 14. Conexión Indirecta utilizando gateway.....	24
Figura 15. Conexión a la red de nodo central.....	26
Figura 16. Red de distribución PLC con topología BUS.....	27
Figura 17. Red de distribución PLC con topología estrella.....	27
Figura 18. Red de distribución PLC con topología anillo.....	29
Figura 19. Estructura de una red de comunicación con PLC MT.....	30
Figura 20. Topología en árbol de una red de baja tensión.....	32
Figura 21. Red PLC con la estación base en la unidad de transformación.....	33
Figura 22. Topología de una red de acceso PLC y correspondiente red de baja tensión.....	34

Figura 23. Sistemas de acceso PLC paralelos dentro de una red de baja tensión	35
Figura 24. Redes de acceso PLC independientes dentro de una red de alimentación de baja tensión	36
Figura 25. Red de acceso PLC con dos niveles jerárquicos.....	37
Figura 26. Topología de una red PLC In-home.....	38
Figura 27. Canal PLC multicaminos representado por el modelo ECHO.....	43
Figura 28. Modelo de un sistema de comunicación	46
Figura 29. Ancho de banda estimado de una señal FSK.....	47
Figura 30. Ancho de banda estimado para una señal PSK	48
Figura 31. Ancho de banda estimado para el método de modulación combinado.	49
Figura 32. Red De Baja Tensión.....	50
Figura 33. Promedio de todos los indicadores de deficiencia en el canal (P)	50
Figura 34. Sistema de control distribuido LonWorks.....	53
Figura 35. Anatomía de varias categorías de dispositivos LonWorks.....	56
Figura 36. El modelo de capas del protocolo CEBus.....	59
Figura 37. Estructura del paquete CEBus.....	60
Figura 38. Relación de tiempo de las señales X-10	64
Figura 39. Ciclos de una transmisión de código X-10.....	64
Figura 40. Modulación Diferencial PowerPacket.....	65
Figura 41. Formato de trama PowerPacket	67
Figura 42. Formato de trama de HomePlug de Cogency.....	68
Figura 43. Red de acceso PLC	70
Figura 44. Red de área local utilizando la tecnología PLC	72
Figura 45. Grafica del sistema de irrigación.....	74
Figura 46. Formas de cableado de un automóvil	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Velocidades de transmisión máximas de distintas tecnologías.....	45
Tabla 2. Características de los tipos de canales.....	56
Tabla 3. Ventajas Y Desventajas De Las Diferentes Acceso A Red.....	79
Tabla 4. Características de las tecnologías de comunicación de PLC.....	81

INTRODUCCIÓN

Las redes de acceso por lo general implementan una interconexión cliente-servidor a redes de comunicación de área extensa (WAN), permitiendo de esta manera que un gran número de usuarios utilicen diversos servicios de telecomunicación ofrecidos por las empresas.

Sin embargo, los costos de realización, instalación y mantenimiento de estas redes son muy altos, por lo general estos costos pueden alcanzar valores por encima del 50% de la inversión realizada en toda la red. Por lo tanto, los proveedores de red tratan de crear redes de acceso al menor costo posible para poder incrementar su competitividad en el mercado de las telecomunicaciones.

En muchos casos, las redes de acceso existentes son propiedad de proveedores de red como por ejemplo las compañías telefónicas monopolizadoras. Debido a lo anterior, los nuevos proveedores de redes tratan de encontrar soluciones para la realización de sus propias redes de acceso a un bajo costo pero con altas prestaciones. Estas características son muy difíciles de encontrar pero existe una posibilidad muy prometedora para la realización de redes de acceso que existe hace mucho tiempo y no se había explotado de forma masiva, esta es la brindada por la tecnología PLC

PLC (Power Line Communication) es una tecnología que permite ofrecer servicios de comunicaciones de banda ancha a través de la red eléctrica. PLC ha sido objeto de gran atención en los últimos años, y el hecho de que en la actualidad se

estén desarrollando pruebas y despliegues más o menos extensos en cerca de ochenta países es un síntoma claro de su potencial y del interés que despierta.

PLC consiste básicamente en utilizar la red eléctrica para la transmisión de datos, de forma que se puedan ofrecer todos los servicios que ofrecen las demás tecnologías y poder competir contra estas. La principal ventaja de esta tecnología se basa en la utilización de una infraestructura ya existente y de muy extensa cobertura, como es la red eléctrica, para la prestación de servicios de telecomunicaciones. Existe cierta similitud con el caso de las tecnologías ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop), y en general xDSL, las cuales aprovechan el par de cobre, inicialmente ideado para prestar el servicio de telefonía básica en banda vocal, como medio de transporte de Internet de alta velocidad. Así pues, tanto PLC como ADSL utilizan infraestructuras ya desplegadas y muy extendidas, aunque originalmente no pensadas para transmitir datos.

1 TECNOLOGÍAS DE ACCESO

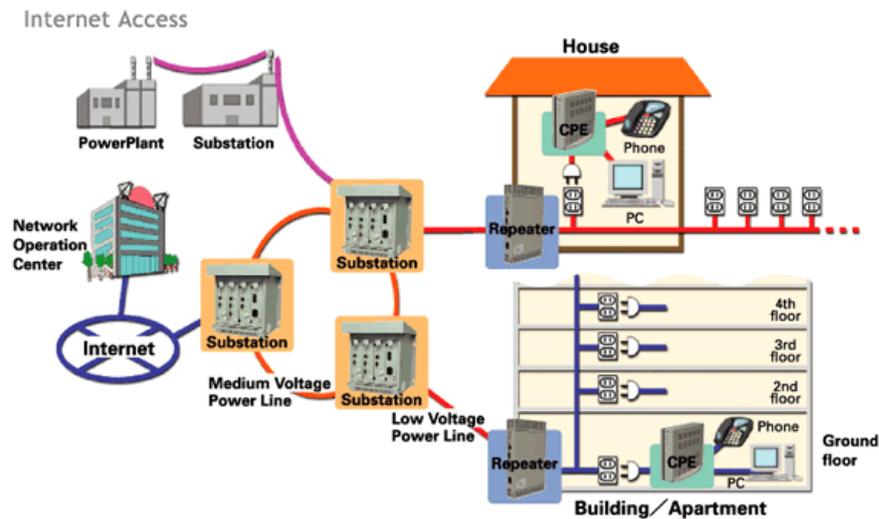
1.1 Área de acceso a las telecomunicaciones

Las redes de accesos son muy importantes para los proveedores de red debido a que estas presentan costos elevados cuando van a ser implementadas y además que estas permiten la posibilidad de la realización de accesos directos para los usuarios. En la actualidad cerca del 50% del total de la inversión hecha en telecomunicaciones es gastada en la infraestructura de las redes de acceso. Sin embargo, una red de acceso conecta un número limitado de usuarios, opuesto a una red de comunicación de transporte (figura 1). Por lo tanto, las redes de acceso tienen un costo mucho menor que una red de transporte (WAN).

En el mundo de las telecomunicaciones existen dos tipos de clientes básicos, estos son los grandes clientes, conformados por empresas industriales, universidades, empresas gubernamentales, entre otras, y los usuarios individuales. En cuanto a los redes que conectan a los grandes clientes se tiene que estas conectan un gran número de terminales, las cuales se encuentran concentradas dentro de un sitio relativamente pequeño (por ejemplo los campus universitarios), además de esto se tiene que estos clientes utilizan con mayor frecuencia tipos de servicios de telecomunicación específicos, lo cual trae consigo altas ventas a los proveedores de red, dado lo anterior y a que un solo usuario conecta tantos terminales, este tipo de red resultan muy económicas. Del otro lado encontramos de los clientes de las redes de acceso encontramos a los usuarios individuales los cuales utilizan los servicios de telecomunicaciones en menor medida que los grandes clientes, causando de esta manera que el costo de estas redes individuales sea muy

alto. En contraparte a lo anterior, se tiene que la utilización de este tipo de redes individuales les permite a los proveedores de red ofrecer un número más alto de servicios de telecomunicaciones. Después de la desregulación del mercado de las telecomunicaciones en un gran número de países, las redes de acceso siguen siendo propiedad de las compañías grandes, por lo cual los pequeños proveedores de red tienen que utilizar la infraestructura de acceso de estas. Dado esto, los nuevos proveedores de red tratan de encontrar soluciones para ofrecer sus propias redes de acceso a los usuarios. Por otro lado, el rápido desarrollo de nuevos servicios en las telecomunicaciones incrementa la demanda para una mayor capacidad de transmisión de datos en las redes de transporte así como en las áreas de acceso. Por lo tanto, hay una necesidad permanente por extender la infraestructura de acceso existente.

Figura 1. Estructura general de las redes de telecomunicaciones



Fuente: global.mitsubishielectric.com/bu/plc/index.html Consultada: Junio 2006

Hay dos posibilidades para la expansión de las redes de acceso:

- La construcción de nuevas redes.
- El uso de la infraestructura de red existente.

La construcción de nuevas redes de acceso sería lo ideal para la ampliación de las redes de acceso existente debido a que de esta manera se pueden ofrecer nuevos servicios a los usuarios, pero la realización de estas redes resulta costosa. Por lo cual, la utilización de una infraestructura ya existente representa una disminución en los costos de implementación, aunque la infraestructura existente tiene que ser renovada y equipada para también poder brindar servicios de telecomunicaciones atractivos a los usuarios tal como los ofrecen las redes nuevas.

1.1.1 Construcción de nuevas redes de acceso

En general, La construcción de nuevas redes de acceso puede se puede dar con las siguientes técnicas:

- Cables nuevos o redes ópticas.
- Sistemas de acceso inalámbricos
- Sistemas satelitales

Las redes de telecomunicaciones ópticas brindan una mayor tasa de transmisión de datos que cualquier otra tecnología de comunicaciones. Las redes ópticas son generalmente utilizadas en las redes de transporte de datos (WAN) y resulta muy económica la utilización de estas redes, pero a su vez las redes ópticas pueden ser implementadas en las redes de acceso permitiendo obtener una capacidad de transmisión de datos lo suficientemente buena y ofrecer servicios muy atractivos para los usuarios. Sin embargo, colocar nuevas redes ópticas puede ser muy costoso debido a los grandes pasos en construcción que habría que dar y a que en ocasiones resulta todo un lío la construcción al interior de áreas urbanas dado los problemas legales y costos que esto acarrea, es por esto que este tipo de redes son hechas en nuevos

vecindarios o zonas recientemente pobladas y áreas con un gran número de suscriptores. Dadas las dificultades que se presentan al implementar redes ópticas o cableadas, en la actualidad se está partiendo hacia la utilización de sistemas inalámbricos en las redes de acceso, donde podemos encontrar básicamente dos sistemas¹ básicos para la realización de estas redes y son los siguientes:

- Sistemas inalámbricos móviles
- Sistemas inalámbricos fijos

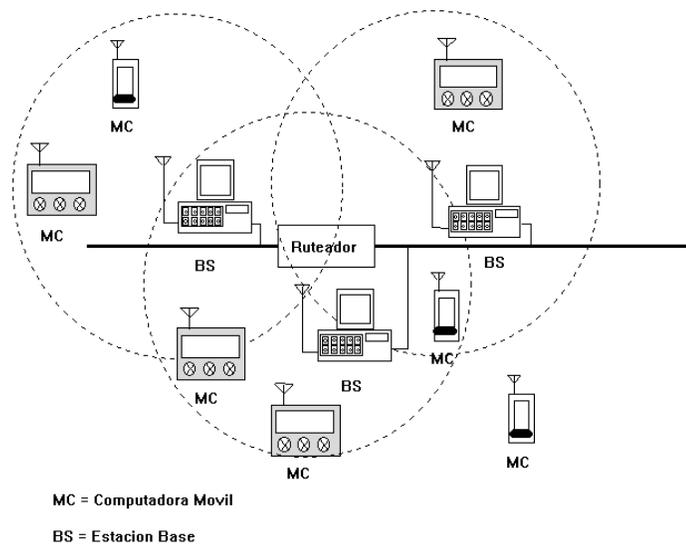
Los sistemas inalámbricos móviles conocidos son: DECT, GSM/GPRS, y UMTS. Las redes móviles proveen muchas celdas para cubrir una amplia área de comunicación, que asegure una conexión permanente para abonados móviles en la zona cubierta (Red Celular, Figura 2). En los sistemas inalámbricos móviles un rango de frecuencia es asignado a cada celda permitiendo la comunicación entre terminales móviles (MT por su nombre en inglés) y estaciones base. Las diferentes frecuencias (o códigos para UMTS) son asignadas a las celdas vecinas para evitar las interferencias entre ellas. Generalmente, una estación central cubre un número de celdas conectándolas a una red de transporte (WAN). Los sistemas inalámbricos móviles brindan tasas de transmisión de datos de hasta 2 Mbps.

Los sistemas inalámbricos fijos, también llamados sistemas WLL (Wireless Local Loop), son más apropiados para aplicaciones en áreas de acceso que los sistemas móviles. Los sistemas WLL también proveen estaciones base que conectan a varios abonados situados en un área relativamente pequeña (Fig. 3). En contra de los sistemas inalámbricos móviles, los abonados WLL tienen un lugar fijo con antenas que son ubicadas sobre postes en edificios o casas.

¹ GARG V. K., Digital wireless local loop system, *IEEE Communications Magazine*, (Octubre 1996), p.112–115

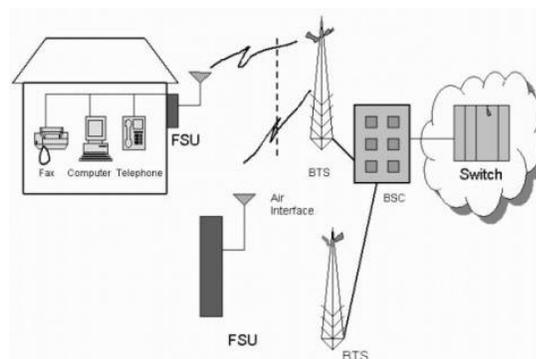
Por lo tanto, los sistemas de WLL proveen rutas de propagación constantes entre la estación de base y los abonados, y en consecuencia proveen una mejor SNR (Relación Señal a Ruido) que los sistemas inalámbricos móviles. Las tasas de transmisión de datos son también más altas que en los sistemas móviles; hasta 10 Mbps en la dirección descendente y hasta 256 kbps en el enlace ascendente.

Figura 2. Estructura de una red inalámbrica móvil



Fuente: AGUIRRE, Jose. Redes Inalámbricas

Figura 3. Estructura de red inalámbrica fija (WLL)



Fuente: http://www.supertel.gov.ec/telecomunicaciones/t_fija/informacion.htm
Consultada: Junio 2006

1.1.2 Uso de la infraestructura existente en el área de acceso

Una forma de evitar la construcción de nuevas redes es con la utilización de una infraestructura ya existente la cual presente las características mínimas para la implementación de una red de transmisión de datos, pues, esta en un principio no fue pensada para su utilización en la transmisión de datos. Básicamente podemos contar con tres tipos de redes existentes, las cuales pueden ser utilizadas para conectar la red de transporte con los usuarios, las siguientes redes pueden ser usadas para tal propósito:

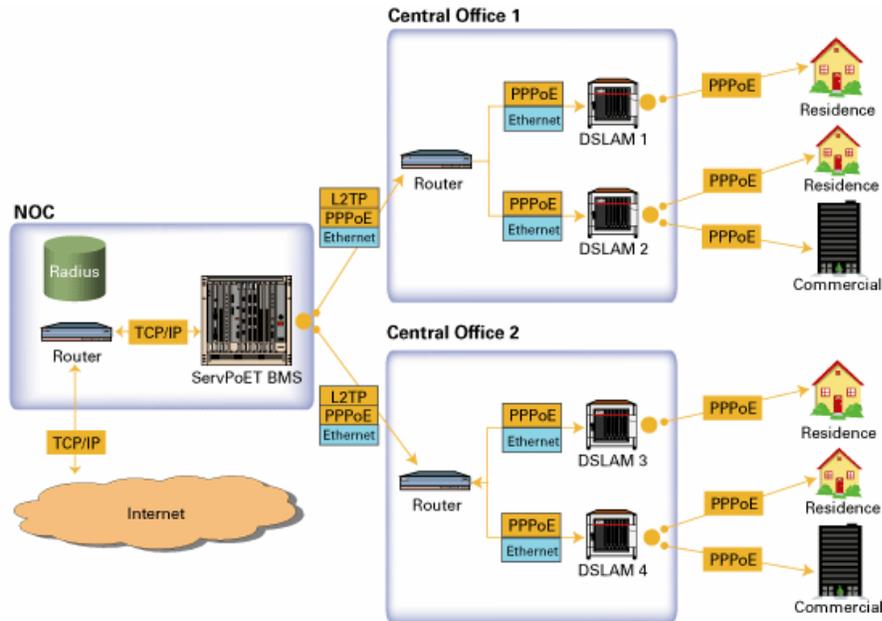
- Redes telefónicas clásicas.
- Redes de cable de la TV (CATV).
- Redes de suministro de energía eléctrica.

Las redes telefónicas actualmente están equipadas con sistemas DSL con lo cual tienen velocidades de transmisión considerablemente buenas para poder ser utilizadas como redes de acceso, específicamente se utiliza ADSL que es una variante de la tecnología DSL, principalmente aplicada en las redes de acceso². La técnica de ADSL puede asegurar una velocidad de transmisión en la dirección de transmisión descendente de hasta 8 Mbps y hasta 640 kbps en la dirección de transmisión ascendente bajo condiciones óptimas. Los abonados que usan sistemas de acceso DSL están conectados a un nodo switching (Nodo Conmutable por Ej.: la oficina de intercambio local) sobre una red en estrella, que permite que cada abonado DSL use completamente las tasas de transmisión de datos (Fig. 4). Los nodos centrales están generalmente conectados a la red backbone (WAN) sobre un sistema de distribución que usa tecnología de transmisión óptica de alta velocidad³.

² ORTH B., ADSL – zukunfrichtige Übertragungstechnologie, Alemania, Mayo 1999, p. 276–293,

³ IMS L. A., Wireline broadband access networks, Teletronikk, 1999. p 73–87

Figura 4. Estructura de red de acceso DSL



Fuente: www.finepointnetworks.com/solutions/dsl.html Consultada: Junio 2006

Las redes CATV son diseñadas para la transmisión de programas de televisión, además de otros servicios de telecomunicaciones. Las técnicas de cableado utilizadas para la infraestructura de las redes CATV tienen que asegurar tasas de transmisión de datos más altas suministrando una múltiple transmisión de canales de Televisión con cierta calidad. Los sistemas de acceso montados sobre redes CATV se presentan hasta 50 Mbps en la señal descendente y hasta 5 Mbps en dirección de transmisión ascendente^{4 5}. Sin embargo, este es un medio compartido, pues cerca de 600 abonados conectados a una red de acceso CATV tienen que compartir la capacidad de la red (Fig. 5).

