



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil Electrónica

**TECNOLOGÍA PLC:
PROPUESTA DE CONEXIÓN EN BANDA ANCHA
PARA UN SECTOR RURAL**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Ingeniero en Electrónica

PROFESOR PATROCINANTE:
Sr. Néstor Fierro Morineaud

**RODRIGO ANDRÉS RIFFO LLANCAFILO
VALDIVIA
2009**

Comisión de Titulación

Sr. Néstor Fierro Morineaud
Profesor Patrocinante

Sr. Alejandro Villegas Macaya
Profesor Informante

Sr. Raúl Urrea Ríos
Profesor Informante

Fecha de Examen de Titulación: _____

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi familia, pilar fundamental para alcanzar esta meta. Y en especial, a mi madre, Lucía, que gracias a su esfuerzo permitió no sólo mi formación profesional, sino que además, la de mis otros hermanos. Inculcándonos de que no hay mejor herencia que la educación.

A mi padre Sergio, por su apoyo y preocupación durante mi vida académica. Así como a mis hermanos Cecilia, Mauricio y Sergio, por su constante ayuda y preocupación.

Agradecer a Dios, por la familia que tengo y guiarme en la senda correcta para alcanzar mis metas.

3.3.4.2 Nivel MAC	40
3.3.4.3 Seguridad	42
3.3.5 Estándar HomePlug AV	44
3.3.5.1 Arquitectura HomePlug AV	44
3.3.5.2 Nivel Físico	45
3.3.5.3 Nivel MAC	46
3.3.6 Coexistencia de HomePlug 1.0 y HomePlug AV	49
3.3.7 Estándar de facto para PLC	50
3.4 Compatibilidad electromagnética	51
3.4.1 FCC Parte 15	52
3.4.2 EN 55022	53
3.4.3 EN 55024	54
CAPITULO IV. TÉCNICAS DE ENCRIPCIÓN, CODIFICACIONES Y	
MODULACIONES USADAS EN PLC	55
4.1 Introducción	55
4.2 Protección de la Señal PLC: Técnicas del control de errores y de flujo	55
4.2.1 ARQ (Automatic Repeat Request)	56
4.2.1.1 ARQ de parada y espera	57
4.2.1.2 ARQ de rechazo simple	57
4.2.1.3 ARQ de rechazo selectivo	57
4.2.2 FEC (Forward Error Correction)	58
4.2.2.1 Códigos de bloque	59
4.2.2.2 Códigos convolucionales	61
4.3 Seguridad Señal PLC: Técnicas de encriptación	63
4.3.1 Data Encryption Standard	63
4.3.1.1 Modos de operación	66
4.3.2 Advanced Encryption Standard	69
4.3.2.1 El State	69
4.3.2.2 Rondas	70
4.4 Nivel de enlace: Métodos de acceso al medio	72
4.4.1 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	72
4.4.2 Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection	73
4.4.3 Time Division Multiple Access	77
4.5 Nivel Físico: Técnicas de modulación	78
4.5.1 FSK (Frequency Shift Keying)	80
4.5.2 DSSSM (Direct Sequence Spread Spectrum Modulation)	81
4.5.3 GMSK (Gaussian minimum shift keying)	83
4.5.4 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)	84
4.5.4.1 Fundamentos de transmisión con modulación multiportadora	85
4.5.4.2 Transmisor de OFDM	86
4.5.4.3 OFDM y el concepto de multiportadora	87
4.5.4.4 Importancia de la ortogonalidad	88
4.5.4.5 Generación de subportadoras utilizando IFFT	89
4.5.4.6 Periodo de guarda y extensión cíclica	92
4.5.4.7 Adecuación de la señal al medio	95

CAPITULO V. PRUEBAS REALIZADAS CON EQUIPOS PLC	97
5.1 Introducción	97
5.2 Equipos y software utilizado	97
5.3 Pruebas realizadas en laboratorio	98
5.3.1 Configuración red de área local	99
5.3.2 Mediciones de la tasa de transferencia de archivos	99
5.4 Pruebas realizadas en Escuela	100
5.4.1 Configuración red de área local	101
5.4.2 Medición de la velocidad de conexión a internet	101
5.4.3 Prueba de alcance de la señal PLC	101
5.4.4 Mediciones de la tasa de transferencia de archivos	102
CAPITULO VI. PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DE CONEXIÓN EN BANDA ANCHA UTILIZANDO EQUIPOS PLC	105
6.1 Introducción	105
6.2 Planteamiento del problema	105
6.3 Escuela Rural Coihueco	106
6.3.1 Ubicación	106
6.3.2 Distribución estructural	108
6.3.3 Características de la red LAN	109
6.4 Análisis de los escenarios posibles para la propuesta	109
6.4.1 Laboratorio de computación	110
6.4.2 Salas de clases	110
6.5 Propuesta de conexión	111
6.5.1 Configuración de la propuesta de conexión	111
6.5.2 Beneficios para la Escuela Rural Coihueco	112
6.5.3 Sugerencias para un mejor rendimiento de los equipos PLC	113
CONCLUSIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	117
A1 Equipos Power Line Communications	117
A2 Plano Estructural Escuela Rural Coihueco	126

RESUMEN

Este trabajo de tesis se realizó con el objetivo de proponer un modelo de conexión en banda ancha que beneficiase a un sector rural de la comuna de Panguipulli. Dicho sector elegido corresponde a la zona de Coihueco (en Mapudungun, agua de Coihue), más precisamente a la Escuela Rural Coihueco. Establecimiento que si bien tiene acceso a internet satelital y un laboratorio de computación, no posee una conectividad en las demás salas de clases.

Surgió así el desafío de poder proveer conectividad al resto de las dependencias del establecimiento. Para lo cual, y como una forma de innovar en cuanto al uso de tecnologías se refiere, se utilizó equipos con tecnología PLC HomePlug 1.0.

La realización de pruebas, tanto en laboratorios del Instituto de Electricidad y Electrónica, como en el propio establecimiento educacional, permitieron identificar de manera efectiva las cualidades y debilidades de los equipos PLC. Lo anterior, sumado a la información previamente recopilada y estructurada en capítulos, fueron los pilares fundamentales para desarrollar la propuesta, y posterior implementación de los equipos PLC.

ABSTRACT

This work thesis was realized with the objective to propose a model of connection in wide band that benefited a rural sector of Panguipulli's commune. The above mentioned chosen sector corresponds to Coihueco's zone (in Mapudungun, Coihue's water), more exactly to the Rural School Coihueco. Establishment that though has satellite Internet access and a laboratory of computation does not it possess a connectivity in the other classrooms.

There arose this way the challenge of being able to provide connectivity to the rest of the dependences of the establishment. For which, and as a form of innovate as for the use of technologies refers, was utilized devices with technology PLC HomePlug 1.0.