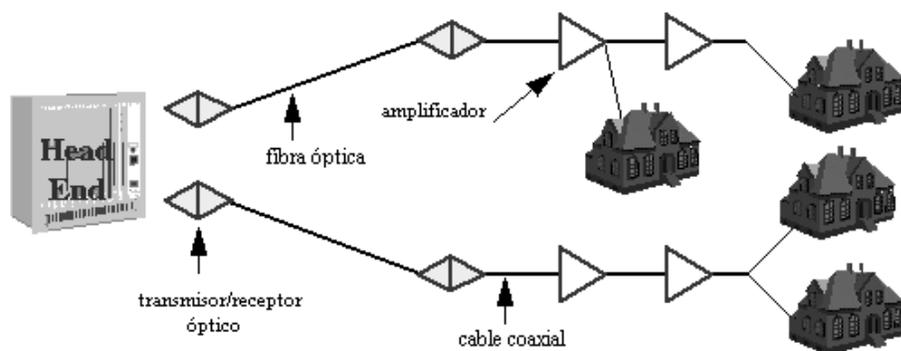
En cuanto a las dos anteriores soluciones para la realización de nuevas redes de acceso, se tiene que las redes telefónicas generalmente pertenecen a

⁴ HERNANDEZ E. J., Architectures for broadband residential IP services over CATV networks, IEEE Network, 1997.

⁵ IMS, Op. cit., p 8

grandes compañías, dejando a los pequeños proveedores de red en desventaja, por otro lado las redes CATV también presentan el mismo problema, pues estas redes pertenecen a grandes compañías y estas redes deben adaptarse a la comunicación bidireccional pues están diseñadas para la comunicación unidireccional. Debido a estas razones, el uso de redes de suministro de energía para la comunicación parece ser una solución razonable para la realización de redes de acceso alternativas. Sin embargo, la tecnología Powerline Communication (PLC) debe proveer una solución económica y debe brindar una amplia gama de servicios de telecomunicaciones con cierta calidad para poder competir con otras tecnologías de acceso.

Figura 5. Estructura de una red de acceso CATV



Fuente: www.tlm.unavarra.es/asignaturas/bi/bi98_99/bi06/Final/TVdigital/redcatv.htm Consultada: Junio 2006

1.2 Comunicación a través de la red eléctrica

1.2.1 Perspectiva

La utilización de la red de suministro de energía para la transmisión de datos no es una idea nueva, esta (la Red Eléctrica) desde hace mucho tiempo ha sido utilizada para la monitorización y control de las líneas eléctricas y la transmisión de las lecturas de los contadores, es decir aplicaciones que no

requerían un gran ancho de banda para su correcto funcionamiento. Pero con el avance de la tecnología en la actualidad se ha llegado a obtener velocidades de transmisión en el orden de los Mega bits, y esta es la razón por la cual no se ha utilizado esta tecnología anteriormente y ahora se plantea como una verdadera posibilidad para la implementación de redes de acceso.

La compañía TECNOCOM⁶ en un documento publicado en su página Web ha citado ciertos factores que propiciarán el despegue definitivo la tecnología PLC y son los siguientes:

- Disponibilidad de una altísima capacidad de integración de funciones en silicio con los avances en las técnicas de VLSI.
- La utilización de técnicas de modulación “spread-espectrum” o modulación en banda ancha. La elevada cantidad y complejidad de los cálculos matemáticos necesarios para este tipo de modulación son ahora posibles mediante la integración en el silicio de funciones complejas.
- Estandarización de los protocolos de comunicación en torno al modelo OSI, con TCP/IP y 802.3 (Ethernet) como estándares “de facto” e independiente del medio físico sobre el que se realice la transmisión.
- El soporte de la Unión Europea y de la administración de EE.UU. La Unión Europea publicó una Recomendación de la Comunidad sobre comunicaciones electrónicas de banda ancha en redes eléctricas, por su parte, la FCC (Federal Commission of Communications), anunció oficial en el que manifestaba su apoyo a los despliegues de la tecnología PLC.

⁶ www.tecnocom.biz

- La expansión de Internet, la proliferación de nuevos servicios sobre IP, como la Voz sobre IP (VoIP), Vídeo bajo Demanda (VoD) y Difusión de Señal de TV sobre IP.

El resultado de la confluencia de estos factores ha determinado que la tecnología PLC haya adquirido una madurez creciente y pueda ser considerada como una de las posibilidades de mayor proyección en las técnicas de banda ancha. Esto, unido a la mayor ubicuidad de las redes eléctricas y al hecho de que ya se encuentran desplegadas hacen de PLC una alternativa real al actual bucle de abonado, y con los avances realizados en la tecnología PLC en Media Tensión el PLC es una alternativa real a las redes de distribución y transporte tradicionales, con unos costes muy competitivos⁷.

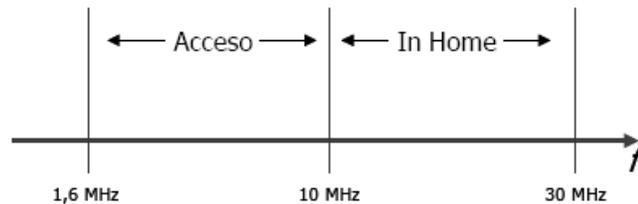
La tecnología PLC aun no tiene una estandarización propia, aunque podemos encontrar que la IEEE publico un documento una guía para las aplicaciones de PLC en alta Tensión, por otro lado lo único que se ha regulado en cuanto a la tecnología PLC ha sido el uso del espectro de frecuencias y las especificaciones de calidad de servicio (QoS) para los Modems.

Los estándares que regulan este uso son:

- EN50065-1 del CENELEC. El cual establece el uso del espectro para Banda Estrecha.
- TS 101 867 del ETSI. El cual se aplica para el uso de Banda Ancha y regula la utilización de la red eléctrica para la transmisión digital de datos a altas velocidades (figura 6).
- TR 102 049 del ETSI. El cual establece las calidades de servicio que deben tener los equipos PLC instalados en los domicilios (modem).

⁷ Tomado de TENOCOM, Powerline Communications, Madrid, España, Julio 2005

Figura 6. Distribución de frecuencias ETSI TS 101 867



Fuente: www.tecnocom.biz:80/docs/plctecnocom.pdf Consultada: Mayo 2006

1.2.2 Historia de PLC

La historia de Power Line Communication es bastante vieja⁸. En 1838, Edward Davy propuso la medición remota de las fuentes de alimentación con el propósito de verificar los niveles de tensión de las baterías en sitios donde no hubiera operadores en el sistema de telégrafo de Londres Liverpool. En 1897, Joseph Routin y C.E.L. Brown patentaron en Gran Bretaña su medidor de electricidad el cual enviaba las señales a través de las líneas de potencia. Chester Thoradson de Chicago patentó su sistema para la lectura remota de medidores de electricidad en 1905. Este sistema no fue muy utilizado dado sus pocos beneficios.

La Carrier Frequency Transmission (CTS) de voz sobre redes de transmisión de alta tensión comenzó en 1920. La amplia red ofreció un canal de comunicación bidireccional por ejemplo entre estaciones de transformación y plantas de energía. Esto era muy importante para los propósitos de gestión y monitoreo, porque no había completo - cobertura de la red telefónica en el origen de la electrificación. Debido a las características de transmisión favorables, los niveles de ruido bajos y frecuencias de la portadora relativamente altas (15 kHz

⁸ Tomada de AHOLA, Jero. Applicability Of Power-Line Communications To Data Transfer Of On-Line Condition Monitoring of Electrical Drives, 2003

- 500 kHz), la distancia máxima entre transmisor y receptor era máximo 900 km con una potencia de 10W.

Simultáneamente con CTS sobre redes de alta tensión, la tecnología Ripple Carrier Signalling (RCS) fue implementada para redes de distribución de media y baja tensión. Los primeros sistemas RCS eran principalmente para administrar los consumos de cargas como el apagado y encendido de la calefacción. Contrario a CTS, la transferencia de datos RCS era unidireccional. RCS operaba a frecuencias de portadora bajas, aproximadamente entre 125 y 3000 Hz. Debido a la baja frecuencia, la señal portadora se propagaba con pérdidas menores en las redes de distribución de energía de media y baja tensión y además dada la baja frecuencia la señal podía pasar a través de los transformadores de distribución.

Sin embargo, a una baja frecuencia de portadora, la impedancia de entrada de la red de distribución era de igual forma que la frecuencia baja. Por lo tanto, el transmisor RCS requería enormes potencia para transmitir. Las potencias de transmisión comúnmente usadas estaban entre los 10 y 100 kW.

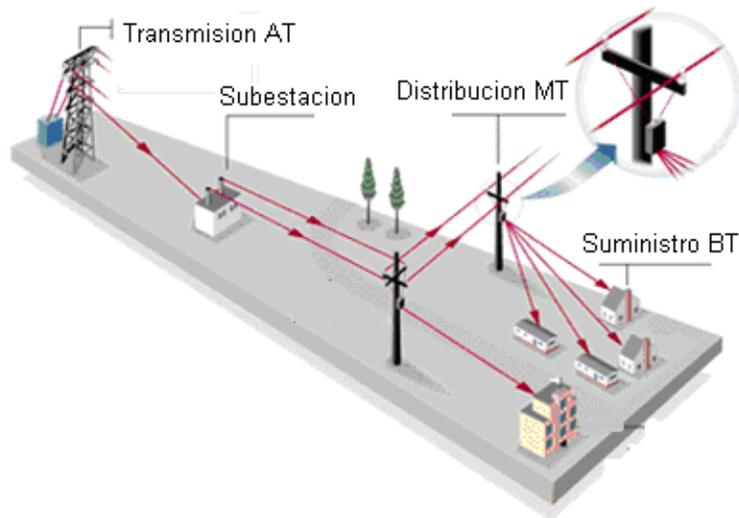
1.2.3 Redes de energía eléctrica

Las redes de los sistemas de suministro de energía eléctrica se dividen en tres tipos, las cuales pueden ser utilizadas como medio de transmisión para la realización de redes PLC (figura 7).

- **Alta Tensión (AT)** (110 kV - 1500 kV): Son redes que conectan las centrales de energía con regiones de gran demanda de energía. Estas líneas por lo general abarcan grandes distancias.

- **Media Tensión (MT)** (1 kV - 34.5 kV): Estas redes suministran energía eléctrica a grandes áreas, ciudades e industrias. Estas abarcan distancias que son relativamente cortas en comparación con las redes de alta tensión.
- **Baja Tensión (BT)** (110 V - 460 V): Estas redes son las que llegan a los hogares aunque también llegan a usuarios mas grandes. Su longitud esta en el orden de los pocos metros, y se ubican por lo general en áreas urbanas.

Figura 7. Tipos de redes de energía eléctrica



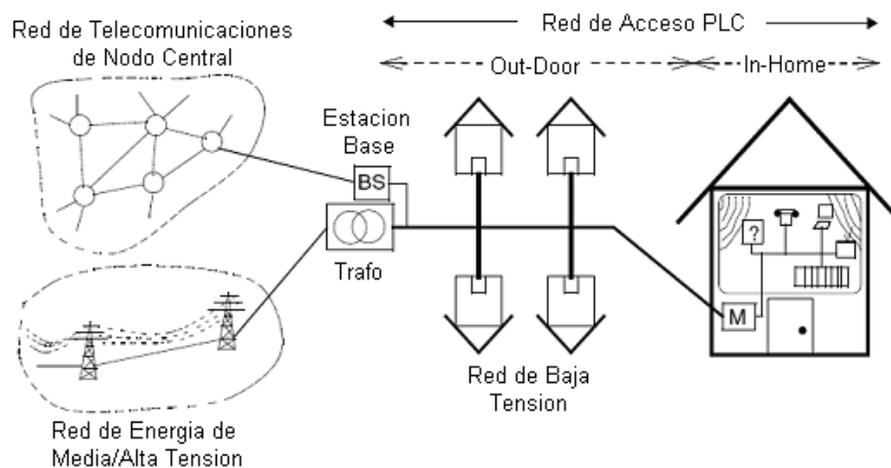
Fuente: COLLIER, Steven. High Speed Internet Access by Power Line Carrier

2 REDES PLC

2.1 Estructura de las redes de acceso PLC

Las redes de distribución de energía eléctrica constan básicamente de un transformador el cual convierte la señal de tensión en una señal adecuada para el consumo y a partir de este transformador salen los distintos cables que llegan a un medidor que se encuentra en cada vivienda, a partir del cual se despliega la red eléctrica interna de la vivienda. (Figura 8)

Figura 8. Estructura de una red de acceso PLC



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

Las redes de acceso PLC en su configuración normal se encuentran conectadas a una red de nodo central, para lo cual utilizan una estación base/maestro que usualmente se encuentra en el transformador. Algunas empresas de suministro de

energía tienen sus propias redes de comunicaciones enlazando los transformadores de un área determinadas, y esta red puede ser usada como una red de nodo central. Si este no fuera el caso sencillamente la estación base colocada en el transformador puede ser conectada a una red Backbone convencional. La conexión al nodo central se puede realizar directamente desde el medidor del usuario (en el caso de que esta solución tuviera un bajo costo) o por medio de una caja de conexiones dentro de un edificio, desde la cual se conecten los diversos usuarios. De cualquier manera que se quiera realizar el procedimiento se debe tener en cuenta que la señal proveniente de la red central o que se dirija hacia la red central debe ser convertida para poder ser transportada, donde esta conversión es realizada por la estación base.

Los equipos de comunicación de los usuarios de PLC están conectados a la red por medio de un modem PLC el cual se puede localizar en el contador de energía del usuario o en cualquiera de los tomas de la red eléctrica interna. En el primer caso, los usuarios dentro de una casa o un edificio están conectados al modem PLC el cual utiliza otra tecnología de comunicación (Como DSL o WLAN). En el segundo caso, la red eléctrica interna es utilizada como medio de transmisión, lo cual es llamado solución PLC *in-home*.

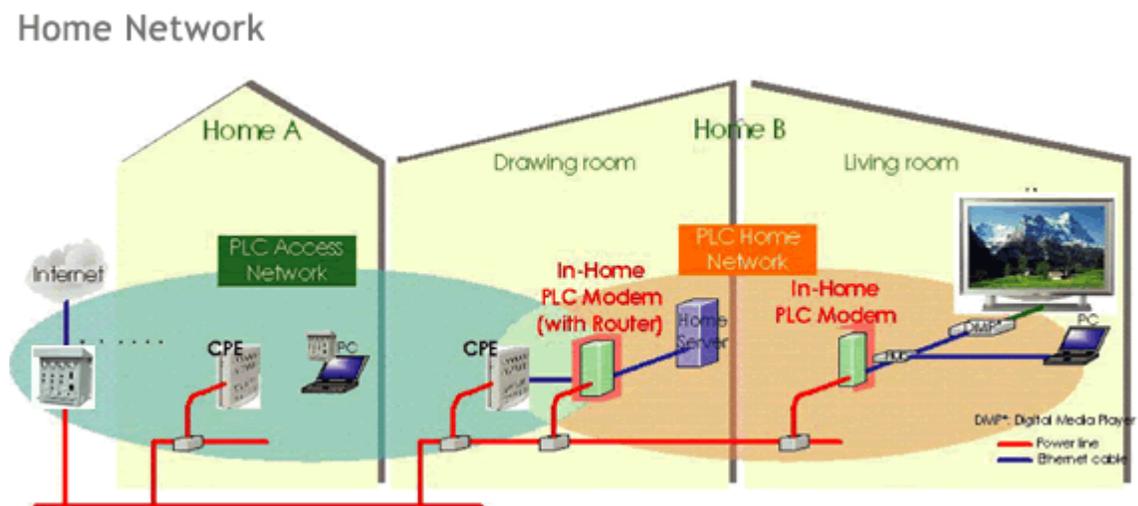
2.2 Redes PLC *in-home*

Los sistemas PLC *in-home* (interiores) utilizan la infraestructura eléctrica interna de las edificaciones como medio de transmisión, de esta manera se pueden conectar todos los dispositivos de comunicación típicos actuales como lo son teléfonos, computadoras, entre otros, con esta ventaja a la mano se pueden conectar pequeñas oficinas por medio de un sistema PLC LAN. Por otro lado en la actualidad los servicios de automatización se hacen cada vez más y más populares no solo en las áreas industriales y comerciales sino en los usuarios

particulares, entre estos servicios podemos encontrar la seguridad, control de calefacción y el control automático de luces, los cuales conectan un gran numero de dispositivos como cámaras, sensores, motores y luces y la tecnología PLC in-home podría ser una solución razonable para su implementación, en especial en casas y edificios viejos, dada su inapropiada infraestructura.

Básicamente, la estructura de una red PLC in-home no es muy diferente de los sistemas de acceso PLC utilizados en redes de baja tensión. En esta tecnología también existe una estación base que controla la red PLC in-home, y probablemente conectada al área externa, como se muestra en figura 9.

Figura 9. Estructura de una red PLC in-home



Fuente: global.mitsubishielectric.com/bu/plc/index.html Consultada: Junio 2006

La estación base en un sistema PLC in-home se puede conectar en cualquier lugar apropiado dentro de la red PLC in-home, pero los dispositivos están conectados por medio de un modem PLC de igual forma que en las redes de acceso PLC, los modem están conectados a los tomacorrientes de la edificación y

estos pueden conectar cual tipo de dispositivo de comunicación. Un punto muy importante es que las redes PLC in-home no solo puede ser conectado a una red de acceso PLC sino que esta se puede conectar a una red de acceso de cualquier otra tecnología de comunicaciones.

2.3 Elementos de una red PLC

Como se dijo anteriormente, las redes PLC utilizan la red eléctrica como medio para la transmisión de diferentes clases de información y la realización de diferentes servicios de comunicación y automatización. Sin embargo, La señal de comunicación tiene que se convertida a una forma apropiada para la transmisión a través de la red eléctrica. Para este propósito, las redes PLC incluyen algunos elementos de red específicos que aseguran la conversión de las señales y su transmisión a lo largo de la red eléctrica.

2.3.1 Elementos de red básicos

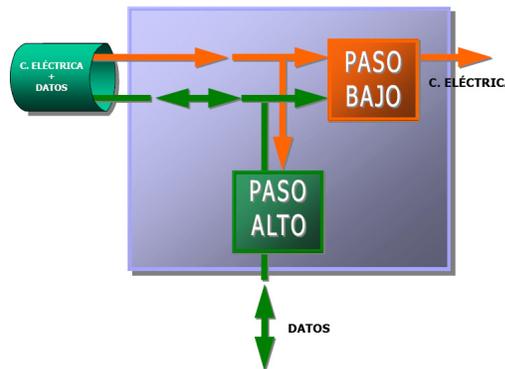
En una red PLC se tienen unos elementos básicos para poder realizar una comunicación sobre la red eléctrica, donde su principal tarea es la preparación y conversión de la señal para su transmisión y recepción sobre la red eléctrica. Los siguientes dispositivos están presentes en todas las redes de acceso PLC.

- Modem PLC
- Estación Base/Maestro PLC

Un modem PLC conecta un equipo de comunicación estándar, utilizado por los usuarios, al medio de transmisión. Del lado del usuario el modem PLC puede suministrar diversas interfaces estándar para diferentes dispositivos de

comunicación. (Por ejemplo. Ethernet y USB). Del lado de la red eléctrica, el modem PLC se conecta la red eléctrica utilizando un acople que permite transmitir y recibir señales de comunicación del medio de transmisión como se muestra en figura 10.

Figura 10. Funciones de un modem PLC



Fuente: www.tecnocom.biz:80/docs/plctecnocom.pdf Consultada: Mayo 2006

El acoplamiento tiene que asegurar una separación galvánica segura y que actúe como un filtro pasa altos dividiendo la señal de comunicación (por encima de 9 kHz) de la señal de energía eléctrica (50 o 60 Hz). Para reducir las emisiones electromagnéticas de la red eléctrica, el acoplamiento se realiza entre dos fases en el área de acceso y entre una fase y el conductor de neutro al interior del inmueble⁹.

Una Estación Base PLC conecta un sistema de acceso PLC a su red de nodo central (figura 8). La estación realiza la conexión entre el backbone y el medio de transmisión (red eléctrica). Sin embargo, la estación base no conecta dispositivos de usuarios individuales. Pero se puede conectar a múltiples interfaces de comunicaciones, como xDSL y SDH para conexión con redes de alta velocidad,

⁹ HRASNICA, H., Broadband Powerline Communications – Network Design, John Wiley and Sons, 2004

WLL para interconexión inalámbrica, entre otras, como se ve en la figura 8. De esta forma una estación base puede utilizarse para realizar la conexión con redes de nodo central utilizando diferentes tecnologías de comunicaciones. Por otro lado, la Estación Base controla la operación de una red de acceso PLC, aunque el control de la red puede ser realizado de una manera distribuida.

2.3.2 Repetidor

Suele suceder en algunos casos, que las distancias entre los diversos usuarios de PLC conectados a una red de acceso son muy extensas y las señales de comunicación pueden tener problemas por este motivo.

Debido a esto, cuando existen grandes distancias entre los usuarios de PLC se utilizan repetidores, los cuales amplifican las señales y dividen la red en varios segmentos de forma que la señal no se atenúe durante el trayecto de la misma, estos segmentos de red estan separados utilizando bandas de frecuencia o time slots diferentes (figura 11).

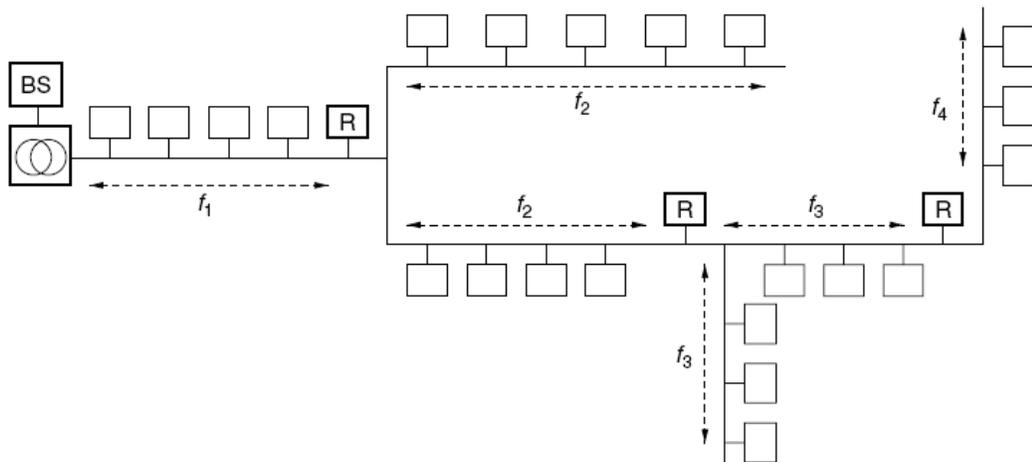
Figura 11. Repetidor PLC



Fuente: <http://www.wia.org.au/BPL> Consultada: Junio 2006

La función de un repetidor se puede explicar de la siguiente manera: un repetidor recibe una señal la cual tiene una frecuencia f_1 , el repetidor la amplifica y la envía a la red, pero a una frecuencia f_2 , en el caso de que se llegue a otro repetidor la conversión de la señal es hecha de f_2 a f_1 . Sin embargo, si existe alguna interferencia entre las señales del primer segmento y el tercer segmento, un tercer rango de frecuencia f_3 tiene que ser utilizado en el tercer segmento y una frecuencia f_4 en el cuarto segmento (Figura 12)

Figura 12. Red PLC con repetidores



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

La utilización de repetidores puede extender las distancias de las redes, aunque la utilización de repetidores incrementa los costos de implementación de la red, dado que se incrementan los equipos y su instalación. Por tal motivo el número de repetidores dentro de una red PLC debe ser el menor posible.

2.3.3 Gateway

Existen dos formas para la conexión de los usuarios PLC por medio de los tomacorrientes a una red de acceso PLC.

- Conexión Directa
- Conexión Indirecta sobre un Gateway

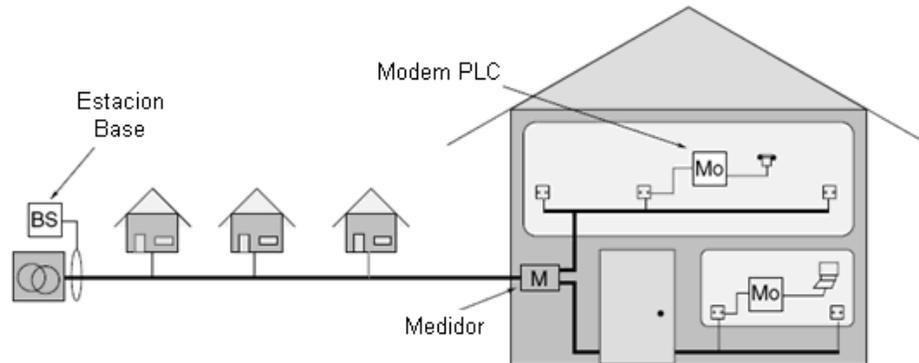
En Conexión Directa, los modem PLC son conectados directamente a la red y por lo ende a la estación base como se muestra en la figura 13, de esta forma no hay una división entres las redes eléctricas interior y exterior, y la señal de comunicación es transmitida a través del contador de energía, sin embargo, las características de las redes de suministro de energía internas y externas son diferentes, lo cuál puede causar problemas en cuanto a las características del canal de transmisión PLC y problemas de compatibilidad electromagnéticos.

En la Conexión Indirecta utilizando Gateway sencillamente se utiliza el Gateway para dividir una red de acceso PLC y una red PLC in-home, para esto el gateway convierte las señales provenientes de la red de acceso transmitidas a unas frecuencias especificadas para el área de acceso en señales con frecuencias especificadas para las redes in-home y viceversa, esto lo realiza el gateway de forma transparente sin alterar la información contenida en las señales.

Un gateway PLC puede proveer funciones adicionales que aseguran una división de las áreas de acceso e In-home sobre el nivel de red lógico, por lo tanto, los modem PLC conectados dentro de una red In-home pueden comunicarse internamente sin que haya flujo de información en el área de acceso. En este caso, un gateway PLC funciona como una estación base que controla la red PLC In-home coordinando la comunicación entre los modem PLC y también entre los modem internos y la red de acceso PLC. Tambien este equipo puede ser utilizado

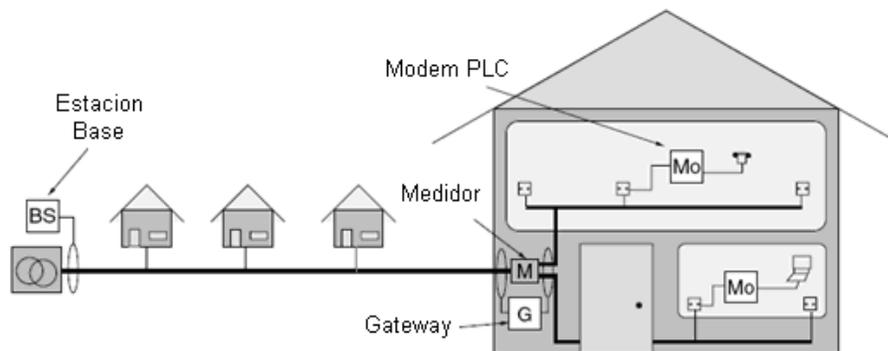
como repetidor y cumple exactamente las mismas funciones y además puede dividir la red sobre el nivel lógico provocando el mismo efecto que se produce en las redes PLC in-home Figura (14).

Figura 13. Conexión Directa de un abonado PLC



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

Figura 14. Conexión Indirecta utilizando gateway



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

Al igual que con los repetidores, un incremento en el número de gateways dentro de una red PLC incrementa los costos, pero a su vez reduce la capacidad de la red. Sin embargo, los repetidores proveen solamente una simple amplificación de

la señal entre segmentos de red, mientras que los gateways proveen una división inteligente de los recursos de red disponibles, asegurando una mejor eficiencia de la red.

2.4 Conexión a la red central

Las redes de acceso PLC están conectadas a las redes central a través de redes de distribución de comunicaciones, como se muestra en figura 15, básicamente, una red de distribución conecta a una estación base PLC con una oficina de intercambio local operada por un proveedor de red.

Como se ha mencionado anteriormente la aplicación de la tecnología PLC debería minimizar los costos en la construcción de nuevas redes de telecomunicaciones, sin embargo, Las redes de acceso PLC tienen que ser conectadas a las WAN por medio de redes de distribución que causan costos adicionales, por lo tanto, la red de distribución tiene que ser realizada con la menor inversión posible para asegurar la competitividad de las redes PLC con otras tecnologías de acceso.

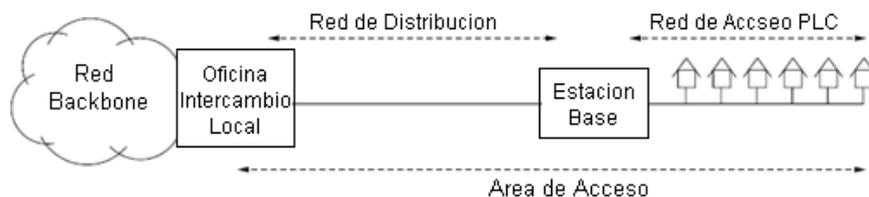
2.4.1 Tecnologías de comunicación para redes de distribución PLC

La forma más económica para la realización de la interconexión entre la red central y las estaciones base es la utilización de los sistemas de comunicación que estén disponibles en el área donde se va a realizar la aplicación., pero en muchas ocasiones estas redes no están disponibles y no existe otra posibilidad que crear nuevas redes. Una posible solución sería la creación de redes ópticas para cubrir el tramo entre las estaciones base y la red central, con lo cual se crearía una especie de red híbrida (figura 15) como las redes HFC.

Es muy complicado saber si al implementar una red PLC se cuenta con un tipo de red de comunicación existente para la implementación de la red de distribución, por lo cual existen las siguientes posibilidades para la realización de la conexión a una red de nodo central.

- Uso de redes existentes o nuevas u ópticas.
- Realización de redes de distribución inalámbricas.
- Aplicación de tecnología PLC en redes de energía de media tensión.

Figura 15. Conexión a la red de nodo central



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

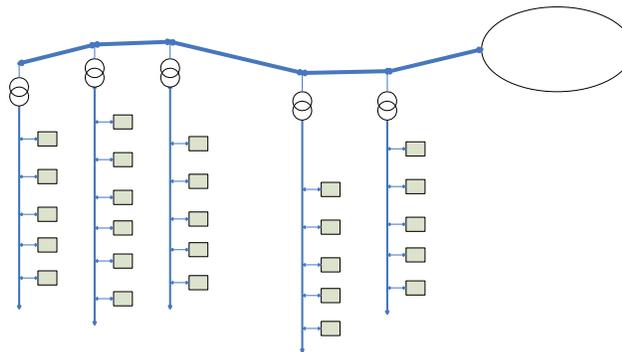
2.4.2 Topología de las redes de distribución PLC

Las redes de distribución pueden ser realizadas en diversas topologías independientemente de la tecnología de comunicación utilizada, donde la topología de red escogida debe asegurar el menor costo posible, pero también esta debe ser confiable, y esto depende primordialmente de la localización de la red de acceso PLC en un área considerada y de la posición de la oficina de intercambio local, como se muestra en la figura 15.

Una buena solución es la implementación de una red de distribución en topología bus (Figura 16), pues presenta un costo bastante bajo en comparación con otras topologías, pero si en esta topología un enlace entre dos redes de acceso PLC se

cae, todas las redes de acceso localizadas detrás del enlace que falló también se desconectarán de la WAN, es por eso que este tipo de redes no son muy utilizadas. Por lo tanto, topologías de red enmalladas tienen que ser consideradas para la aplicación en redes de distribución PLC,

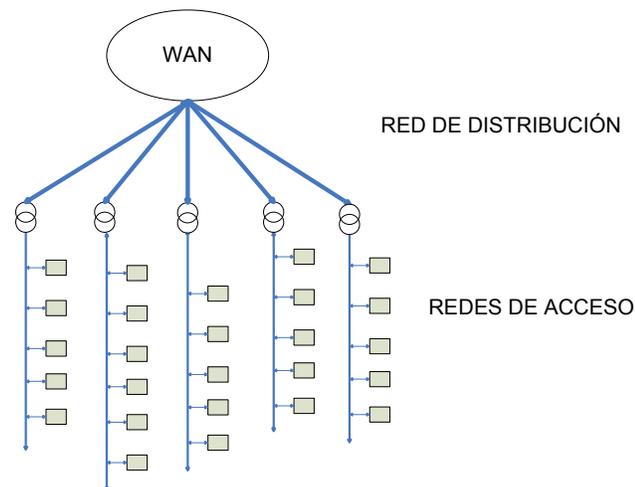
Figura 16 Red de distribución PLC con topología BUS



Una posible solución es una red con una topología en estrella conectando cada red de acceso PLC por separado como se muestra en la figura 17.

RED DE

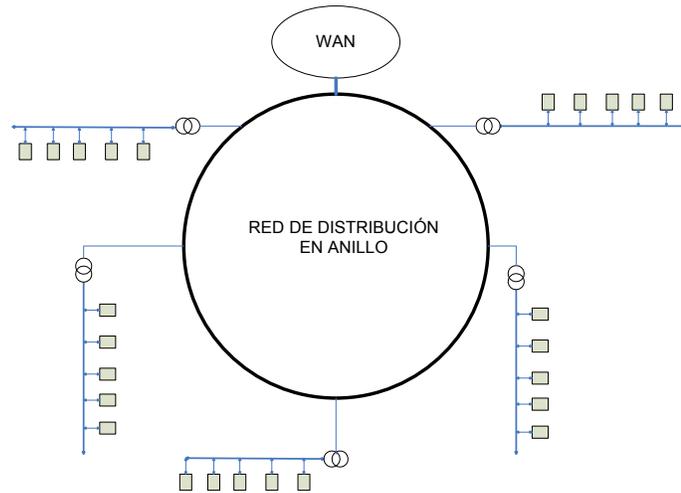
Figura 17. Red de distribución PLC con topología estrella



La topología de red estrella es adecuada para aplicaciones de la tecnología DSL en redes de distribución PLC. Sin embargo, la falla de un simple enlace en la red estrella solo desconecta una red de acceso PLC y no hay posibilidad para la realización de una conexión alternativa de la red de acceso afectada con la red central. Por lo tanto, la aplicación de una red con topología anillo, como se muestra en la figura 18, es una solución muy razonable dado que incrementa en gran medida la confiabilidad de la red. En el caso de una falla en un enlace entre dos nodos del anillo, siempre habrá una oportunidad para la realización de la transmisión por medio de otro camino. Por supuesto, la reorganización de los caminos de transmisión entre las redes de acceso PLC y el nodo central tiene que ser hecho automáticamente dentro de un corto tiempo. Por lo tanto, la tecnología de transmisión aplicada en las redes de nodo central tiene que soportar la implementación en una estructura de red en anillo. Por ultimo, la topología de una red de distribución puede ser también una combinación de las tres topologías explicadas anteriormente, sin embargo, la elección para la topología de red depende de algunos factores tal como:

- La tecnología de comunicaciones usada causa una topología de red específica.
- Disponibilidad de un medio de transmisión dentro del área de aplicación.
- Posibilidad de la realización de redes de distribución confiables
- Estructura geográfica y distribución de redes de acceso de PLC y una oficina de intercambio local.

Figura 18. Red de distribución PLC con topología anillo



2.5 PLC en redes de media tensión

De manera similar a los sistemas de acceso que utilizan redes, las redes de media tensión también pueden ser utilizadas para la realización de varios servicios PLC. Generalmente, la organización de los llamados sistemas PLC a media tensión (PLC MT) no es diferente de las redes de baja tensión. Por lo tanto, las redes PLC de media tensión incluyen los mismos elementos que las redes de baja tensión: Modems PLC, estación base, repetidores y gateways.