The execution of tests, so much in laboratories of the Institute of Electricity and Electronic, as in the own educational establishment, they permitted to identify in an effective way the qualities and weaknesses of the teams PLC. The previous things, added to the information previously compiled and structured in chapters, were the fundamental pillars to develop the proposal, and subsequent implementation of the devices PLC.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Investigar y analizar la arquitectura de una red PLC para proponer un modelo de conexión en banda ancha para un sector rural.

Objetivos específicos

- Estudiar la arquitectura de una red de Power Line Communications, identificando cada uno de los elementos que la componen y su funcionamiento.
- Analizar los métodos de transmisión y tecnologías existentes en una red PLC.
- Investigar los beneficios obtenidos a la hora de implementar una red PLC.
- Conocer y evaluar la factibilidad de implementación de la tecnología PLC.
- Medir en forma práctica los parámetros de funcionamiento de una red LAN implementada mediante tecnología PLC.
- Proponer un modelo de conexión en banda ancha utilizando equipos con tecnología PLC.

INTRODUCCIÓN

Tan importante como poseer una conexión a internet, es contar con la infraestructura de red que soporte dicha conexión, y que posea la cobertura suficiente para satisfacer las necesidades de los usuarios. Ante la carencia de conectividad existen soluciones de fácil implementación, como por ejemplo Wifi. Que permite iluminar aquellos lugares, que por sus características físicas, hacen inviable o costoso la instalación de cableado. Sin embargo, en ciertos casos, la señal inalámbrica de Wifi se ve atenuada por construcciones u obstáculos. Sumado al hecho de que se debe recurrir a proteger con cifrado la señal para evitar el uso no autorizado de la conexión.

En los últimos años, ha surgido una nueva tecnología que vendría a complementar a tecnologías como Wifi: Power Line Communications (PLC). Tecnología que si bien está pensada para proveer acceso a internet a través del cableado eléctrico, ha logrado un mayor desarrollo en ámbitos Indoor. Prueba de ello es que ya se cuenta con un estándar para este ámbito de funcionamiento.

METODO DE TRABAJO

Para llevar a cabo la propuesta de conexión y posterior implementación, se realizó la recopilación de información en lo referente a una arquitectura de red PLC, así como las características técnicas de los equipos PLC que la conforman. Dicha información fue recabada mediante la consulta de libros y de papers, boletines, y artículos relacionados con esta tecnología, así como de empresas relacionadas.

Además, se realizaron pruebas en el laboratorio de Electrónica del Instituto de Electricidad y Electrónica con equipos PLC Indoor, de manera de poder establecer como se desenvolvería una conexión en banda ancha a través del cableado eléctrico.

Del mismo modo, se llevó a cabo pruebas en la red eléctrica de la Escuela Rural Coihueco, con el objetivo de determinar el alcance de la señal PLC y la tasa de transferencia de archivos compartidos en red.

CAPITULO I

POWER LINE COMMUNICATIONS

1.1 Introducción

Ante el constante aumento de la demanda por conexiones a Internet, sobre todo en banda ancha, las empresas proveedoras de conexión tienen a su disposición una variedad de tecnologías que les permiten ofrecer el servicio de conexión a los clientes o abonados. Una de estas tecnologías es Power Line Communications o PLC por sus siglas, la cual permite sacar provecho una red tan masiva, que prácticamente está presente en todos los hogares: la red eléctrica. De esta manera, la tecnología PLC permite a las compañías eléctricas sacar provecho a un medio que no fue considerado para la transmisión de datos, pudiendo desplegarse como una tecnología de acceso a internet o como complementación a otras tecnologías de acceso ya desplegadas.

En el presente capítulo se dará a conocer en que consiste la tecnología PLC, así como también los diferentes equipos que la componen.

1.2 Comunicaciones por la red eléctrica

Al hablar de la tecnología PLC se debe hacer el distingo entre la tecnología de acceso a internet y la que está orientada exclusivamente a aplicaciones al interior del hogar.

La primera de ellas se denomina BPL (Broadband Powerline) o PLOC (Power Line Outdoor Communications) y comprende el tramo denominado de “última milla”. Esto es, la comunicación entre la subestación eléctrica y la red doméstica. Mientras que la segunda, llamada PLIC (Power Line Indoor Communications), se aboca a generar una LAN en la red eléctrica interior de los hogares o edificios. Utilizando para ellos adaptadores powerline en complementación a los equipos de red tradicionales, como modem, switch, router, hub, etc.

El principio de funcionamiento para ambas es el mismo. La tecnología permite la transmisión de datos y las comunicaciones en red a través de cableados existentes como el principal medio de transmisión. A través de las comunicaciones por la red eléctrica, el tráfico de

la red puede enviarse y recibirse a través de los tomacorrientes eléctricos comunes de un edificio u hogar, con lo cual se logra proporcionar un acceso a banda ancha con un ahorro significativo en lo que respecta al despliegue de tendidos y equipos.

El acceso a banda ancha proporcionado, se realiza inyectando las señales digitales a la línea eléctrica de media y/o baja tensión. De esta forma, se logra convertir cualquier enchufe de los que se dispone en un hogar u oficina en un punto de conexión entre diferentes equipos.

Ahora bien, la capacidad de poder realizar la transmisión de datos en forma compartida con la señal eléctrica se debe a que ambas señales (datos y eléctrica), trabajan a frecuencias muy separadas entre sí. Mientras la señal de energía eléctrica se sitúa entre los 50 Hz y 60 Hz (dependiendo del país donde se encuentre), la señal de datos proporcionados por PLC se encuentra en el rango de frecuencias de HF.

Para las aplicaciones dentro del hogar, existe un estándar ya formado, Homeplug. HomePlug es una alianza de varias empresas que trabajan en el desarrollo de una tecnología que permita implementar redes de área local usando la instalación eléctrica de baja tensión de las viviendas, oficinas o industrias, evitando así la instalación de nuevos cables. Opera en el rango de frecuencias que están en el rango de 4.3 a 21 MHz.

La asignación de frecuencias para el tramo de acceso (BPL), en cambio, no está normada del todo. Existiendo hasta ahora una referencia propuesta por el estándar TS 101867 de ETSI (iniciativa que ha tenido mayor consenso), el cual propone un rango de frecuencias que van desde los 1,6 MHz a 35 MHz (banda de High Frequency, o HF por sus siglas).

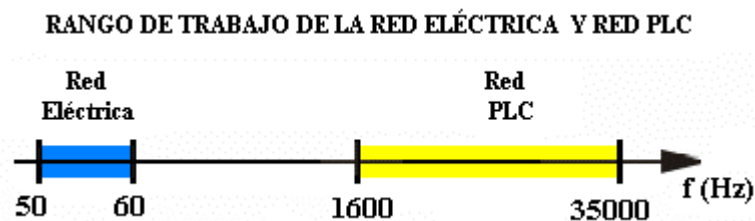


Figura 1.1: Rango de trabajo de red eléctrica y red PLC

Este estándar además, propone una división del rango de frecuencias utilizado en dos tramos. Estos tramos dan origen, a su vez, a dos ámbitos de funcionamiento de esta tecnología;

Indoor PLC y Outdoor PLC. Los rangos de frecuencia para Indoor PLC están entre los 10 MHz y 30 MHz aproximadamente, mientras para Outdoor PLC se sitúan entre 1,6 MHz y 10 MHz.