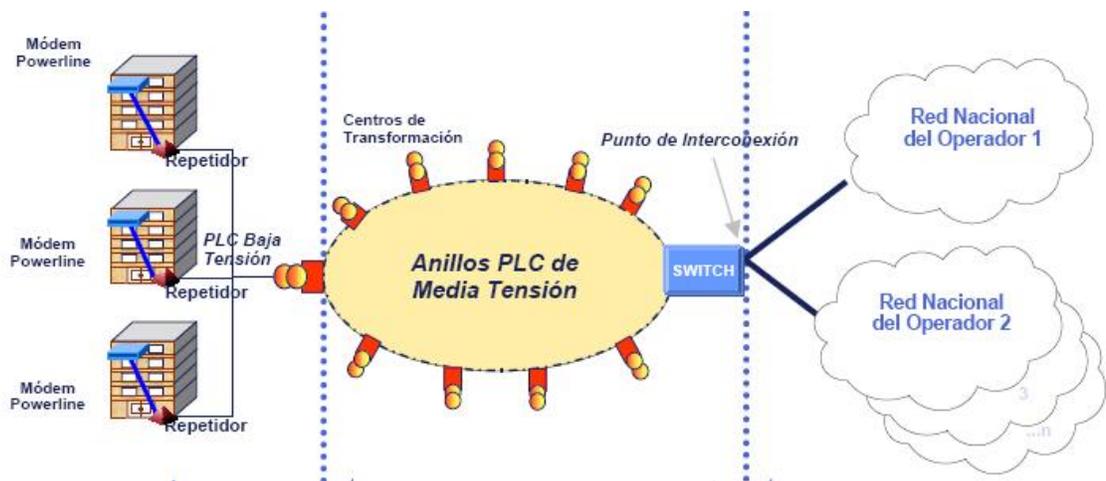
Una red eléctrica de media tensión alimenta varias redes de baja tensión, por lo cual una red PLC de media tensión puede ser utilizada como una red de distribución conectando a un número de redes de acceso PLC al nodo central. En este caso, varias redes de acceso PLC son conectadas a la red de distribución PLC de media tensión con una topología similar a la red de distribución en anillo como se presenta en la figura 18.

Sin embargo, las características de transmisión de las redes de media tensión, consideradas para su aplicación en comunicaciones, son similares a las de las

redes de baja tensión, por lo cual las tasas de transmisión de datos esperadas en las redes de media tensión no son lo suficientemente altas para hacer circular grandes flujos de información, dado lo anterior la utilización de PLC MT puede causar cuellos de botella, por lo tanto, no es aconsejable la utilización de este tipo de redes para la interconexión de una gran cantidad de redes de acceso PLC.

Una red de media tensión puede ser utilizada para la conexión de múltiples redes LAN dentro de un campus (figura 19). De la misma manera, las redes PLC de media tensión pueden ser aplicadas para la realización de varias conexiones punto a punto, lo cual puede ser utilizado para interconectar redes LAN. Hoy en día, las redes PLC de media tensión son principalmente utilizadas para la realización de conexiones punto a punto. Una aplicación de las redes PLC de media tensión es la conexión de antenas para varios sistemas de radio¹⁰.

Figura 19. Estructura de una red de comunicación con PLC MT



Fuente <http://www.mityc.es>¹¹ Consultada: Junio 2006

¹⁰ Tomado de: Ibid., p. 20.

¹¹ Dirección completa: <http://www.mityc.es:80/NR/rdonlyres/60DA2EF3-4174-47E2-B854-D6370737B50F/5627/Endesa.pdf>

3 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES PLC

3.1 Topología de red

La topología de una red de acceso PLC esta dada por la topología de la red de alimentación de energía de baja tensión. Sin embargo, una red de acceso PLC puede estar organizada de diferentes maneras, lo cual puede influenciar en la operación de la red.

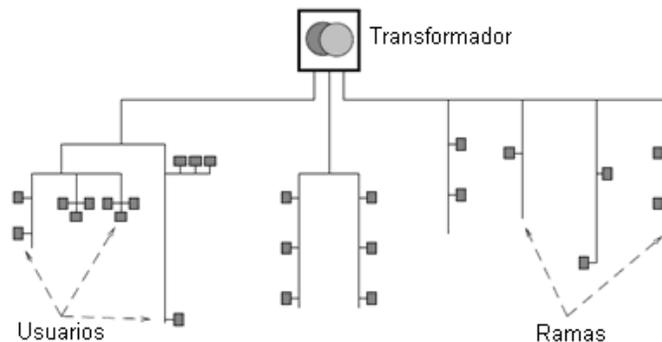
3.1.1 Topología de las redes de energía de baja tensión

Las redes de suministro de energía de baja tensión son construidas de diferentes formas (aéreas o subterráneas, aisladas o desnudas y combinadas) y cada una de las diferentes formas de construir estas redes presenta sus características de transmisión propias, de igual manera, estas redes presentan una topología de red específica la cual depende de factores tales como:

- **Localización de la red:** Dependiendo si la red se encuentra en una zona residencial, industrial o comercial, además si es una zona rural o urbana
- **Densidad de clientes:** El numero de usuarios en una red de baja tensión así como la concentración de los mismos.
- **Longitud de la red:** La mayor longitud entre la unidad transformadora y un cliente dentro de una red, varía de un sitio a otro.
- **Diseño de la red:** Las redes de baja tensión generalmente constan de varias ramas de diferente número de usuarios, lo cual varía de red en red.

La figura 20 muestra una posible estructura de una red PLC, y podemos observar que básicamente la topología de la red es en árbol, donde cada rama de la red puede presentar una topología diferente y además alimentar un número de usuarios diferentes, los cuales pueden estar concentrados o distribuidos.

Figura 20. Topología en árbol de una red de baja tensión



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

Las redes de baja tensión difieren unas de otras y no es posible especificar una estructura de red típica para ellas. Sin embargo, es posible definir algunos valores característicos¹² que se muestra a continuación:

- Numero de usuarios en la red: ~250 a 400
- Numero de ramas de la red: ~5
- Numero de usuarios en una rama: ~50 a 80
- Longitud de la red: ~500 m

¹² HRASNICA., Op cit p. 20

3.1.2 Organización de las redes de acceso PLC

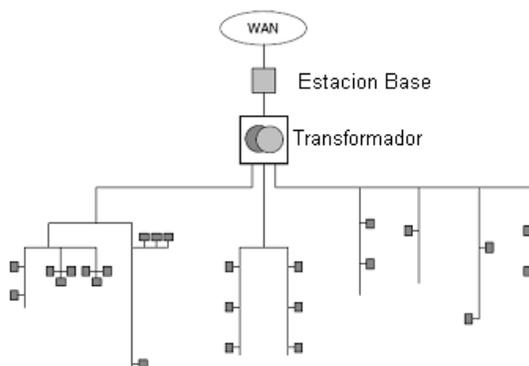
Existen varias posibilidades para la organización de los sistemas de acceso PLC utilizando la misma red de alimentación o utilizando múltiples redes de baja tensión.

3.1.2.1 Posición de la estación base

La estación base conecta la red de acceso PLC a la red de nodo central, por consiguiente esta tiene una localización central en la estructura de la red PLC. Existen dos posibilidades para la ubicación de la estación base:

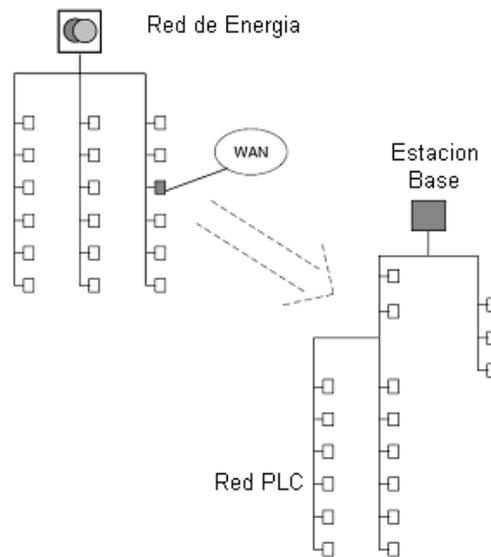
- La estación base se coloca en el transformador y de esta manera la red de acceso mantiene la topología de la red de suministro de energía de baja tensión (Figura 21).
- La estación base se coloca en cualquier lugar dentro de la red de baja tensión, y de esta forma la topología de la red cambia y se vuelve diferente a la topología de la red de suministro de energía (Figura 22).

Figura 21. Red PLC con la estación base en la unidad de transformación



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

Figura 22. Topología de una red de acceso PLC y correspondiente red de baja tensión



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

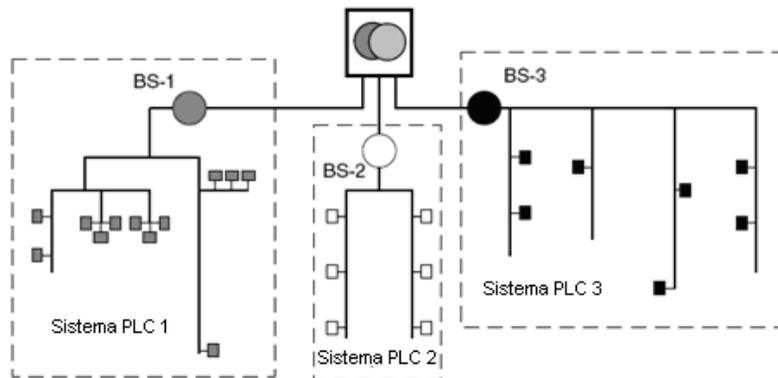
Al mover la estación base a un sitio diferente al del transformador en la red de suministro de energía, esto simplemente causara cambios en las distancias entre la estación base y los usuarios, ya que la topología de la red de acceso PLC permanece con la misma estructura física de árbol.

3.1.2.2 Segmentación de la red

Una red de acceso PLC puede ser hecha utilizando toda una red de baja tensión o simplemente utilizando una parte de ella, pero un opción adicional es la de dividir la red de baja tensión en partes, esto con el fin de reducir el numero de usuarios por cada red de acceso PLC y además reducir la longitud de la misma, esto lo podemos observar en la figura 23, en la cual se muestran tres sistemas de acceso PLC que trabajan sobre cada una de las ramas de una misma red de baja tensión

de forma independiente, y de esta manera, un menor numero de usuarios comparten la capacidad total de la red de acceso

Figura 23. Sistemas de acceso PLC paralelos dentro de una red de baja tensión



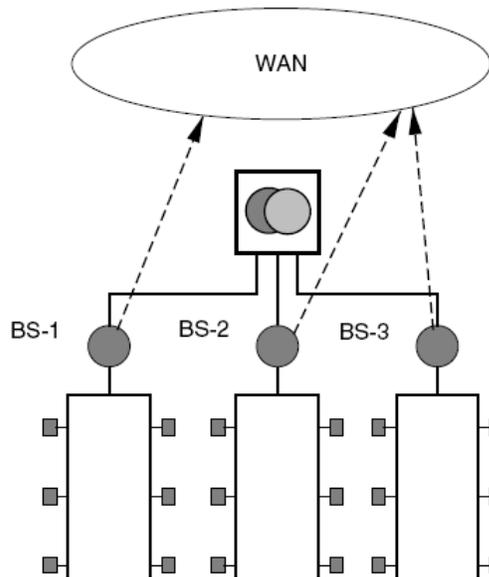
Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

Las ventajas que ofrece segmentar un sistema de acceso PLC como se muestra en la figura 23, es que se tienen longitudes cortas, con lo cual la potencia necesaria la realizar la comunicación es menor que si el sistema no estuviera segmentado, y de esta manera se pueden evitar los posibles problemas de compatibilidad electromagnética, por otro lado se puede discernir que los sistemas PLC individuales dentro de una red de baja tensión también guardan la misma topología física de árbol.

Ahora, ya teniendo los tres sistemas PLC con sus respectivas estaciones base sobre un red de baja tensión descritos anteriormente, cada uno de estos sistemas debe ser conectado a la red central una forma de hacerlo es conectar a cada una de las redes de acceso de manera independiente, tal como se muestra en la figura 24, la segunda manera de hacerlo utilizar la misma red de suministro de energía

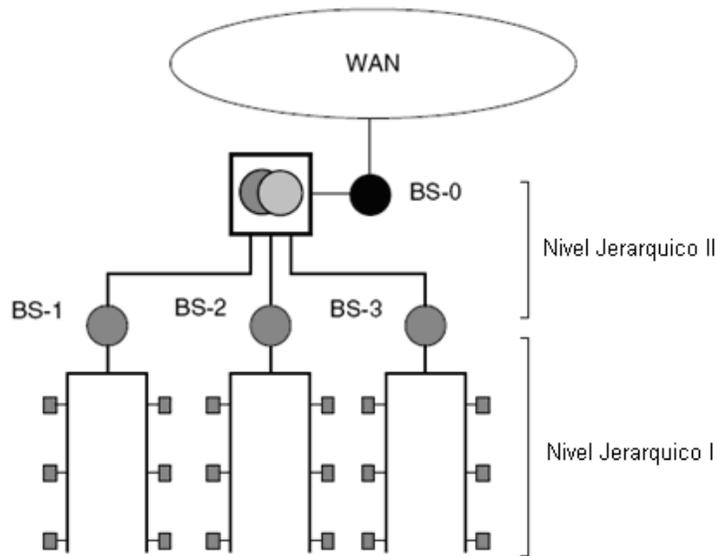
como medio para transmisión para la conexión a una estación base central (Figura 25), la cual se puede conectar a la red central por cualquiera de las formas descritas en el capítulo anterior. De esta manera se obtienen dos niveles jerárquicos sobre el sistema de acceso PLC, pero esta forma de conectar las estaciones base a la red central es desventajosa dado que se reduce la capacidad de red disponible, aunque si las distancias entre la estación base y una estación central de un nivel jerárquico mas alto es corta, se pueden tener velocidades de transmisión de datos relativamente altas y el sistema PLC puede trabajar de una manera eficiente.

Figura 24. Redes de acceso PLC independientes dentro de una red de alimentación de baja tensión



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

Figura 25. Red de acceso PLC con dos niveles jerárquicos



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

3.1.3 Estructura de las redes PLC in-home

Para la realización de redes PLC In-home existen tres posibilidades:

- Una instalación eléctrica casera es utilizada como una simple extensión del medio de transmisión PLC proveído por las redes de baja tensión.
- Una red PLC In-home es conectada por medio de un gateway a una red de acceso la cual puede ser realizada no solo por un sistema PLC sino por cualquier otra tecnología de acceso (como DSL).
- Un red PLC in-home que exista como un sistema independiente.

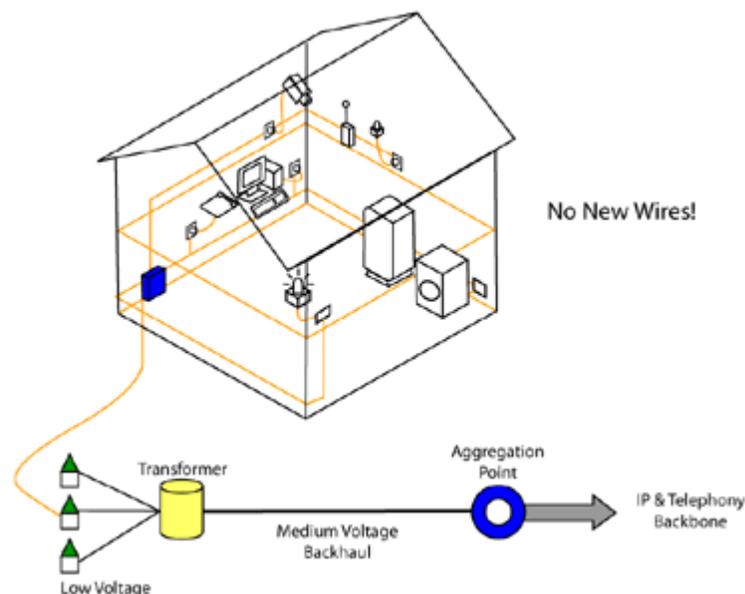
La primera posibilidad sencillamente trata de que la red de suministro interna de una casa no esta dividida de la red de suministro externa, por lo cual la señal transmitida desde la red de acceso pasa a través del medidor de energía de la casa y circula por toda la instalación eléctrica interna de la casa, de forma similar a

lo que se muestra en la figura 26, de esta forma, la conexión a el sistema de acceso PLC esta disponible en cada tomacorriente de la casa.

La posibilidad en la que la red PLC In-home esta conectada a través de un gateway, este ultimo trabaja como usuario y a la ves como una estación base para la red PLC in-home, donde el gateway controla toda la comunicación entre los dispositivos de comunicación instalados al interior de la casa y la comunicación entre la red de acceso y cualquier dispositivo interno.

Cuando una red PLC in-home funciona independientemente, existe una estación base que es la encargada de controlar toda la red PLC In-Home, esta estación es generalmente colocada en el sitio central de la red eléctrica después del medidor de energía, aunque puede se colocado en cualquier lugar del inmueble.

Figura 26. Topología de una red PLC In-home



Fuente: <http://mx.groups.yahoo.com/group/internetmultimedia/message/58>

Consultada: Junio 2006

En contraparte a lo anterior existen algunas redes PLC In-home independientes que están organizadas de manera descentralizadas, lo que resulta en una estructura de red sin estación base PLC, donde la comunicación es hecha por una negociación entre todas las estaciones de la red. Sin embargo, cabe mencionar que la estructura física de la red permanece en una topología de árbol.

3.2 Características de un canal de transmisión PLC

3.2.1 Caracterización del canal

Una línea de suministro de energía en un canal de transmisión inestable debido a las diferencias de la impedancia causada por la cantidad de aparatos que podrían estar conectados a las salidas de la alimentación; dado que las líneas de suministro de energía han sido diseñadas para la transmisión de datos hay características en el canal que son desfavorables para la transmisión de datos tales como ruido y la alta atenuación, la impedancia de las líneas de suministro de energía tiene una particularidad y es que varía muy notoriamente con el aumento de la frecuencia, desde los pocos ohmios hasta unos pocos kilo-ohmios. La impedancia es principalmente influenciada por la impedancia característica de los cables, la topología de la parte de red considerada y la naturaleza de las cargas eléctricas conectadas. Estudios estadísticos muestran que la impedancia característica de las líneas de suministro de energía está en el rango de 100 a 150 Ω , aunque, debajo de los 2 MHz, este valor tiende a caer hacia valores más bajos entre 30 y 100 Ω ¹³.

Diferentes enfoques han sido propuestos para describir el modelamiento de un canal de líneas de energía. Un primer enfoque consiste en la consideración del medio PLC como un canal multicaminos. Este enfoque ha producido resultados

¹³ HRASNICA., Op cit. p. 20

muy parecidos entre los valores medidos y los valores arrojados por el modelo teórico. Sin embargo, tiene dos desventajas muy importantes. La primera, es que tiene un alto costo computacional al calcular el retardo, la amplitud y la fase asociada con cada camino. La segunda desventaja, es que debido a que este es un enfoque en el dominio del tiempo, es necesario tomar en consideración el alto número de caminos asociados con todas las posibles reflexiones de las terminaciones sin correspondencia a lo largo de la línea.