Esta división de frecuencias se encuentra en abierta oposición con la tecnología HomePlug, al superponerse el rango de frecuencias utilizado. Existiendo por lo tanto una incompatibilidad con el estándar ETSI citado en el párrafo anterior. Esta incompatibilidad refleja las dificultades de no poseer aún un estándar único para PLC.

La dificultad de no poseer un estándar único para ésta tecnología, además se debe a que existen grupos de trabajo que han desarrollado equipos caracterizados por la modulación de señal empleada, la cual difiere una de otra. Entre las modulaciones empleadas más importantes por el grado de éxito alcanzado se encuentran:

- 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 todos ellos, el sistema de modulación que ha alcanzado mayor aceptación es OFDM, utilizado también en estándares IEEE para redes de área metropolitana inalámbricas, e incluido dentro de las especificaciones para la radiodifusión de televisión digital terrestre. Este sistema multiportadora es eficiente y flexible para trabajar en un medio como la red eléctrica, ya que el rango espectral queda dividido en slots, cuyo ajuste permite que los equipos se adapten dinámicamente a las condiciones del medio, potenciando aquellas frecuencias donde el ruido es menor y anulando el uso de frecuencias donde el ruido es elevado. 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

A pesar de no existir un estándar único para PLC, se avizora un futuro prometedor para esta tecnología, sobre todo en lo que respecta a las tasas de velocidades que ésta pueda brindar. Lo anterior se fundamenta en las recientes etapas de pruebas, en donde se han alcanzado

velocidades que llegan a los 1,2 Gbps, existiendo una estimación de acceso para el usuario final que puede llegar hasta los 100 Mbps.

1.3 Evolución de la tecnología PLC

La red eléctrica ha sido empleada con el propósito de transmitir información desde hace mucho tiempo, para lo cual incluso existen normas reguladoras. Sin embargo, recientemente, se ha despertado un gran interés por dos aplicaciones centradas en las comunicaciones digitales de alta velocidad: usar la red de distribución de media y baja tensión como medio de acceso a las grandes redes de telecomunicación, y el aprovechamiento de las instalaciones eléctricas interiores de hogares u oficinas para establecer redes de datos de área local.

Ya desde antes de la segunda guerra mundial en Europa se desarrollaron las primeras implementaciones basadas en la utilización del cableado eléctrico como un medio de transmisión de datos. Dichas implementaciones se basaban en la transmisión de señales de alta potencia a bajas frecuencias (100 Hz) que viajaban en un solo sentido como una señal de control eléctrico y alumbrado público, conocido como sistema “Ripple”.

Este tipo de tecnología se usó también en los EE.UU. a partir de los años 60, aunque al igual que en Europa, sólo se limitaba al control de líneas eléctricas y a la transmisión a baja velocidad de las lecturas de contadores. En el año 1975 se desarrolla la tecnología X-10 para permitir el control remoto de los dispositivos domésticos a través de las líneas de potencia eléctrica. Esta tecnología es también conocida como Power Line Carrier (portadoras sobre líneas de potencia) y su funcionamiento se basa en la utilización de la red eléctrica existente en cualquier hogar, edificio u oficina, como medio físico para la comunicación interna de los distintos electrodomésticos de forma remota.

El salto cualitativo se produce en la década de los 90, con la aparición de tecnologías PLC como: LONWorks y CEBus, que con una mayor capacidad hacen posible la interconexión y comunicación entre dispositivos electrónicos en el hogar. Lográndose al final de esta década transmitir datos a velocidades lo suficientemente altas en las redes eléctricas de distribución.

Se llega al año 1997, y las compañías United Utilities de Canadá y Northern Telecom, de Inglaterra, presentaron un sistema con el cual lograron que Internet fuera accesible desde la red eléctrica de baja tensión. Convirtiendo la red de distribución eléctrica en una potencial red de

telecomunicaciones capaz de acceder a Internet por medio de la tecnología PLC. A partir de aquí aparece el concepto del PLC de banda ancha, el cual soporta comunicaciones del orden de los Mbps. Luego, compañías alemanas se unieron a la carrera por desarrollar la tecnología Power Line, para más pronto dar cabida en el año 2000 a España a través de la empresa Endesa.

En una primera versión, denominado PLC de primera generación, se lograron velocidades de 1 a 4 Mbps (millones de bits por segundo), lo cual satisfacía los requerimientos de transmisión de información de control de la planta eléctrica de una empresa determinada.

Posteriormente se requirió mayor velocidad en las redes de datos de control, y en una segunda generación, se alcanzaron velocidades de 45 Mbps, distribuidos de la siguiente manera: 27 Mbps en el sentido red-usuario (Downstream) y 18 Mbps en el sentido usuario-red (Upstream).

El potencial de esta tecnología ha llevado a distintos proveedores a desarrollar una tercera generación en la cual se han diseñado circuitos integrados, alrededor de los cuales se construyen los equipos de comunicación que permiten obtener velocidades de 130 Mbps (algunos con 200 Mbps).

En la actualidad existen diferentes entidades que se encuentran desarrollando y generando espacios de discusión sobre la tecnología PLC, es así como se puede citar a PLC Forum, HomePlug Powerline Alliance, ETSI (European Telecommunications Standards Institute), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), UPA (Universal Powerline Association), entre otras que se verán en el Capítulo III “Estandarización en PLC”.

1.4 Funcionamiento de la tecnología PLC

1.4.1 Broadband Powerline

La tecnología BPL basa su funcionamiento en acondicionar las infraestructuras eléctricas de media y baja tensión, para que estas puedan realizar la transmisión simultánea de la señal eléctrica de baja frecuencia (a 50 o 60 Hz, dependiendo del país) y las señales de alta frecuencia de transmisión de datos de BPL. La nueva red eléctrica ya adaptada, se denomina High Frequency Conditioned Power Network (HFPCN), permitiendo transmitir simultáneamente energía e información.

La red BPL comienza en una estación base (BS), la cual usualmente se encuentra ubicada dentro de la unidad transformadora, ya sea en la subestación de transporte o en la subestación de distribución o directamente en el contador eléctrico. En ella se encuentra un equipo cabecera o Head End (HE). El HE actúa a continuación de los transformadores de media/baja tensión. Esta disposición del equipo HE se debe a que si la señal RF utilizada por BPL pasase directamente a través del transformador, ésta se atenuaría de tal manera que haría inviable la transmisión de datos. En otras palabras, se realiza un bypass al transformador, evitando de este modo pasar la señal BPL a través de él. Utilizando para ello acopladores, los cuales pueden ser inductivos o capacitivos, dependiendo de la topología del sistema de distribución y otros factores.

Debido a las características de la red eléctrica (que se analizarán en el Capítulo II), y considerando que la señal se atenúa con la distancia, se utilizan equipos regeneradores o repetidores. Estos equipos, también llamados Home Gateway (HG) son ubicados cada 200 o 300 mts., garantizando de esta manera que el envío y recepción de las señales operen de forma óptima. Además, estos equipos tienen la función de recibir/emitir las señales desde/hacia los hogares.

La inyección de la señal al interior de los hogares se realiza mediante acopladores, los cuales realizan el acople de la señal a continuación del medidor eléctrico. Esto, debido a que el medidor actúa de barrera para la señal, y aún cuando pudiese transmitirse datos pasando a través de él, la degradación de estos es tal, que se opta por evitar pasar por el medidor eléctrico.

Dentro del hogar u edificio del cliente, todos los equipos de cómputo o demás dispositivos que se deseen conectar a la red BPL, lo harán por medio de equipos terminales de usuario (CPE) o modem. Los módems BPL normalmente tienen interfaz RJ45 para una red Ethernet, interfaz USB e inclusive una interfaz RJ11 para conectar directamente un teléfono, dado que un modem funciona también como un gateway para proporcionar un servicio de Voz sobre IP (VoIP).

Dependiendo de la distancia que comprenda una red BPL, la disposición de los equipos puede ser:

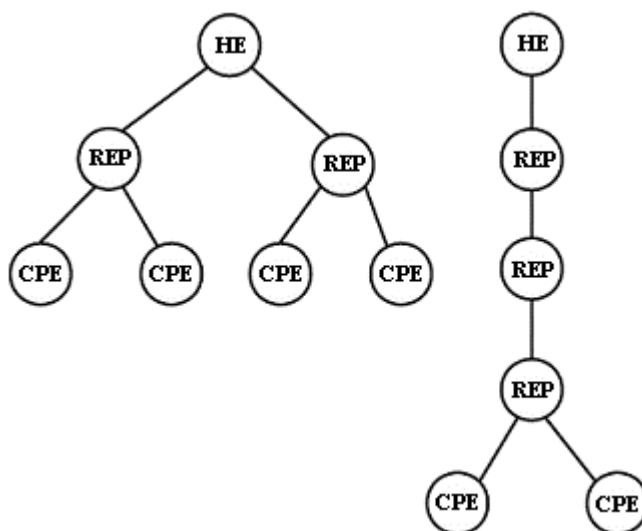


Figura 1.2: Escenarios típicos de acceso

Como se observa en la figura anterior, se puede presentar una topología en donde un nodo central (HE) concentra todo el tráfico, tanto ascendente como descendente. En donde, de acuerdo a los tramos de la red eléctrica que comprenda la red BPL, se configura la distribución de repetidores para la regeneración de la señal.

Si se produjera un corte en el suministro de energía eléctrica, el sistema BPL podría seguir operando, ya que si se cuenta con la precaución de disponer de sistemas de respaldo de energía en el ISP, en la cabecera, y en el hogar, no debería haber una interrupción del servicio.

1.4.2 Power Line Indoor Communications

Este ámbito de funcionamiento, representada por estándares como HomePLug y Netgear, basa su funcionamiento en el acondicionamiento de la red eléctrica domiciliaria, de manera de establecer comunicaciones internas. El acondicionamiento de las redes eléctricas se realiza con la ayuda de los adaptadores powerline ethernet. Dispositivos que se encargan de inyectar la señal (datos, voz, IP, etc.) en el cableado eléctrico. Más detalles en anexo A1, “Equipos Powerline Communications”.

Esta tecnología permite crear una red o extender una conexión a internet provista por un proveedor de internet (ISP). De este modo, y con la ayuda de los adaptadores de red, se puede configurar una red LAN a través del cableado eléctrico de baja tensión.

Los adaptadores powerline favorecen con su movilidad y eliminación de cableado ethernet adicional en la configuración de una red doméstica o de oficina. Pudiendo generarse una variedad de opciones de conexión, según los requerimientos del usuario y características de los equipos de red disponibles. En la siguiente figura, se puede observar una configuración típica de una red power line indoor:

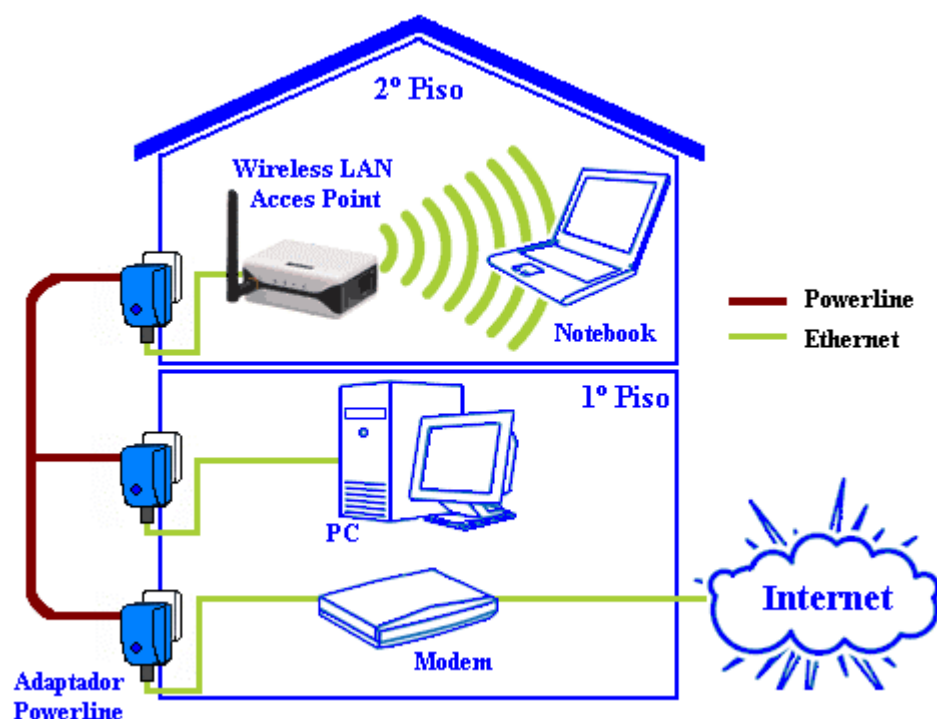


Figura 1.3: Arquitectura de red power line indoor

Como se observa en la figura anterior, se puede conectar un acces point 802.11 y distribuir de forma wireless o inalámbrica el acceso a Internet de banda ancha. Logrando de esta forma extender una conexión a internet previamente existente (fibra óptica, ADSL, enlace satelital, etc) a cada enchufe del hogar.