Otro enfoque ha sido propuesto, en el cual el circuito equivalente de propagación del modo diferencial y el modo par a lo largo del cable son derivados, y entonces el modelo resultante es presentado en términos de dos redes de dos puertos en cascada. Una vez que es obtenida la representación de la red de dos puertos el enlace de la línea de energía es representado por medio de matrices de transmisión, también llamadas matrices ABCD¹⁴.

3.2.2 Características del cable de transmisión PLC

El libro Broadband Powerline Communications Network – Network Design de Halid Hrasnica hace el siguiente análisis de las características de los cables de la redes de suministro de energía y dice que la propagación de señales sobre las líneas de energía introduce una atenuación, la cual se incrementa con la longitud de la línea y la frecuencia. Esta atenuación es función de la impedancia característica de la línea Z_L y de la constante de propagación γ . Esos dos parámetros pueden estar definidos por la resistencia R' por unidad de longitud, la conductancia G' por unidad de longitud, la inductancia L' por unidad de longitud y la capacitancia C' por unidad de longitud.

¹⁴ Tomado de: HRASNICA., Op cit. p. 20

$$Z_L = \sqrt{\frac{R'(f) + j2\pi \cdot L'(f)}{G'(f) + j2\pi \cdot C'(f)}}$$

Y

$$\gamma(f) = \sqrt{(R'(f) + j2\pi \cdot L'(f)) \cdot (G'(f) + j2\pi \cdot C'(f))}$$

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f)$$

Considerando una línea de transmisión donde solo la onda generada por la fuente llega al destino con una longitud l , la función de transferencia queda de la siguiente manera:

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

Por pruebas realizadas se ha podido llegar a la conclusión de que $R'(f) \ll 2\pi f L'(f)$ y $G'(f) \ll 2\pi f C'(f)$ a un ancho de banda para PLC (1-30 MHz).

Dado lo anterior tenemos que:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad \text{y} \quad \gamma(f) = \underbrace{j2\pi f \sqrt{L'C'} \frac{1}{2} \cdot \frac{R'(f)}{Z_L} + \frac{1}{2} \cdot G'(f) Z_L}_{\text{parte real}} + \underbrace{j2\pi f \sqrt{L'C'}}_{\text{Parte imaginaria}}$$

Dado que:

$$R'(f) = \sqrt{\frac{\pi\mu_o}{\kappa \cdot r^2}} \cdot f \quad \text{y} \quad G'(f) \approx f$$

Tenemos:

$$\alpha(f) = \text{Re}\{\gamma\} = \frac{1}{2Z_L} \sqrt{\frac{\pi\mu_o}{\kappa \cdot r^2}} \cdot f + \frac{Z_L}{2} \cdot f$$

$$\beta(f) = \text{Im}\{\gamma\} = 2\pi f \sqrt{L' \cdot C'}$$

Tomando en cuenta los resultados dados por las ecuaciones anteriores y los datos de archivos de investigaciones realizadas se llegó a la aproximación siguiente:

$$\alpha(f) = \text{Re}\{\gamma\} = a_o + a_1 \cdot f^k$$

Donde la función de transferencia de la amplitud del canal esta dada por la siguiente expresión: $A(f, l) = e^{-\alpha(f)l} = e^{-(a_o a_1 \cdot f^k)l}$

3.2.2.1 Ancho de banda

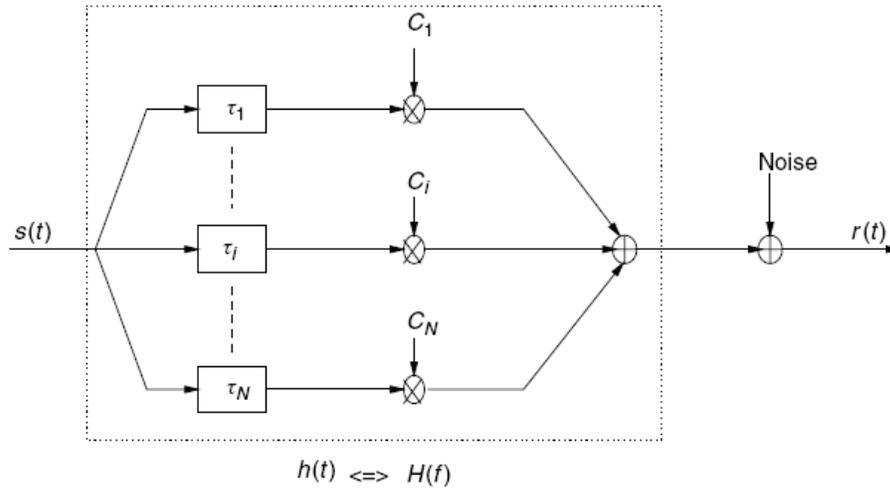
El ancho de banda es proporcional a la tasa de transmisión de datos, por lo tanto un gran ancho de banda es necesario para poder establecer comunicaciones a altas velocidades. Dado que para la tecnología PLC se tiene un ancho de banda entre 1.6 MHz y 30 MHz grandes velocidades pueden ser alcanzadas y por lo tanto aplicaciones como video en tiempo real pueden ser implementadas.

A parte de esto existe un problema muy importante el cual no se puede quedar por fuera, y es que parte de esta banda frecuencia (entre 1.6 MHz y 30 MHz) es asignada a otros sistemas de comunicación y no deben haber disturbios. Otros sistemas de comunicación utilizan estas frecuencias lo cual puede crear interferencia en las redes PLC. como por ejemplo sistemas de comunicación como la radiodifusión, operadores de radio aficionado y los navegadores de los aviones.

3.2.3 Modelamiento de un canal PLC

Además de la dependencia de la atenuación a la frecuencia, en la función de transferencia ocurren muescas, las cuales deben ser difundidas sobre todo el rango de frecuencia. Esas muescas son causadas por las múltiples reflexiones en las impedancias discontinuas. La longitud de la respuesta a los impulsos y el número de los picos ocurridos pueden variar considerablemente dependiendo del ambiente. Esta conducta puede ser descrita por un modelo "ECHO" del canal como se muestra en la figura 27.

Figura 27. Canal PLC multicaminos representado por el modelo ECHO



Fuente: Broadband Powerline Communications Network – Network Design

De acuerdo al modelo ECHO, cada señal transmitida llega al receptor sobre N diferentes caminos. Cada camino i es definido por un cierto retardo τ_i y un cierto factor de atenuación C_i . El canal PLC puede ser descrito por medio de una respuesta al impulso en tiempo discreto como se muestra a continuación:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \delta(t - \tau_i) \Leftrightarrow H(f) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{-j2\pi \cdot f \tau_i}$$

Reemplazando C_i , tenemos

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

Donde g_i es un factor peso, que representa el producto de la reflexión y factores de transmisión a lo largo del camino. Al reemplazar $A(f, l)$, tenemos:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{peso}} \cdot \underbrace{e^{(a_0 + a_1 \cdot f^k)l}}_{\text{atenuacion}} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f \tau_i}}_{\text{retardo}}$$

3.3 Modulación

Las redes de suministro de energía eléctrica dadas sus características son un medio muy hostil para la transmisión de señales de datos, en combinación del hecho de que el medio tiene que ser compartido con la señal de 50 o 60 Hz, por lo anterior es de vital importancia utilizar métodos de modulación de las señales de datos que permitan el mejor desempeño de la red.

En cuanto a la modulación de las señales PLC, las cuales se encuentran en el espectro de 1.6 a 30 MHz, se tienen tres tipos de modulación de las señales que son los que se muestran a continuación, pero existe otro método de modulación que utiliza una combinación de dos métodos de modulación para sacar lo mejor de cada uno y poder tener la máxima eficiencia. Los tres tipos básicos de modulación en la tecnología PLC son:

- DSSSM (Direct Sequence Spread Spectrum Modulation), que se caracteriza porque puede operar con baja densidad espectral de potencia.
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex), que utiliza un gran número de portadoras con anchos de banda muy estrechos.
- GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), que optimiza el uso del ancho de banda.

De los tres la modulación por OFDM es la mas utilizada, dado las altas velocidades que se pueden obtener con este método de modulación, este sistema multiportadora es eficiente y flexible para trabajar en un medio como la red de suministro eléctrico, ya que el rango espectral queda dividido en slots, cuyo ajuste permite que los equipos se adapten de manera dinámica (es decir, en la medida que pasa el tiempo) a las condiciones del medio, dándole mayor potencia a

aquellas frecuencias donde el ruido es menor y cancelando el uso de frecuencias donde el nivel de ruido es alto. Además la flexibilidad de este sistema facilita la posibilidad de reajustar el margen espectral de trabajo de los equipos para no interferir en otros servicios.

La capacidad de transmisión del PLC también varía en función del fabricante, pero el máximo suele establecerse en los 45 Mbps (27 Mbps en el sentido red-usuario, y 18 Mbps en el sentido usuario red), sin embargo juegos de chips de segunda generación de desarrollo reciente han elevado el límite por encima de los 130 Mbps, lo que permite al PLC competir con ventaja con otros sistemas de comunicación de banda ancha¹⁵.

Tabla 1. Velocidades de transmisión máximas de distintas tecnologías

TECNOLOGÍA	VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN
Fast Ethernet	Hasta 100 Mbps
IEEE 802.11b	Hasta 11 Mbps
IEEE 802.11g	Hasta 54 Mbps
PLC (1ª Generación)	Hasta 45 Mbps
PLC (2ª Generación)	Hasta 130 Mbps
PLC (3ª Generación)	Hasta 200 Mbps

Fuente: www.rediris.es/rediris/boletin/68-69/enfoque4.pdf Consultada: Abril 2006

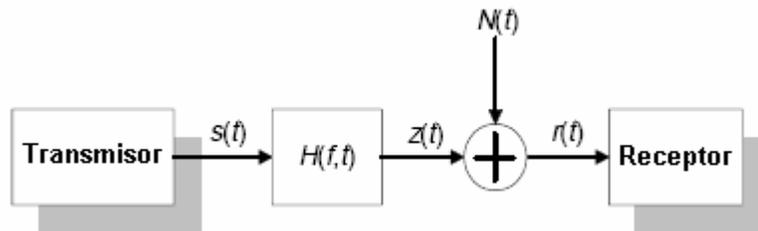
3.3.1 Método de modulación combinado

Una posible forma de solucionar los problemas que acarrear los inconvenientes de las redes de suministro de energía es utilizar un método de modulación muy robusto. Además, si el método de modulación puede controlar la atenuación desconocida y los cambio de fase desconocidos, entonces el receptor puede ser

¹⁵ Tomado de: GONZALEZ J. R., La tecnología PLC en los Programas de Fomento de la Sociedad de la Información de Red.es, pp. 54 – 64, septiembre 2004

simplificado. El problema está en combinar estos requisitos con una tasa de transmisión alta necesaria para las comunicaciones de las computadoras modernas y la limitación de ancho de banda sobre el canal de la línea de energía eléctrica. La figura 28 muestra un modelo de un sistema de comunicación, donde el transmisor transmite una señal $s(t)$, sobre el canal, el cual es modelado como un filtro lineal variante en el tiempo $H(f,t)$. El ruido en el receptor, $N(t)$, es modelado como un AWGN (Additive White Gaussian Noise) ¹⁶.

Figura 28. Modelo de un sistema de comunicación



Fuente: www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theses/pow-line.html
 Consultada: Abril 2006

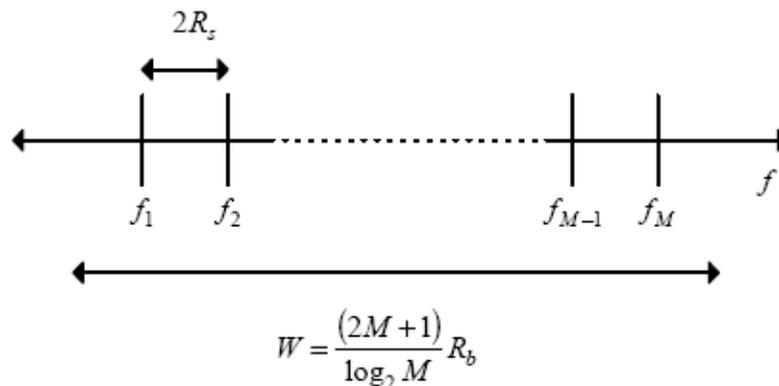
La secuencia de bits de información tiene una tasa de transmisión de R_b bps y un número de señales alternativas (símbolos), son llamados M , por lo tanto la tasa de símbolos es $R_b / \log_2 M$ bps. El Ancho de banda del sistema es W y se asume que la atenuación en esta región es constante. También se asume que la atenuación y el desplazamiento de fase del canal son desconocidos. Otros parámetros importantes son el tiempo de símbolo $T_s = 1/R_s$ y el tiempo de bit $T_b = 1/R_b$ los cuales definen el tiempo necesario para transmitir un símbolo y un bit.

Dos métodos de modulación muy usados son FSK y PSK. La modulación FSK es un método robusto de trabajo incluso cuando la fase y la atenuación son

¹⁶ SELANDER, Lars. PLC Channel Properties and Communication Strategies, 1999

desconocidas, sin embargo, la atenuación es constante dentro del ancho de banda de comunicación. Una desventaja de utilizar FSK es que la eficiencia del ancho de banda es baja; la Figura 29 muestra el ancho de banda estimado, W , de una señal modulada con FSK con M señales alternativas, se asume que el medio ciclo sinusoidal es utilizado. El doble lado del lóbulo principal del ancho de banda (cerca del 99.5 % de la potencia) de este pulso es $3R_s$ y la separación de frecuencia necesitada en este caso obtenida ortogonalmente es $2R_s$

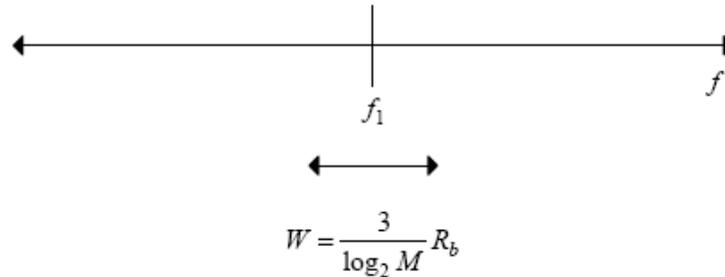
Figura 29. Ancho de banda estimado de una señal FSK



Fuente: www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theses/pow-line.html
 Consultada: Abril 2006

Para PSK, la información es modulada en fase y por lo tanto el método falla si la fase no se conoce, la cual es introducida por el canal y no es compensada por el receptor. La figura 30 muestra el ancho de banda estimado de una señal PSK. También se asume que el medio ciclo sinusoidal es usado. El ancho de banda decrece cuando M se incrementa, por lo tanto la eficiencia del ancho de banda incrementa con el incremento del número de símbolos.

Figura 30. Ancho de banda estimado para una señal PSK



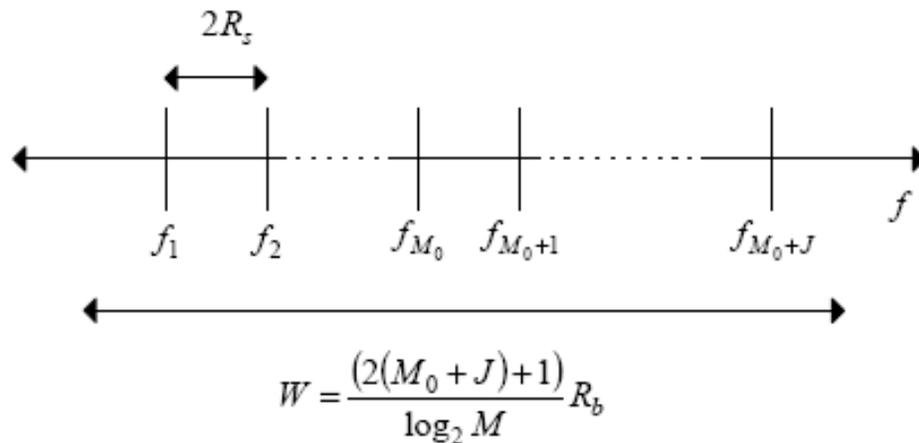
Fuente: www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theses/pow-line.html
Consultada: Abril 2006

Una extensión de PSK es DPSK (Differential Phase Shift Keying) es usado cuando la fase es desconocida. La eficiencia de ancho de banda de DPSK es alta, la misma que para PSK, pero requiere ser la fase ser estable (lentamente variable) durante al menos dos intervalos de símbolo¹⁷.

Ya explicado FSK y PSK ahora podemos tener en cuenta el siguiente método. El método consiste en una señal modulada con FSK (con M_o señales alternativas) y J señales moduladas con PSK, donde a cada señal PSK se le permite tener un número arbitrario de señales alternativas. La señal FSK es usada dos veces. Lleva la información y también utilizada en el receptor para estimar la fase recibida en la señal PSK. Por que el receptor no es dependiente de la atenuación y la fase del canal, dentro de la banda de frecuencia W , el sistema trabajara sobre canales en donde la atenuación y el deslizamiento de fase sean desconocidos. La figura 31 muestra el ancho de banda estimado del método de modulación.

¹⁷ Las explicaciones de PSK y FSK fueron tomadas de: Ibid., p. 46

Figura 31. Ancho de banda estimado para el método de modulación combinado



Fuente: www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theses/pow-line.html
 Consultada: Abril 2006

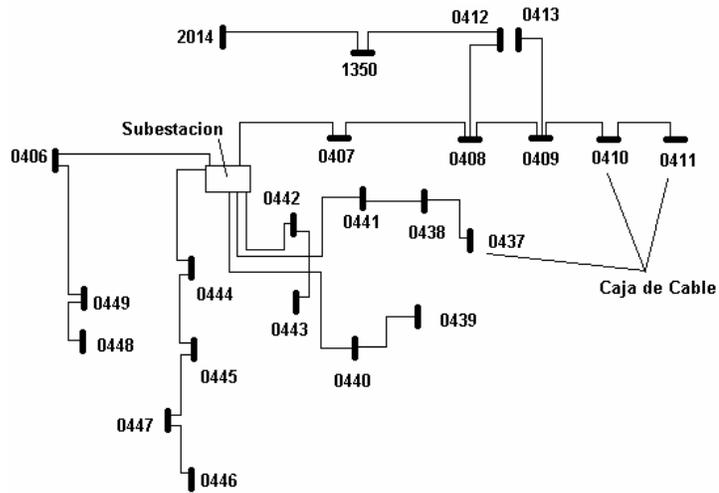
3.4 Influencia de la carga en la comunicación

Para poder entender de forma más sencilla el efecto de la carga sobre la comunicación es preferible utilizando un estudio¹⁸ con datos reales dando a mostrar la magnitud del efecto de la carga.

Tomando en cuenta la siguiente figura para reconocer el sitio donde se conectan las cargas.