Con velocidades que en sus primeras versiones eran de 14 Mbps y 85 Mbps (HomePlug 1.0 y Turbo, respectivamente), hoy en día las velocidades alcanzadas superan con creces a sus predecesoras. Encontrándose actualmente en el mercado dispositivos que llegan hasta una tasa de transmisión de 200 Mbps (HomePlug AV y Netgear Powerline HD).

1.5 Arquitectura de equipo PLC

Un equipo está compuesto por los bloques de modulación digital y el interfaz analógico. Los datos de los bloques de modulación digital se envían/reciben a/desde el interfaz analógico. El camino de transmisión convierte los datos a analógicos, así como también realiza el filtrado y amplificación de la señal antes de enviarla a la línea eléctrica.

Un acoplador protege el equipo PLC del alto voltaje de la red eléctrica y permite que pasen las señales de datos de alta frecuencia. Mientras que en el camino de recepción se amplifica y filtra la señal antes de la conversión analógica-digital y los bloques de demodulación digital.

En la siguiente figura se presenta el diagrama en bloques del esquema de transmisión y recepción de un equipo powerline:

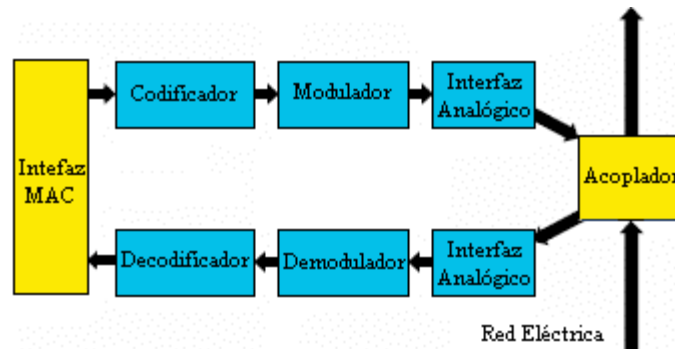


Figura 1.4: Diagrama de bloques de un equipo powerline

En la figura anterior se aprecia el interfaz digital, el cual procesa los datos de entrada y salida a nivel MAC. Se observan además los bloques Codificador/decodificador de datos donde se aplican los códigos de corrección de errores y otros datos. Los bloques Modulador/demodulador de la señal digital, en donde se aplican las técnicas de modulación (OFDM principalmente). El interfaz analógico con la red eléctrica y el acoplador que aísla y protege a los equipos terminales de la red eléctrica con mínima pérdida de señal.

Los equipos PLC poseen en su interior dos filtros. El primero de ellos, el de banda baja, libera la corriente eléctrica de 50 Hz para su distribución a todos los enchufes de la casa. Este filtro además sirve para limpiar los ruidos generados en la red por los electrodomésticos conectados en casa del usuario. Ya que si se dejaran pasar esos ruidos, al unirse a los procedentes de otros usuarios de la red, acabarían por introducir distorsiones muy significativas. En segundo

lugar, el filtro de banda alta es el que libera los datos y facilita el tráfico bidireccional entre el cliente y la red, logrando de esta manera una transmisión simultánea de energía e información en la red de baja tensión.

El esquema típico de estas unidades de filtrado se presenta en la siguiente figura:

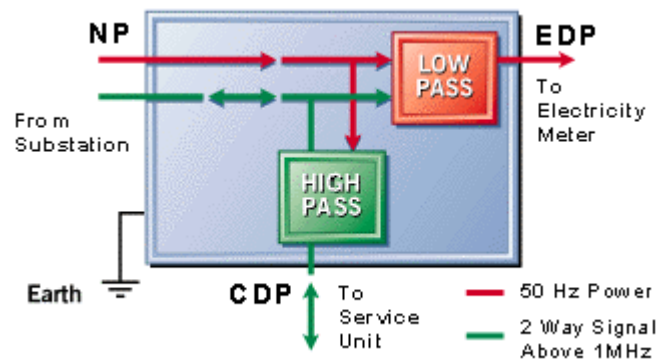


Figura 1.5: Esquema filtrado señal PLC

Todos los sistemas PLC (exceptuando el estándar HomePlug), pueden ser manejados vía DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) y SNMP (Simply Network Management Protocol). Esto permite la integración estándar para la administración de sistemas de redes, otorgando un efectivo y seguro sistema de herramientas, para monitorear el tráfico, la asignación de ancho de banda, la calidad de servicio (QoS) y LANs virtuales (VLANs) y localizar de forma rápida los errores que se produzcan.

1.6 Tecnología, características y rendimiento de PLC

La tecnología PLC basa su desarrollo en la utilización de chips, los cuales son los verdaderos cerebros detrás de todo el equipamiento existente. A la vanguardia de desarrollo de chips se encuentran empresas como DS2, compañía de origen español, además de Intellon, las cuales basan el funcionamiento de sus chips en la utilización de versiones mejoradas de OFDM.

La principal diferencia entre estos chips, radica en el hecho de que DS2 comprende los equipos BPL, mientras que Intellon está diseñado para operar exclusivamente en redes de área local o LAN, como un complemento a conexiones de internet ya existentes en un lugar.

En la siguiente figura se presenta un cuadro comparativo entre los dos principales desarrolladores de chips PLC.

Desarrolladores de Chipsets		
Velocidad de Transferencia disponible	200 Mbps	Hasta 85 Mbps
Principal aplicación actual	Acceso / Red de Area Local	Red de Area Local Estandar Homeplug 1
Rango de Frecuencias	De 1 MHz a 38 MHz	De 4.3 MHz a 20.9 MHz
Modulación	• OFDM Adaptive • 1280 canales portadores • "Bit rate" adaptable por portador, de acuerdo al ruido en los canales • FEC (Forward Error Correction)	• OFDM • 84 canales portadores • Adaptacion automática por portador • FEC (Forward Error Correction)
Velocidad de transferencia en desarrollo	200 Mbps	Hasta 200 Mbps cuando Protocolo Homeplug AV esté disponible, estimado para 3Q 2006
Modelo de Distribución	Licenciamiento de tecnología	Disponibilidad comercial sin requerimiento de licencias

Figura 1.6: Tabla comparativa entre los Chips DS2 e Intellon

Intellon es el propietario del Semi-Monopolio de chips HomePlug. Hasta ahora, casi todos los dispositivos PLC del mercado se basan en juegos de chips de Intellon. Mientras que en la primera generación, los equipos se basaban en dos elementos, ahora contienen un solo chips que opera para interfases HomePlug, Ethernet y USB. Así solo se necesitan pocas partes para ensamblar el producto, sobretodo si se usa la interfase USB. La variante de Ethernet necesita de alimentación propia y algunas partes análogas adicionales por lo que el precio es un poco mayor que el de las versiones USB. Pese a constituir una tecnología de acceso a internet relativamente nueva, existen varias empresas trabajando en el desarrollo constante de ésta.

Entre las características de la tecnología PLC se pueden citar:

- Niveles de velocidad que van desde los 14 Mbps a los 85 Mbps para las primeras versiones del estándar para redes locales HomePlug. Hasta llegar a velocidades que

superan los 200 Mbps de ancho de banda y simétricos a repartir (misma velocidad para bajar y subir contenidos) entre usuarios de una misma red.

- Menores costos de instalación, ya que no requiere de despliegue de sistemas de cableado adicional al utilizar el cableado eléctrico existente en el hogar del usuario.
- En lo referente a la seguridad, PLC cumple con todos los estándares definidos por la IEEE en lo que a redes de datos se refiere. Es así que por medio de mecanismos de autenticación basados en protocolos cliente/servidor se garantiza la seguridad dentro de la red. En donde el servidor actúa controlando el tráfico hacia y desde los clientes, mientras el cliente mantiene su privacidad por medio de la implementación de redes virtuales VLAN.
- La seguridad también es proporcionada por las técnicas de encriptación aplicados a los datos (método de cifrado DES y TripleDES), de manera de evitar la intrusión de usuarios no autorizados a la red PLC.
- Utilización de técnicas de modulación apropiadas, como OFDM que permite que los datos sean transferidos de una portadora a otra a medida que cambian las condiciones de ruido y las características de la línea eléctrica en tiempo real.
- Aplicación de técnicas robustas de corrección de errores, así como priorización del tipo de servicio de acuerdo a sus características, utilizando para ello QoS.
- Responde a estándares de los equipos de transmisión de datos y convive con los demás equipos de la red con los mismos protocolos de management, monitoreo y seguridad que ellos.

1.7 PLC frente a otras tecnologías

Más allá de que PLC es relativamente nuevo en comparación a otras tecnologías de acceso ya existente, igualmente ha alcanzado un desarrollo significativo. Logrando equiparar e incluso superar a sus potenciales competencias en algunos aspectos.

En la presente tabla se puede comparar las características generales que tiene PLC (BPL) frente a otras tecnologías que ofrecen acceso a banda ancha.

TECNOLOGÍA	PLC	FIBRA ÓPTICA	CABLE	WIRELESS LOCAL LOOP	XDSL	SATELITE VSAT
ANCHO DE BANDA/FLUJO	200 Mbps / Simétrico- Asimétrico	1000 Mbps / Simétrico	20 Mbps / Asimétrico	100 Mbps / Asimétrico	2 Mbps / Asimétrico	1 Mbps / Asimétrico Residencial
APLICACIÓN TÍPICA	Residencial / Comercial/In Home	Comercial	Residencial	Comercial	Residencial / Comercial	Residencial / Comercial
VENTAJAS	Omnipresencia Bajo Costo	Capacidad / mas Fiable	Bajos Costos Múltiples Servicios	Omnipresencia	Bajos Costos Múltiples Servicios	Omnipresencia
PRINCIPALES DESVENTAJAS	Tecnología en desarrollo / Sin Estándares	Alto Costo / Difícil Instalación	Cobertura / Costo	Costo / Línea de Vista Forzosa	Límite de Cobertura / Distancia	Bajo Ancho Banda / Alto costo CPE

Figura 1.7: Tabla comparativa de tecnologías de acceso a internet

Del mismo modo, en la siguiente tabla se detallan las características del servicio proporcionado por PLC frente a otras tecnologías de acceso a internet.

Características	Tecnologías Cableadas					Tecnologías Inalámbricas	
	PLC	Ethernet	Cablemodem	ADSL	Fibra	Wi-Max	Wi-Fi
Acceso	Si	No	Si	Si	Si	Si	No
Simetría	Si	Si	No	No	Si	No	No
Movilidad	Si	No	No	No	No	Si	Si
Calidad de Servicio	Si	Si**	Si	Si	Si	Si	No
Clase de Servicio							
Seguridad Informática	Si	Si**	Si	Si	Si	Si	No
** Requiere equipamiento adicional							

Figura 1.8: Tabla comparativa de características del servicio entre tecnologías de acceso a internet

CAPITULO II

DESCRIPCIÓN DE LA RED ELÉCTRICA Y COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL PLC

2.1 Introducción

A fin de entender el funcionamiento de la tecnología powerline, es necesario conocer las características de la red eléctrica donde se desenvuelve. La que si bien constituye un medio mucho más accesible para el usuario final en lo que a despliegue se refiere, presenta desafíos para su utilización como un canal de transmisión de datos.

Las redes de distribución eléctrica, al no ser concebidas para prestar servicios de telecomunicaciones se presentan como un medio hostil para la señal de PLC. La cual debe convivir con una amplia gama de ruidos y dificultades de acoplamiento, entre otros inconvenientes.

Por lo anterior, en el presente capítulo se describirá el sistema eléctrico de potencia, en donde se desenvuelve la tecnología PLC.

2.2 Sistema eléctrico de potencia

Un sistema de potencia de energía eléctrica tiene cuatro componentes principales: generación, líneas de transporte, las subestaciones o estaciones transformadoras y el sistema de distribución.

Al crecer las pérdidas en las líneas de potencia con el cuadrado de la corriente I^2 , las empresas deben mantener la corriente tan pequeña como sea posible, sobre todo a distancias grandes. De este modo, para transmitir una determinada potencia a largas distancias con una pequeña corriente, se usa alto voltaje, el cual se va bajando a medida que la distancia se acorta, generando de esta forma una jerarquía en términos de voltaje en la transmisión de energía eléctrica y disminuyendo las pérdidas por calentamiento de los conductores y por efectos

electromagnéticos (efecto Joule). Se produce entonces una jerarquización de los niveles de tensión, que van desde la alta tensión, media tensión y baja tensión.

En la siguiente figura se aprecia la jerarquía de tensiones, además de los valores nominales de tensión presentes en cada nivel.

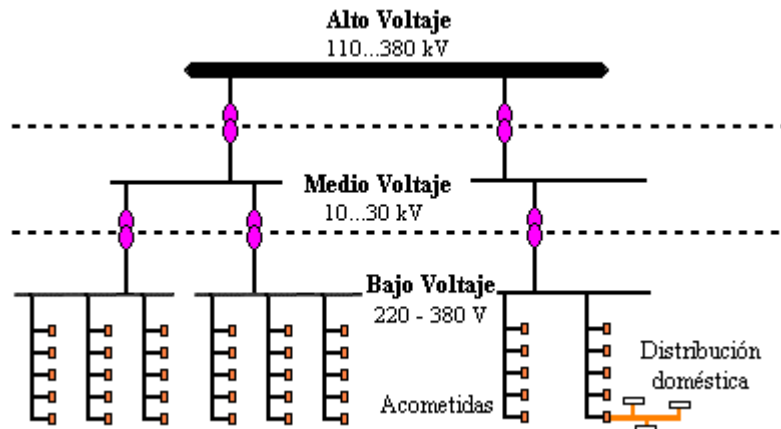


Figura 2.1: División jerárquica de las redes eléctricas

2.2.1 Generación

La energía eléctrica se genera en las Centrales Eléctricas. Una central eléctrica es una instalación que utiliza una fuente de energía primaria para hacer girar una turbina que, a su vez, hace girar un alternador, que produce energía en corriente alterna sinusoidal a voltajes intermedios, entre 6 KV y 23 KV.