¹⁸ Ibid., p. 46.

Figura 32. Red De Baja Tensión

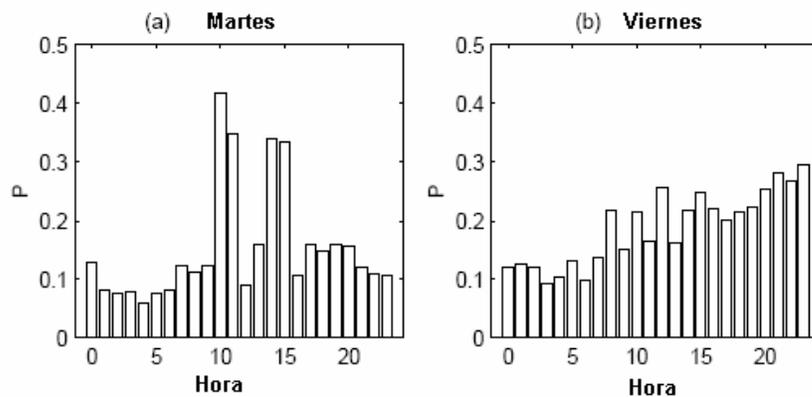


Fuente: www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theses/pow-line.html
 Consultada: Abril 2006

3.4.1 Efecto de la carga cuando es conectada a la subestación

Al colocar una carga en la subestación denotada en la figura 32 se puede notar en la figura 33 que realmente existe un efecto sobresaliente de la carga al ser conectada.

Figura 33. Promedio de todos los indicadores de deficiencia en el canal (P)



Fuente: www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theses/pow-line.html
 Consultada: Abril 2006

En la figura 33.a se muestra el resultado de conectar la carga a la subestación, la carga fue conectada en dos intervalos de 10 a 12 del medio día y de 2 a 4 P.M. Se puede observar claramente que las deficiencias del canal incrementan considerablemente en estos dos intervalos. El incremento de las deficiencias es del 15% al 35 o 40%. También fue encontrado que el número de casas que requería al menos una retransmisión aumentó de 10 a 30 casas cuando la carga estaba se encontraba conectada.

3.4.2 Efecto de la carga cuando es conectada a una caja de conexiones

De igual manera que en la anterior se tiene el mismo sistema de baja tensión que se muestra en la figura 32, pero ahora la carga será conectada en una caja de conexiones (N° 0447). Esta caja está ubicada a 220 m de la subestación. La línea de baja tensión correspondiente, sobre la cual es conectada, energiza a 16 casas conectadas con cuatro cajas de cables. Primero, la carga estaba conectada durante una hora a la vez, entre 8-9 a.m., 10-11 a.m. y las 12 MD. - las 1 p.m. De allí en adelante la carga estaba conectada entre 2-12 MN.

Tomando como referencia la figura 33.b, aquí se muestra que en esta ubicación la carga no degradó la calidad de canal en gran medida como cuando estaba ubicada en la subestación. El promedio de los indicadores de deterioro del canal se incrementaron de 15 % a 20-25 %. Una razón es la larga distancia entre la carga y la subestación. Por lo tanto, no muchos canales de comunicación son afectados por la carga. Solamente 25 % de las familias que están conectadas con esta línea de baja tensión, asumiendo que la carga no causa demasiada interferencia a otras líneas de baja tensión donde el valor de P debe ser bajo¹⁹.

¹⁹ Ibid., p. 46.

4 TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN PLC

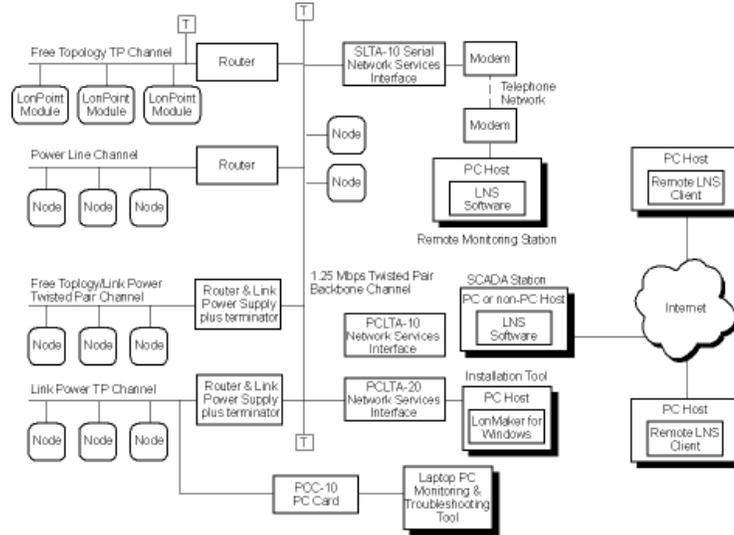
4.1 LonWorks (Local Operation Networks)

La tecnología Redes de Operación Local (LonWorks) fue desarrollada por Echelon y esta básicamente es un estándar abierto con un sistema de control altamente distribuido en vez de un sistema centralizado con una arquitectura peer to peer, permitiendo interoperabilidad entre los diversos fabricantes, lo cual es un beneficio súper importante para cualquier sistema que se desee implementar, además de esto los sistemas LonWorks utilizan los sistemas de control basados en la información y no los sistemas de control basados en comandos los cual ya estan obsoletos. Dentro de los elementos típicos que utilizan los sistemas LonWorks tenemos sensores, actuadores, programas, redes de comunicación, interfaces hombre-máquina (HMI) y herramientas para el manejo de redes, lo cual facilita el uso de la tecnología en las diversas aplicaciones de esta.

Los dispositivos o nodos que se usan en esta tecnología, se comunican unos con otros utilizando protocolos de comunicación estándar en la capa física que puede ser par trenzado, fibra óptica, radio, infrarrojo, entre otros; Además cada nodo posee su propio programa de aplicación y la lógica de control se distribuye a través del sistema. Cada programa se adapta con solo cambiar los parámetros de configuración. Por último las interfaces hombre-máquina (HMI) y las herramientas para manejo de redes se pueden disponer de cualquier fabricante y se puede acceder a todos lo puntos de datos por medio de los protocolos de comunicación comunes²⁰. Esto se ilustra en la siguiente figura.

²⁰ HUSSAIN ZUBERI, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems. Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2003 .

Figura 34. Sistema de control distribuido LonWorks



Fuente: odisea.ii.uam.es/esp/recursos/Lonwork.htm Consultada: Junio 2006

La tecnología LonWorks utiliza las llamadas variables de red (Network Variables), las cuales le dan facilidad a los diseñadores de plantear nuevos dispositivos e integrarlos al sistema sin que existan inconvenientes graves. Dentro de las ventajas que ofrece el uso de esta tecnología para su uso en las redes PLC están compatibilidad, facilidad de uso de las Interfaces Hombre-Máquina (HMI) y las herramientas para manejo de redes, reducción de costos de cableado, confiabilidad, corto tiempo de diseño, diversas opciones de mantenimiento que ofrecen diferentes vendedores y facilidad de implementar nuevas funcionalidades.

4.1.1 Tecnología LonWorks

La tecnología LonWorks esta compuesta de tres elementos principales:

- Los procesadores de control Chip Neurona (Neuron chip) y los transceivers
- El protocolo de comunicación LonTalk
- Los servicios de red LonWorks (LNS)

Los procesadores chip neurona son el control central físico de los sistemas LonWorks, pues cada dispositivo LonWorks posee un chip neurona, los cuales son sistemas on-chip con múltiples microprocesadores, memorias RAM y ROM, puertos de comunicaciones e interfaces de entrada/salida, y donde cada chip neurona posee un código único en el mundo de 48 bits, llamado identificador de neurona (Neuron ID). Al mismo tiempo cada chip neurona posee un transceiver (transmisor- receptor) el cual hace las veces de modulo interfaz entre el chip neurona y el medio físico, cabe mencionar que estos transceiver pueden ser utilizados sobre una gran variedad de medios como par trenzado, PLC, RF, infrarrojo, fibra óptica y cable coaxial. Es de saber que Los procesadores de control Chip Neurona y los transceivers son en los dispositivos Lonworks la parte correspondiente a Hardware, mientras que el protocolo de comunicación LonTalk y los servicios de red LonWorks hacen parte del Software en los dispositivos Lonworks.

El protocolo de comunicación LonTalk es un protocolo serial peer to peer dividido en capas, cuya unidad de datos es el paquete. El protocolo LonTalk se basa en la arquitectura de niveles de la Organización de Estándares Internacional (ISO) y esta diseñado para cumplir los requisitos específicos de los sistemas de control en lugar de los requisitos de los sistemas de procesamiento de datos. LonTalk ha sido creado dentro del marco del control industrial por lo que se enfoca a funciones de monitorización y control de dispositivos. Dentro de este marco se han potenciado una serie de características, Fiabilidad, Variedad de medios de comunicación, Tiempo de Respuesta y Bajo coste de los productos²¹.

Los servicios de red LonWorks (LNS) los cuales tienen arquitecturas cliente-servidor que permiten la interoperabilidad de las herramientas de la red LonWorks. LNS permite a los diseños de componentes basados en software una nueva generación de herramientas que pueden trabajar juntas para instalar, mantener,

²¹ Tomado de: <http://odisea.ii.uam.es/esp/recursos/Lonwork.htm> Consultada: Junio 2006

monitorear y controlar las redes LonWorks. También permite facilidad de integración de sistemas de control con otra información del sistema.

4.1.2 Componentes del sistema LonWorks

Un sistema típico LonWorks esta formado de tres tipos de componentes:

- Dispositivos LonWorks
- Canales
- Herramientas de Red

Básicamente los dispositivos LonWorks no son mas que los que se encargan de sensar y controlar el estado de los componentes que componen el sistema físico que esta siendo controlado y de acuerdo con los requerimientos del sistema tambien pueden haber sensores embebidos, actuadores, interfaces de entrada/salida para futuros sensores y actuadores externos o interfaces de computadores. De acuerdo con algunas aplicaciones que requieren alta velocidad los dispositivos LonWorks puede ser dotado de chips neuronas con velocidades de procesamiento mayores para facilitar la ejecución de las aplicaciones.

Un canal es un medio físico de comunicación al cual un grupo de dispositivos LonWorks están conectados por Tranceivers. Cada tipo de canal tiene diferentes características en términos de número máximo de dispositivos conectados, velocidades de comunicación y limites físicos de distancia. En la tabla 2 se resume las características de los tipos de canales mas usados, y se puede notar que la tecnología PLC puede conectar un numero ilimitado de dispositivos.

Las Herramientas de red son programas para instalación de la red, configuración, monitoreo, supervisión y control y mantenimiento y estas herramientas de red

residen en un chip neurona o en cualquier otra plataforma como portátiles o computadoras personales.

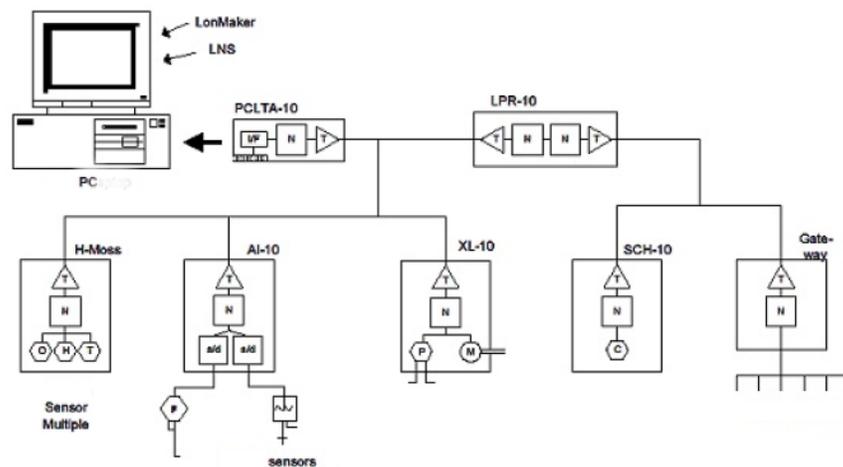
Tabla 2. Características de los tipos de canales

Tipo de Canal	Medio	Data Rate	Nº Max. Dispositivos	Distancia Max.
TP/XF-1250	Par trenzado, bus	1,25 Mbps	64	125 m
TP/XF-78	Par trenzado, bus	78 kbps	64	1330 m
TP/FT-10	Par trenzado, topología flexible	78 kbps	64	500 m
PL-20	Powerline	5 kbps	Sin limite	Determinado por la atenuación

Fuente: HUSSAIN, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems

Los componentes de un sistema LonWorks se muestran en la siguiente figura, donde se muestran diversos dispositivos LonWorks y además se pueden observar los chips neurona y Transceivers los cuales estan designados con N y T respectivamente²².

Figura 35. Anatomía de varias categorías de dispositivos LonWorks



Fuente: HUSSAIN, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems

²² HUSSAIN., Op cit., p. 52.

4.2 Consumer Electronic Bus (CEBus)

El Bus Electrónico del Consumidor (CEBus) es un estándar abierto desarrollado por la Asociación Industrial Electrónica EIA, el cual puede ser utilizado sobre diferentes medios de transmisión tales como: la red eléctrica, par trenzado, cable coaxial, RF Broadcast e infrarrojo. El estándar CEBus en un principio (1984) se desarrollo para unificar los protocolos de señalización infrarroja para el control de remoto de electrodomésticos, pero mas tarde (1992) se extendió su uso y este comenzó a abarcar la industria de la demótica. Dentro de las características que presenta el sistema CEBus se puede encontrar que este posee como unidad de datos el paquete y es orientado a la no conexión, al igual que LonWorks posee una arquitectura peer to peer que emplea el protocolo Carrier Sense Multiple Access/Carrier Detect Contention Resolution (CSMA/CD CR).

Los dispositivos de CEBus básicamente constan de dos partes:

- Un microcontrolador
- Un transceiver

Donde el microcontrolador realiza toda la parte de control y procesamiento de los datos mientras que el transceiver realiza las veces de transmisor – receptor, transmitiendo los datos a velocidades cercanas a los 10 kbps

Todo los dispositivos CEBus utilizan un lenguaje de comunicación para establecer contacto con los demás dispositivos, este lenguaje es el CAL (Commun Appliance Language), el cual es un elemento de la capa de aplicación y es un lenguaje orientado a comandos que permite controlar dispositivos CEBus y asignar recursos²³.

²³ <http://odisea.ii.uam.es/esp/recursos/Cebus.htm> Consultada: Junio 2006

4.2.1 Tecnología CEBus

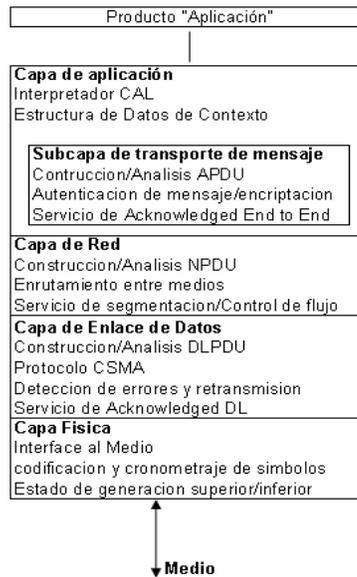
CEBus usa la tecnología de espectro extendido (spread spectrum), que básicamente trata de extender la señal transmitida sobre un rango de frecuencias desde 100 kHz a 400 kHz, en vez de utilizar una sola frecuencia. Todos los sistemas CEBus tienen dos canales, el primero es utilizado para el transporte de pequeños paquetes, el segundo canal es para transferencia de gran cantidad de datos, además de esta particularidad los sistemas CEBus poseen características tales como detección de errores, reintento automático, reconocimiento end to end, rechazo de paquetes duplicados, autenticación para prevenir violaciones y encriptación para asegurar privacidad.

CEBus utiliza un canal de comunicación de control, el cual tiene un tamaño de paquetes fijo y una tasa de señalización, y su única función es la de controlar los dispositivos y los recursos de red. Dentro de la tecnología CEBus es de resaltar que los canales utilizados para datos poseen anchos de bandas que soportan grandes velocidades de transmisión y por lo tanto pueden ser usados para compartir aplicaciones de video y audio entre computadoras.

4.2.2 Protocolo CEBus

CEBus utiliza un protocolo de comunicación peer to peer orientado a la no conexión llamado CSMA/CDCR (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection and Collision Resolution). El protocolo CEBus aplica el modelo OSI dentro de su estructura, pero solo utiliza las capas física, de enlace de datos, red y aplicación (Figura 36). Además de las funciones propias del modelo OSI tradicional el estándar CEBus define las características propias de cada uno de los medios permitidos así como una especie de intérprete del lenguaje de aplicación.

Figura 36. El modelo de capas del protocolo CEBus



Fuente: HUSSAIN, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems

4.2.3 Estructura Del Paquete CEBus

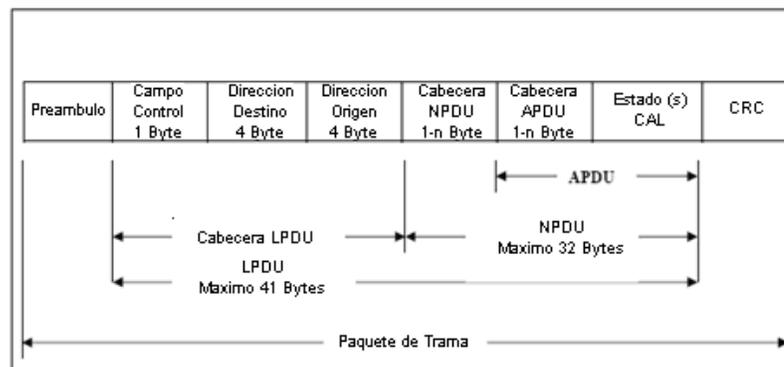
El sistema CEBus utiliza como unidad de datos el paquete, pero este en su estructura se divide en cuatro partes como se muestra en la figura 37:

- La unidad de datos del protocolo de enlace (LPDU)
- la unidad de datos del protocolo de red (NPDU)
- la unidad de datos del protocolo de aplicación (APDU)
- el mensaje CAL

El encabezado LPDU contiene la dirección de la fuente y del destinatario el campo de control el cual especifica el tipo de paquete, su prioridad y la clase de servicio de la capa de enlace de datos (DLL). La NPDU que es generada por la capa de red, contiene la APDU y el enrutamiento de la red y los mensajes de segmentación como información de cabecera. La APDU que es generada por el mensaje de la

subcapa de transporte, contiene el mensaje CAL y el servicio de reconocimiento necesario de la capa de aplicación y el servicio de seguridad (autenticación y encriptación) de la información de cabecera. Por ultimo, estan el preámbulo y el código de redundancia cíclica (CRC). En cuanto a las direcciones de los nodos CEBus, estos poseen una dirección del sistema y una dirección del nodo, donde la primera es la misma para todos los nodos de la casa mientras que la dirección de un nodo dentro de una casa es única.