2.2.2 Transporte

La red de transporte de energía eléctrica constituye el medio físico, a través del cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica desde las centrales eléctricas, hasta los centros de consumo abarcando grandes distancias. La mayoría de los tendidos de alta tensión son aéreos, y los valores de tensión eléctrica que se manejan son del orden de los cientos de kilovoltios. Siendo en nuestro país del orden de los 220 KV a 500KV.

Está constituida tanto por el elemento conductor, generalmente cables de cobre y aluminio, como por elementos de soporte, las torres de alta tensión. Dependiendo de las

características físicas a las que se vea sometida la torre de alta tensión (viento, temperatura del conductor, temperatura del viento), estas pueden ser de una gran variedad. Entre ellas, las más importantes y más usadas son las torres de amarre, las cuales deben ser resistentes para soportar las grandes tracciones producidas por los elementos antes mencionados, usadas cuando es necesario dar un giro con un ángulo determinado para cruzar carreteras, evitar obstáculos o cuando es necesario elevar la línea para subir un cerro. Existen además las torres de suspensión, usadas para llevar al conductor de un sitio a otro, tomando en cuenta que sea un trayecto en línea recta.

2.2.3 Subestaciones

Una subestación eléctrica es usada para la transformación de la tensión de la energía eléctrica. El componente principal de una subestación eléctrica es el transformador. Se encuentran junto a las centrales generadoras (Subestación elevadora) y en la periferia de las diversas zonas de consumo (Subestación reductora), enlazadas entre ellas por la Red de Transporte.

Las subestaciones eléctricas elevadoras se ubican en las inmediaciones de las centrales eléctricas para aumentar la tensión de salida de sus generadores. En Chile los niveles de tensión normalizados más habituales para el SIC (Sistema Interconectado Central) son 66, 110, 154, 220 y 500 kV. De ellos, los dos últimos corresponden a la red de transporte y el resto son de la red de distribución.

Cerca de las poblaciones y de los consumidores, se encuentran las subestaciones eléctricas reductoras que reducen el nivel de tensión para que sea apto para su uso por parte de medianos consumidores (fábricas, centros comerciales, hospitales, etc). Dicha reducción tiene lugar entre tensiones de transporte a tensiones de distribución. Repartidos en el interior de las ciudades existen centros de transformación (CT's) que bajan la tensión a 380 V en trifásica (tres fases y neutro), la cual es apropiada para su distribución a pequeños consumidores, entre los que se encuentra el consumo doméstico. Para este tipo de consumo se utiliza en cada vivienda una fase y el neutro, por lo que la tensión que se mide con un multímetro es de 220 V.

2.2.4 Distribución

Las redes de distribución de energía incluyen todos los elementos de transporte de energía eléctrica comprendidos entre las subestaciones primarias, donde la transmisión de potencia se reduce a niveles de distribución, y las bajadas de servicio a los abonados. La función de las redes de distribución es recibir la energía eléctrica de las centrales de producción o estaciones primarias y distribuir a los usuarios a la tensión adecuada, con la conveniente continuidad y calidad de suministro para los distintos usos.

Las redes de distribución de energía son típicamente radiales, esto es, el flujo de potencia nace sólo de un nudo. Este nudo principal se reconoce como la subestación que alimenta al resto de la red. Se encuentran en áreas urbanas y rurales, pudiendo ser aéreas, o subterráneas (estéticamente mejores, pero mas costosas). La red de distribución está formada por la subestación de distribución, la red en Media Tensión (entre los 10 Kv y 30 Kv) y en Baja Tensión (220/380 V).

En las ciudades, las líneas de media tensión suelen encontrarse por lo general en calles principales y son las que llevan un voltaje y amperaje necesario para el consumo de los sectores a los cuales han sido asignados. Por lo general, estas líneas suelen estar compuestas por alambres de grueso calibre y que van en la parte más alta de un poste de distribución urbana, transportando unos 12 Kv.

Los sistemas de distribución en baja tensión, que operan a continuación de la red de media tensión, poseen tensiones entre los 220 y 380 volts, y entregan la potencia y energía demandada por usuarios distintos. Las líneas de baja tensión comprenden los transformadores de media a baja tensión y el cableado que llega hasta los hogares o usuarios finales.

Dentro de este esquema jerárquico de redes eléctricas, se puede hablar del ámbito PLC que, dependiendo de las características técnicas y/o requerimientos, se puede iniciar desde la red de media tensión hasta el medidor del usuario final, o desde la red de baja tensión hasta el usuario final. Lo anterior se resume más claramente en la figura siguiente:

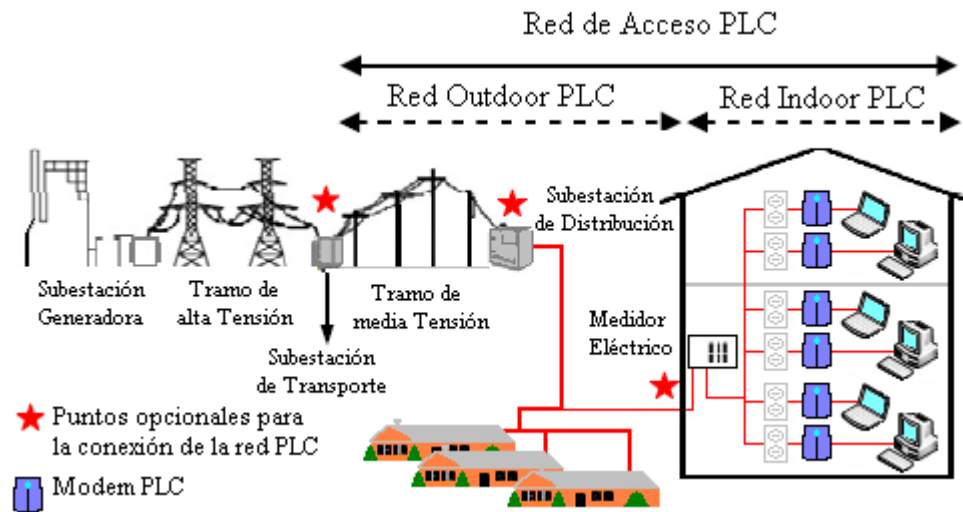


Figura 2.2: Ámbito de funcionamiento de la tecnología PLC

Como se observa en la figura anterior, la tecnología PLC se puede desplegar indistintamente tanto en el tramo de Media, como de Baja Tensión.