Figura 37. Estructura del paquete CEBus



Fuente: www.intellon.com Consultada Junio 2006

Dentro de las características de los sistemas CEBus es de vital tocar el tema de las velocidades de transmisión de las señales, dado que CEBus utiliza la tecnología de espectro extendido y para Estados Unidos se estandarizo un rango de frecuencia de 100 kHz a 400 kHz y para Europa se estandarizo un barrido de 20 kHz a 80 kHz, se tiene que para estados Unidos se alcanzan velocidades de hasta 10 kbps mientras que en Europa la velocidad de transmisión de datos es 2 kbps pero conservando la velocidades de procesamiento.

4.3 Passport y plug-in PLX

Esta tecnología de comunicación fue desarrollada por la compañía Intelogis Inc, y es considerada la tecnología PLC original. Passport utiliza la técnica de modulación FSK para la transmisión de los datos.

Dentro de las características que tiene el sistema passport esta el hecho de que utiliza una arquitectura de red Cliente/Servidor, el cual es una estructura totalmente centralizada donde existe un computador central el cual controla todos los movimientos que suceden al interior de la red de comunicaciones, además de esto al utilizar el método de modulación FSK se corre el riesgo de que cualquier cosa que interfiera con cualquiera de las dos frecuencias utilizadas en la modulación puede romper el flujo de datos, causando que el computador emisor de datos tenga que reenviarlos por completo, de igual forma otras características de esta tecnología son las siguientes:

- Velocidad de conexión desde 50 Kbps hasta 350 Kbps
- El desempeño se afecta por la energía o potencia de la casa y por los cables viejos.
- Las características de impresión son limitadas.
- Sola trabaja con el sistema operativo de Microsoft Windows
- Solo trabaja con líneas estándar de 110 V
- Todos los datos necesitan ser encriptados para asegurar la red.

La tecnología Plug-in PLX utiliza una combinación de las técnicas DSMA (Datagram-Sensing Multiple Access) y CPT (Centralized Token Passing). La técnica DSMA actúa de forma similar a lo que ocurre en las redes Ethernet donde un nodo al entrar a la red por primera vez detecta todos los demás paquetes que se han transmitido por el medio y solo envía el suyo si el medio esta despejado, una vez que todos los nodos se conocen o ubican a cada uno se forma un

esquema CPT el cual evita las colisiones y contenciones multinodo logrando un alto rendimiento²⁴.

4.4 X-10

X-10 es un protocolo de comunicación para aplicaciones de domótica utilizando como medio de transmisión la red eléctrica interna de las casas, pero esta tecnología presenta desventajas en cuanto a los dispositivos, ya que estos son susceptibles a daños debido a picos de voltaje y además las atenuaciones y ruidos en las líneas eléctricas generados por los aparatos domésticos o por fuentes externas, pueden interferir en las comunicaciones a través del protocolo X-10. Otro problema que existe con este sistema es la interferencia que puede existir entre los comandos de dos casas cercanas, otro problema de los sistemas X-10 es que puede surgir fallas imprevistas inevitables en las redes. El protocolo X-10 está especificado para hacer referencia a cuando exactamente los módulos deben ser direccionados y cuando no, por ejemplo cuando los módulos pasan de un estado no direccionado a un estado direccionado y viceversa.

El formato de código X-10 fue introducido por primera vez en 1978 por la compañía X-10 Inc, para los sistemas de control en casa y para el sistema de potencia llamado Radio Shack Plug 'n'. Esta tecnología tiene más de 30 años y se desarrolló inicialmente para integrar a bajo costo los sistemas de iluminación y los dispositivos de control.

La velocidad de transmisión de los datos sobre los sistemas X-10 es solo de 60 bps, razón por la cual la utilización de este sistema no es utilizado en las aplicaciones de acceso a Internet, y por el contrario su propósito principal es en el control de las aplicaciones de domótica.

²⁴ HUSSAIN., Op cit., p. 52.

A través de la tecnología X-10 y también por medio de los foros que existen sobre el tema se realizan diseños, avances, fabricaciones y muestran el mercado de productos que están basados en este estándar.

4.4.1 Teoría de la transmisión en X-10

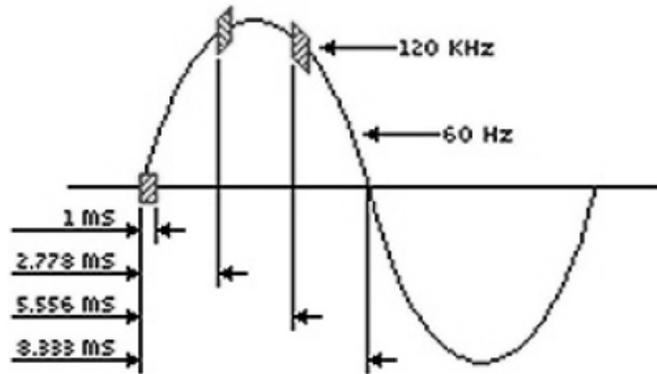
Básicamente la forma de transmisión de los datos en los sistemas X-10 es la de enviar las transmisiones de datos lo mas cerca del cruce por cero de la señal de 50 o 60 Hz de la red eléctrica (mas exactamente a 200 μ s del punto de cruce por cero de la señal eléctrica, Figura 38)

Un número binario 1 se representa por una ráfaga de 120 KHz de 1 ms de duración desde el punto de cruce por cero y un número binario 0 se representa por la ausencia de 120 KHz. Los dispositivos X-10 modulan sus entradas con 120 KHz, por lo tanto solo la envolvente de 1 ms se debe aplicar a sus entradas. Esta ráfaga de 1 ms debe ser transmitida tres veces para que coincida con el punto de cruce por cero de todas las tres fases en un sistema de distribución trifásico²⁵.

Una transmisión completa comprende 11 ciclos de la señal AC, donde los primeros dos ciclos representan el código de inicio (Star Code), Los cuatro siguientes representan el código de la casa (House Code) y los últimos cinco ciclos representan un número ente 1-16 o un código de función (on, off, etc.). El bloque completo siempre debe ser transmitido en grupos de 2 con 3 ciclos de la señal AC entre cada grupo de 2 códigos. La figura 39 muestra la transmisión completa.

²⁵ HUSSAIN., Op cit., p. 52.

Figura 38. Relación de tiempo de las señales X-10



Fuente: HUSSAIN, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems

Figura 39. Ciclos de una transmisión de código X-10.



Fuente: HUSSAIN, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems

4.5 PowerPacket

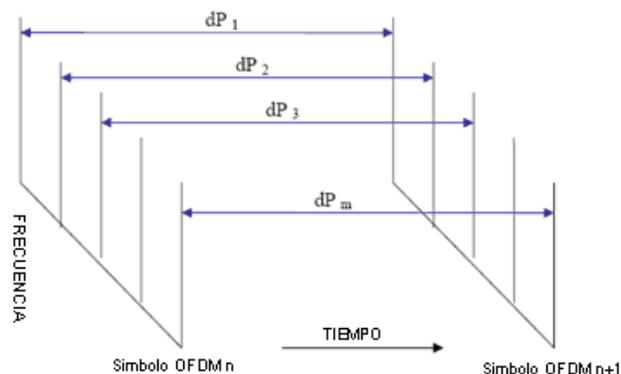
PowerPacket es una tecnología desarrollada por la compañía Intellon, y prácticamente esta tecnología se basa en una versión de OFDM que es esencialmente la transmisión simultánea de muchas portadoras de banda angosta, donde cada una es modulada con una tasa de transmisión baja, pero el total produce una tasa de transmisión de datos muy alta. Gracias a la modulación por OFDM la tecnología PowerPacket tiene tasas de transmisión de datos de hasta 14 Mbps sobre redes de suministro de energía, dado la gran velocidad de transmisión

de datos PowerPacket soporta servicios tales como VoIP y Calidad de Servicio los cuales soportaran las nuevas aplicaciones multimedia y telefónicas a los usuarios.

4.5.1 Tecnología PowerPacket

La capa física PowerPacket utiliza OFDM como la técnica de modulación básica. El flujo de datos de alta velocidad a ser transmitido es procesado como múltiples flujos de datos por OFDM, donde cada uno tiene una tasa de transmisión baja. Cada flujo de baja tasa de transmisión de datos modula una portadora de una serie de portadoras estrechamente espaciadas. El espaciamiento de la portadora es escogido para ser igual al inverso de la tasa de transmisión para conseguir ortogonalidad. La necesidad de igualación en PowerPacket es completamente eliminada por el uso de diferentes modulaciones de fase. La figura 40 muestra la modulación de fase diferencial, donde los datos son codificados como la diferencia de fase entre el símbolo actual y el anterior al tiempo en la misma portadora²⁶.

Figura 40. Modulación Diferencial PowerPacket



Fuente: Applicability Of Power-Line Communications To Data Transfer Of On-Line Condition Monitoring of Electrical Drives.

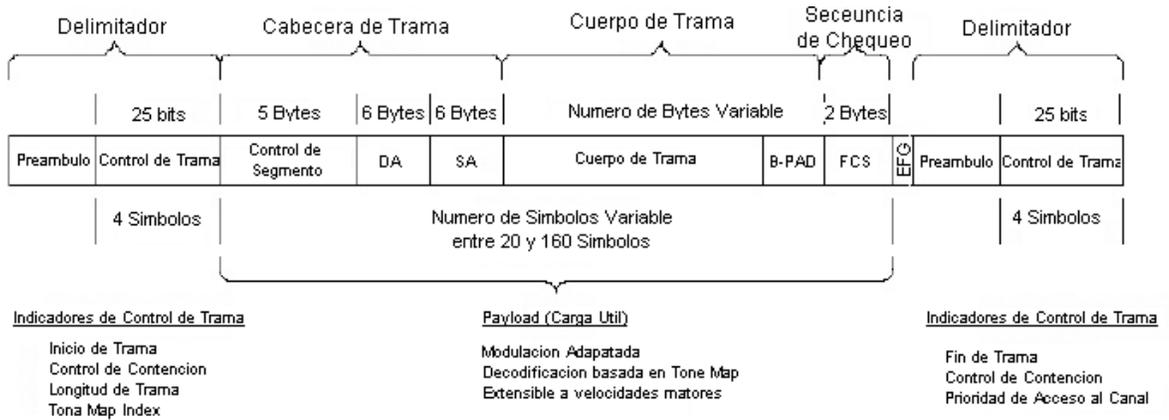
²⁶ HUSSAIN., Op cit., p. 52.

4.5.2 Formato de la trama PowerPacket

La trama de transmisión PowerPacket consiste de un delimitador de comienzo de trama, una carga útil (payload) y un delimitador de finalización de la trama, como se muestra en la figura 41. Los delimitadores de la trama comprenden una secuencia de preámbulo que es seguida por un TPC (Turbo Product Coding) codificado en el campo de control de la trama. La secuencia de preámbulo es un patrón conocido escogido para ser detectado de manera confiable sin considerar las condiciones del canal. Las transmisiones unicast son reconocidas por la transmisión de un delimitador de respuesta. La trama de inicio, la trama de finalización, y los delimitadores de respuesta, todos tienen la misma estructura de símbolos pero contienen campos pertinentes a sus funciones. La porción de carga útil de una trama se adapta de acuerdo a la calidad del canal entre el transmisor y el receptor, donde la adaptación ocurre en tres formas: Por no utilizar la misma portadora para el transporte de datos, por cambiar la modulación de esas portadoras en uso de DQPSK y DBPSK, y por cambiar la tasa FEC convolucional entre $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$.

El protocolo MAC en la tecnología PowerPacket es una variación del protocolo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), similar a la especificación IEEE 802.11. El protocolo MAC de PowerPacket usa una estrategia clásica, Escuchar-antes-de-Hablar y transmisión después de un retardo al azar seleccionado para evitar las colisiones.

Figura 41. Formato de trama PowerPacket



Fuente: HUSSAIN, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems

4.6 Tecnología Homeplug de Cogency

Por último se encuentra la tecnología HomePlug que ha sido desarrollada por cogency, esta tecnología combina OFDM, Codificación de Señales y Técnicas de Corrección de Errores. La tecnología HomePlug incluye las capas Física y MAC del modelo de red, donde en la primera implementa las técnicas de modulación, la codificación y formatos de paquetes básicos, mientras que la capa MAC utiliza un protocolo CSMA/CA para mediar el acceso entre múltiples usuarios.

Las capas física y MAC de Cogency proveen equalización por paquete y acceso eficiente al medio Powerline de manera compartida. Adicionalmente una solución propietaria permite aplicaciones como voz sobre IP (VoIP) y juegos multijugadores. Las capas físicas y MAC de Cogency utilizan la tecnología OFDM para transmisión a alta velocidad con bajos errores de bits. La modulación OFDM genera un juego de tonos en el dominio de la frecuencia. Los tonos son ortogonales entre sí, asegurando de esta manera que haya interferencia entre tonos. La pérdida de algunos tonos puede ser compensada con codificación FEC (Forward Error Correction) la cual codifica los datos de forma redundante a través

de todos los tonos activos. Si alguno de los tonos no es recibido ya sea por el ruido o por otro efecto, las portadoras restantes pueden ser utilizadas para recuperar la señal original. La adaptación automática del canal permite al sistema responder antes las condiciones en la línea de energía.

Los tonos son modulados usando BPSK diferencial (76 bits por símbolo OFDM) o QPSK (152 bits por símbolo OFDM). Para canales difíciles o cuando la adaptación del canal no ha sido bien hecha, la carga útil es enviada utilizando el modo ROBO (ROBust OFDM). El modo ROBO utiliza todos los tonos disponibles con modulación BPSK diferencial sobre cada tono. Cada paquete de datos en esta tecnología lleva una serie de símbolos OFDM así como se muestra en figura 42. El paquete de datos consiste de un delimitador de inicio de trama una carga útil y un delimitador de finalización de la trama, un delimitador de respuesta es transmitido para indicar si la transmisión fue o no bien recibida²⁷.

Figura 42. Formato de trama de HomePlug de Cogency



Fuente: HUSSAIN, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems

Los paquetes de datos pueden ser transmitidos de dos maneras: A todas las estaciones base o a una estación en específico, cuando es enviada a una sola estación, un juego específico de tonos debe ser utilizado. Tanto la estación transmisora así como la receptora coinciden en un mapa de tono óptimo que maximiza la capacidad. En el segundo caso se utilizan todos los tonos.

²⁷ COGENCY SEMICONDUCTOR INC. “Data Communications over Power Lines”, White Paper,

5 APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA PLC

Dentro de las aplicaciones que presenta la tecnología PLC se caracterizan básicamente dos líneas que son la utilización de PLC como tecnología de acceso a Internet y como Red de Área Local, aunque se realizan investigaciones, sobre todo en España y Chile, para el mejoramiento de esta tecnología y donde se encuentran mas adelantados en esta tecnología²⁸.

5.1 Acceso a Internet

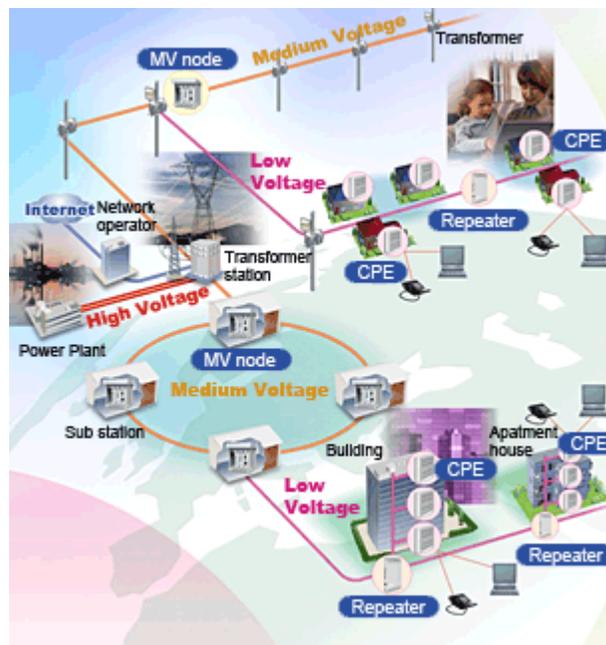
El acceso a Internet mediante PLC utiliza las frecuencias comprendidas entre 3 y 10 MHz, que son, dentro del espectro PLC, aquellas con mejor respuesta a la distancia. Para la utilización de la tecnología PLC como una red de acceso a Internet básicamente se necesita de una estación base y tal como se menciona anteriormente se pueden utilizar Gateways o simplemente un modem para cada usuario donde todo el sistema este comunicado con un proveedor de servicios de Internet, proveyendo cerca de 50 terminales por estación base

Habitualmente la señal PLC que llega a los domicilios ha de ser amplificada mediante repetidores, los cuales suelen ubicarse en las subestaciones de los edificios, justo después de los contadores. En el caso de edificios de gran altura puede ocurrir que la señal llegue sin problemas hasta un cierto piso, pero que el nivel de degradación limite su empleo a partir de ahí. Circunstancias análogas pueden tener lugar en edificios de topología complicada y que por tanto impongan amplias distancias eléctricas.

²⁸ Revista ENTER 2.0. Internet por la red eléctrica, Diciembre 2005.

Algunos países, entre ellos España, están siendo escenario de pilotos y despliegues comerciales limitados de este modelo de solución PLC. Puesto que las señales de datos PLC no soportan una transformación de tensión, los centros de transformación deben contar con estaciones base. Así, la inversión necesaria por usuario está directamente relacionada con el número de domicilios servidos por cada transformador de media a baja tensión. Curiosamente, la estructura de las redes de media y baja tensión de los países de la Unión Europea facilita el modelo de negocio del PLC, ya que la media de domicilios servidos por un centro de transformación se encuentra situada entre 300 y 400.²⁹ La figura 43 muestra una red de acceso utilizando PLC

Figura 43. Red de acceso PLC



Fuente: <http://global.mitsubishielectric.com/it/personal/technologies/plc.html>
Consultada Junio 2006

²⁹ GONZALEZ J. R., La tecnología PLC en los Programas de Fomento de la Sociedad de la Información de Red.es, pp. 54 - 64

5.2 PLC como red de área local

En los domicilios las señales de baja frecuencia (50 o 60 Hz, en función de la red) son las encargadas de la transmisión de la energía, mientras que el PLC utiliza el rango espectral comprendido entre 10 MHz y 30 MHz (frecuencias con mejor respuesta frente al ruido) para transmitir datos, siendo transmitidas ambas simultáneamente a través del cable eléctrico. Típicas fuentes de ruido para la señal PLC en aplicaciones indoor son motores, fluorescentes, lámparas halógenas, interruptores, etc.

El PLC en su vertiente indoor, convierte la línea eléctrica en una red de área local y saca partido por tanto del hecho de que la infraestructura de conectividad ya existe, y con una instalación muy sencilla puede convertirse cualquier toma eléctrica en un auténtico puerto de datos.

A través de la red eléctrica y con los dispositivos PLC adecuados se pueden comunicar dos o más ordenadores entre sí sin necesidad de realizar nuevos cableados. El esquema es análogo al del acceso a Internet y se ajusta a la misma configuración básica, en la que una estación base se instala siempre en cabecera, con tantos módems como usuarios. En este caso la estación base debe situarse en el cuadro eléctrico del edificio, en donde se encuentra la acometida principal y tras los contadores de la compañía eléctrica. Conviene inyectar la señal después del interruptor de potencia principal con el objeto de minimizar interferencias. El resto de la instalación PLC sigue los parámetros ya comentados al hablar de la aplicación al acceso a Internet: se disponen tantos módems PLC de usuario como puntos de red se desean y se utilizan repetidores para mejorar la calidad de la señal en todos aquellos casos en que sean necesarios. En la figura 44 se puede observar una red LAN con tecnología PLC

video. El propósito de MAC IHAV es proveer una manera fácil de desplegar redes In-home con QoS garantizada y una cobertura total. Esto se basa en MAC TDMA/TDD con recursos híbridos que comparten mecanismos. El soporte de QoS se basa en la clase de tráfico que es transmitido y recibido. Diferentes algoritmos de asignación de ancho de banda serán aplicados a cada clase, cada uno con diferentes requerimientos de ancho de banda y latencia. Esta flexibilidad es apropiada para aplicaciones heterogéneas, como audio, video o transferencia de archivos en tiempo real³⁰.

5.4 PLC para el control de irrigación

Una red de control distribuida fue desarrollada para controlar automáticamente los sistemas de irrigación en el campo, para la implementación del concepto del manejo preciso de la agricultura.

Una variedad de redes de control distribuido han sido desarrolladas para facilitar la investigación sobre sistemas de aspersión agrícolas para optimizar el manejo del agua y de los productos químicos. Los requisitos de comunicación del diseño del control electrónico necesitaban para la implementación de aplicaciones de tasa variable y de la adquisición de datos. Dado que los controles estaban en instalaciones de riego existentes, PLC ofrece una solución segura, práctica y económica para las comunicaciones de red. Tres tecnologías de PLC han sido usadas desde 1995 para controlar sistemas de aspersión agrícolas automáticos³¹.

³⁰ RUIZ, David. In-Home AV PLC MAC with Neighboring Networks Support, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, España, pp. 17 - 21

³¹ WALL, Richard. Power line carrier communications for center pivot irrigation control, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Idaho, Estados Unidos, pp 109 - 115

Figura 45. Grafica del sistema de irrigación



Fuente: Power line carrier communications for center pivot irrigation control

Estas tres tecnologías son las siguientes:

- X10
- LonWorks basado en PLC
- Intellon basado en PLC

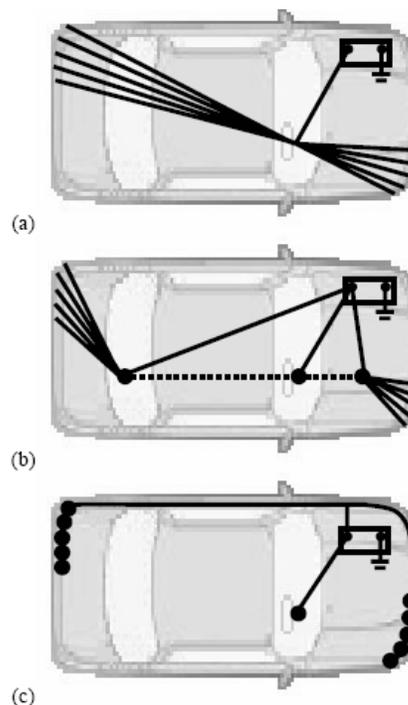
5.5 PLC sobre automóviles

Hoy en día, existen varios sistemas de buses en los automóviles, los cuales cumplen diferentes tareas de comunicación entre los componentes del vehículo dependiendo de su área de aplicación. Cada uno de esos buses necesita su propia línea de datos y así es responsable de un incremento significativo del peso y complejidad del cableado de todo el automóvil. Además el motor en combinación con la caja de cambios y la totalidad del cableado, representan el componente mas pesado dentro de un vehículo. Dada la tendencia es lógico el uso de las

líneas de energía de los automóviles como medio para la comunicación de datos entre los componentes del automóvil³².

A continuación se muestran una imagen que muestra la ventaja de utilizar PLC en los automóviles³³.

Figura 46. Formas de cableado de un automóvil



Fuente: An Experimental Setup for In.Circuit Optimization of Broadband Automotive Power Line Communications

En la figura 46.a se muestra el sistema de cableado más convencional que encontramos y el más sencillo en el cual se ve que todos los componentes activos

³² HUCK, Thorsten. Tutorial About the implementation of a vehicular high speed communication system, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Alemania, pp. 162 - 166

³³ PETRUS A. An Experimental Setup for In.Circuit Optimization of Broadband Automotive Power Line Communications, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Surafrica, pp. 322 - 325

del automóvil requieren de la batería para ser alimentados por medio de un punto de control que por lo general es la llave de encendido. Se puede notar que el número de cables necesarios es igual a número de componentes que requieren control. Pero si en vez de esta solución optamos por una multiplexión, podemos reducir el espesor y peso de los cables entre el encendido y los nodos multiplexado (Figura 46.b). Por último en la figura 46.c se puede observar el sistema PLC implementado para un automóvil y se puede notar que no se necesitan cables adicionales para el control de los componentes.

5.6 PLC en Colombia

En Colombia, el Ministerio de Comunicaciones tiene a PLC, junto a WiMax y la radio y televisión digitales, como tema de estudio en sus planes de acción. El potencial de PLC en países como Colombia es alto, pues la penetración actual de la banda ancha es muy baja y eso da más posibilidades de que se masifique (en naciones como Corea, Francia o Estados Unidos, cable y DSL están en la mayoría de hogares y por ello PLC tiene un limitado campo de acción).

En estos momentos, EPM Energía maneja un proyecto piloto de PLC en hogares, una institución educativa y una zona comercial, y planea comparar los resultados con los de cable y DSL, y a la vez evaluar si los clientes valoran los beneficios adicionales que ofrece PLC. EPM dice que entre marzo y abril del 2006 ya habrá adquirido los equipos necesarios y estará realizando las pruebas finales, para empezar a ofrecer el servicio a sus clientes a más tardar a mediados del 2006.

5.7 Ventajas y desventajas de la tecnología PLC

La principal ventaja de la tecnología PLC es su sencillez a la hora de realizar la instalación de las infraestructuras necesarias. Ésta corre a cargo exclusivamente del operador, por lo que el usuario solamente debe preocuparse de conectar su módem y enchufar su equipo a la red eléctrica. Además, los paquetes que se ofertan vienen acompañados de un kit autoinstalable, aunque, en todos los casos, un técnico acude a nuestro domicilio para ponerlo en marcha. A ello se suma la simetría en la comunicación, lo que permite lograr velocidades idénticas de subida y bajada. Pero lo más interesante del PLC es su alcance y zonas de cobertura. A diferencia de otras opciones de banda ancha, la que nos ocupa tiene un alcance mundial, pues el 95 por ciento de la población disfruta de electricidad. Una lista mas detallada de las ventajas de esta tecnología es la siguiente³⁴:

- Utiliza infraestructura ya desplegada y con una penetración mucho mayor que la del bucle de abonado telefónico convencional (prácticamente todas las casa disponen de instalación y conexión a la red eléctrica). Esto elimina la necesidad de construir nuevas instalaciones.
- Ubicuidad - Un enchufe convencional es suficiente para estar conectado. Esto se transforma también en un ventaja en el interior de las viviendas y oficinas, al convertir el tendido eléctrico interior en una infraestructura de LAN, eliminando así la necesidad de nuevos cableados.
- Alta velocidad. La tecnología actual permite la transmisión a 130 Mbps y ya se espera la siguiente generación (3ª) capaz de llegar a los 200 Mbps.
- Instalación rápida y ajustada a la demanda
- Coste reducido en comparación con otras tecnologías
- Conexión permanente y elevada escalabilidad

³⁴ TENOCOM, Op cit., p. 12.

Eso sí, no debemos crear falsas expectativas, puesto que, de momento, el lanzamiento se está haciendo de manera progresiva. Paralelamente, es preciso anotar que no todo son ventajas. El ruido electromagnético y la contaminación de la banda de onda corta son algunas de las contrariedades a las que han tenido que enfrentarse los ingenieros que han participado en su desarrollo. Las primeras pruebas de campo realizadas evidenciaron que la utilización de determinadas frecuencias ocasionaba interferencias con algunos servicios preexistentes, como las emisoras de los radioaficionados o la transmisión de la radio FM, entre otros. Según parece, las compañías involucradas están trabajando para solventar estas contrariedades, pero sólo la progresiva implantación de PLC permitirá comprobar si realmente es posible evitar que afecte negativamente a terceros. A todo lo mencionado se suma su condición de mercado incipiente, con lo que esto supone en cuanto a desarrollo de estándares y necesidad de inversiones³⁵. Para tener una vista mas real acerca de la tecnología PLC con respecto a otras tecnologías se muestra la tabla 3.

³⁵ LOPEZ REVILLA, Juan Carlos. Revista PC ACTUAL, España. P. 50, Junio 2004.

Tabla 3. Ventajas Y Desventajas De Las Diferentes Acceso A Red

Tecnología de acceso a red	Ventajas	Desventajas
<p>Ethernet Convencional IEEE 802.3</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tasa de transmisión de datos, hasta 100 Mbps • Confiable y estandarizado • Flexible 	<ul style="list-style-type: none"> • Costosa • Requiere un cableado especial • Difícil de instalar • Requiere hub, router, y servidores para poder tener una red inteligente • Los dispositivos deben ser conectados a la red por medio de cables dedicado
<p>HomePNA</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tasa de transmisión de datos, hasta 10 Mbps • Confiable, estandarizado y flexible • Utiliza el cableado telefónico existente • Fácil de instalar • Bajo costo • No necesita de hub ni routers 	<ul style="list-style-type: none"> • Los dispositivos deben ser cableados hasta la red
<p>Wireless: Ethernet IEEE 802.11</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rápida tasa de transmisión 11 Mbps • Confiable, estandarizado y flexible • No requiere cableado • Sin cables • movilidad • Muy soportado por la industria de la computación 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser costosa • Algunas estructuras pueden bloquear las señales inalámbricas • Problemas de rango • Requiere estación base
<p>Wireless: HomeRF</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rápida tasa de transmisión 10 Mbps • Confiable y estandarizado • Flexible • No requiere cableado • Sin cables • Fácil de instalar • Móvil • Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de rango • Algunas estructuras pueden bloquear las señales inalámbricas • No es tan ampliamente adoptado como el 802.11 • Requiere estación base
<p>Wireless: Bluetooth</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Confiable y flexible • No requiere cableado • Sin cables • Móvil • Bajo costo • Adoptado por la industria de las computadoras para los dispositivos portátiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango limitado • Tasa de transmisión de datos de solo 1 Mbps • Algunas estructuras pueden bloquear las señales inalámbricas • Los dispositivos deben tener un chip Bluetooth
<p>PLC</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rápida transmisión de datos • Flexible • Utilizada el cableado eléctrico • Fácil de instalar 	<ul style="list-style-type: none"> • La transmisión puede ser bloqueada o interferida • Ambiente de red "Hostil" • Atado a los tomacorrientes • Sin estándares establecidos

Fuente: plugtek.com/networking-comparison-tutorial.shtml Consultada: Abril 2006

6 CONCLUSIONES

Dentro de las aplicaciones de la tecnología PLC se puede concluir que la utilización de esta tecnología para el acceso a Internet presenta grandes ventajas, tales como la infraestructura ya instalada, la facilidad para realizar la instalación de los equipos, pero algo que es mucho más relevante es el alcance y las zonas de coberturas a las que la tecnología PLC podría llegar, pues la red eléctrica abarca cerca de 95% de la población, y gracias a los continuos avances en el desarrollo de chips para la tecnología PLC, las velocidades de transmisión y la calidad del servicio son cada vez mejores. A todo se le tiene que sumar que la tecnología PLC también tienen sus deficiencias como lo son el ruido electromagnético y interferencia en algunos servicios de comunicación con bandas de frecuencias cercanas o iguales a las de PLC, otro problema recae en el hecho de que al ser la tecnología tan nueva en el mercado, existe una falta de estándares para el perfecto funcionamiento, así como la incursión de inversionistas para su desarrollo.

Por otro lado se puede concluir que dentro de las tecnologías de comunicación de PLC ciertamente PowerPacket es la que presenta mayores prestaciones con respecto a las demás, pero es de anotar que las otras tecnologías al no tener prestaciones tan grandes como las de PowerPacket igual son de mucha utilidad y esto lo podemos observar con la tabla 4 que se presenta a continuación, en donde se puede notar que por sus características las tecnologías CEBus, X-10 y LonWorks tienen un mejor desempeño en las aplicaciones de automatización y control de las residencias, mientras que las tecnologías PowerPacket y Homeplug presentan un mejor desempeño en la interconexión de las redes de las casas, esto dado sus altas velocidades de transmisión.

Tabla 4. Características de las tecnologías de comunicación de PLC

TECNOLOGÍA DE COMUNICACIÓN	CARACTERÍSTICAS
LonWorks	<ul style="list-style-type: none"> - Estándar Abierto, Arquitectura Peer to Peer, desplaza sistemas de control distribuidos y basados en la información. - Elementos Principales: Los procesadores Chip Neurona, El protocolo de comunicación LonTalk y Los servicios de red LonWorks (LNS). - Componentes del Sistema: Dispositivos LonWorks, Canales y Herramientas de Red. - Nodos: Sensores, Switches, Detectores de Movimiento, entre otros.
CEBus	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de transmisión: red eléctrica, par de cobre, cable coaxial, RF Broadcast e infrarrojo. - Uso en automatización de la casa. Unidad de datos es el paquete, red orientada a la no conexión, arquitectura peer to peer. Emplea el protocolo CSMA/CDCR. - Componentes: un Transceiver y un Microcontrolador. - Utiliza la tecnología de espectro extendido, extiende una señal sobre un rango de frecuencias (100 kHz a 400 kHz). - Tasa de transmisión: EE.UU. 10 kbps y Europa 2 kbps
Passport y Plug-in PLX	<ul style="list-style-type: none"> - Una de las primeras tecnologías PLC - Velocidad de conexión baja (50 Kbps hasta 350 Kbps). - Sola trabaja con el sistema operativo Windows - Utiliza la técnica de Modulación FSK - Solo trabaja con líneas estándar de 110 V - La tecnología Plug-in PLX utiliza una combinación de DSMA y CPT
X-10	<ul style="list-style-type: none"> - Se desarrolló inicialmente para integrar a bajo costo los sistemas de iluminación y los dispositivos de control. - La velocidad de transmisión del protocolo X-10 se limita solo a 60bps. Inapropiado para llevar tráfico del tipo Internet por la casa. - Empezó siendo únicamente unidireccional, pero las características bidireccionales también se le han agregado - Las transmisiones están sincronizadas con el punto de cruce por cero de la señal AC - Trabajan sobre la red de 110V
PowerPacket	<ul style="list-style-type: none"> - Es la base de la especificación industrial HomePlug Powerline Alliance. - Versión de OFDM. - Provee una tasa de transmisión de datos de 14 Mbps. - Soporta servicios como voz sobre IP (VoIP) y Calidad de Servicio (QoS). - Compatibilidad con varios sistemas operativos.
HomePlug	<ul style="list-style-type: none"> - Combina OFDM, Codificación de señal y técnicas de corrección de errores. - Las capas físicas y MAC de Cogency utilizan la tecnología OFDM. - Las capas física y MAC de Cogency proveen ecualización por paquete y acceso eficiente al medio Powerline de manera compartida.

BIBLIOGRAFÍA

AHOLA, Jero. Applicability Of Power-Line Communications To Data Transfer Of On-Line Condition Monitoring of Electrical Drives, 2003

DOSTERT Klaus, Powerline Communications, Estados Unidos, 2001.

GARG V. K., Digital wireless local loop system, IEEE Communications Magazine, p.112–115, Octubre 1996

GONZALEZ J. R., La tecnología PLC en los Programas de Fomento de la Sociedad de la Información de Red.es, pp. 54 – 64, septiembre 2004

HERNANDEZ E. J., Architectures for broadband residential IP services over CATV networks, IEEE Network, 1997.

HRASNICA, Halid. Broadband Powerline Communications Network – Network Design. West Sussex – Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.275 p, 2004

HUCK, Thorsten. Tutorial About the implementation of a vehicular high speed communication system, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Alemania, pp. 162 – 166, 2005

HUSSAIN ZUBERI, Khurram. Power Line Carrier (PLC) Communication Systems. Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2003 .

IMS L. A., Wireline broadband access networks, Telektronikk, p 73–87, 1999.

KEMPER LITTMAN, Marlyn. Building Broadband Networks. Florida: CRC Press LLC, .577 p. 2002

LOPEZ REVILLA, Juan Carlos. Revista PC ACTUAL, España. P. 50 Junio 2004

ORTH B., ADSL – zukunfrachtige Übertragungs technologie, Alemania, p. 276–293, Mayo 1999

PETRUS A. An Experimental Setup for In.Circuit Optimization of Broadband Automotive Power Line Communications, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Sudáfrica, pp. 322 – 325, 2005

RUIZ, David. In-Home AV PLC MAC with Neighboring Networks Support, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, España, pp. 17 – 21, 2005

TECNOCOM, Powerline Communications, Madrid, España: Tecnocom. 14 p, Julio 2005

WALL, Richard. Power line carrier communications for center pivot irrigation control, 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications, Idaho, Estados Unidos, pp 109 – 115 2003

http://enter.terra.com.co/enter2/ente2_actu/ente2_actu/ARTICULO-WEB-NOTA_INTERIOR_2-2659989.html

<http://www.enersearch.se/knowledgebase/publications/theses/pow-line.html>