2.3 Dificultades de la red eléctrica

La red eléctrica presenta una serie de dificultades por tratarse de un medio que inicialmente no fue concebido para la transmisión de señales en alta frecuencia, como es el caso de la señal PLC. Las características del canal eléctrico son dependientes de la frecuencia, del tiempo y de la localización del transmisor y del receptor. En resumen, la red eléctrica tiene las siguientes características que dificultan la comunicación a través de ellas:

- Presenta desadaptaciones de impedancia producidas por los diversos aparatos conectados a la red de suministro eléctrico, las cuales además producen reflexiones.
- Su atenuación se incrementa con la distancia y con la frecuencia.
- Su impedancia característica varía con el tiempo en un rango muy grande según estén o no conectados ciertos aparatos eléctricos.
- Presenta ruido de fondo estacionario durante segundos u horas.
- Contiene ruido impulsivo con duraciones que van de microsegundos a milisegundos.

Europa. Con una distorsión baja, C_d cambia notoriamente, por eso se recomienda su uso cuando se desea conocer el contenido armónico de una señal.

$$C_d = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_{rms}} \times 100\%$$

Distorsión armónica total (THD)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito.

Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales. Al igual que el C_d es útil cuando se trabaja con equipos que deben responder sólo a la señal fundamental, como en el caso de algunos relevadores de protección.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \times 100\%$$

a) Armónicos de corriente

Un equipo puede alcanzar corriente hasta un mínimo regulado. Normalmente, antes que se alcance este límite el condensador se recarga hasta el valor de "peak" en el siguiente semiperíodo de la onda sinusoidal. Este proceso se repite una y otra vez. Básicamente, el condensador sólo absorbe un impulso de corriente durante la cresta de la onda; durante el tiempo restante de la misma, cuando la tensión es inferior al valor residual del condensador, éste no absorbe corriente.

Normalmente las fuentes de alimentación con condensador y diodos que llevan incorporado los equipos de oficina son cargas monofásicas no lineales. En las plantas industriales, por el contrario, las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas no lineales, como motores de accionamiento controlados electrónicamente y fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS). En la siguiente tabla se muestran algunas cargas lineales con valores de distorsión armónica total de corriente:

<i>Cargas lineales</i>	
Elemento	Distorsión armónica total de corriente THDi (%)
UPS	36,8
Regulador electrónico de velocidad - ASD	96,6
Fotocopiadora (fuente conmutada)	90,0
Computador personal (fuente conmutada)	84,9
Lámpara electrónica compacta	124,9
Tubo fluorescente (1)	10,4
Refrigeradora (1)	17,2
Televisor-lámpara electrónica compacta	52,1
Licuada	9,6
Convertidor de potencia AC/DC	13,8
Transformador de subestación	9,0

Figura 2.3: Tabla valores de distorsión armónica total de corriente THDI (%) de cargas lineales

En la siguiente tabla se presentan los valores para cargas no lineales:

<i>Cargas no lineales</i>	
Ventilador	1,80
Refrigeradora (2)	13,4
Horno microondas	18,2
Aspiradora doméstica	26,0
Tubo fluorescente (2)	39,5
Televisor de 14 pulgadas	121,0
Computador-impresora	140,0
Equipo de sonido moderno (1.000W de salida)	45,8

Figura 2.4: Tabla valores de distorsión armónica total de corriente THDI (%) de cargas no lineales

b) Armónicos de tensión

Una red de alimentación puede ser fuente indirecta de armónicas de tensión. La relación entre la corriente armónica absorbida por cargas no lineales y la impedancia de fuente del transformador de alimentación se rige por la ley de Ohm, lo que provoca armónicas de tensión. La impedancia de fuente la constituyen el transformador de alimentación y los componentes de la línea.

Todas las cargas que compartan un transformador o una barra con fuente de carga de armónicas podrán ser afectadas por las armónicas de tensión producidas por los distintos componentes del sistema. Se da la irónica circunstancia de que un computador personal es

particularmente sensible a las armónicas de tensión. El rendimiento de la fuente de alimentación por condensador y diodos depende críticamente de la magnitud del peak de la onda de tensión. Las armónicas de tensión pueden provocar un achatamiento de los máximos de amplitud de la onda de tensión, reduciendo de ese modo el “peak” de tensión. En el peor de los casos puede llegar a “resetearse” el computador a causa de la falla de alimentación.

En el entorno industrial, los motores de inducción y los condensadores para corrección del factor de potencia también pueden resultar gravemente afectados por las armónicas de tensión. Los condensadores de corrección del factor de potencia pueden formar un circuito resonante con las partes inductivas de un sistema de distribución de corriente. Si la frecuencia resonante es coincidente con la frecuencia de la tensión armónica, la corriente armónica podrá aumentar considerablemente, sobrecargando los condensadores y quemando los fusibles de éstos. Luego, en caso de ocurrir esto la falla del condensador desintoniza el circuito y la resonancia desaparece.

2.3.2 Ruido

Contrariamente a lo que sucede con otros canales de comunicaciones, el ruido en el canal de las líneas de energía no se puede representar como un ruido blanco gaussiano aditivo. Si la cantidad de las señales que interfieren son demasiadas grandes, con respecto a la señal atenuada y a la señal distorsionada, los receptores tendrán dificultades para reproducir la información original con la confiabilidad suficiente.

Varias de las señales que interfieren se generan de las cargas conectadas, debido a muchas interconexiones, diferentes tipos de conductor y, por lo tanto, tienen diferentes orígenes y características. Es así que un entorno donde se emplea la tecnología PLC, se encuentran presentes cuatro tipos de ruido: ruido síncrono, de fondo, asíncrono y ruido impulsivo. Estos cuatro tipos de ruido se presentan dentro de un rango de frecuencias que va desde los kilohertz hasta los 20MHz.

a) Ruido Síncrono

A este ruido se lo denomina así, ya que está en sincronía con la frecuencia del sistema de energía (50Hz). Normalmente este ruido es causado por los rectificadores controlados de silicio (SCR), el cual conmuta cuando la tensión cruza un cierto valor. Este ruido es considerado como

un fenómeno que no ocurre regularmente, pero una vez que sucede puede durar muchas horas. El nivel de ruido normalmente no excede los -70 dBW por cada armónico.

b) Ruido de fondo

Este ruido está siempre presente y generalmente está dado por un espectro plano. Es de naturaleza estocástica y tiene una densidad espectral de energía relativamente baja, de este modo puede ser modelado como ruido blanco limitado en banda con distribución gaussiana.

Valores alto de densidad espectral son característicos en redes comenzando en la frecuencia de alimentación (50 Hz) a frecuencias alrededor de 20 KHz. A partir de ella se nota un decrecimiento de la densidad a medida que crece la frecuencia. En 150 KHz es normal que sea 1/1000 del valor medido en 20 KHz.

c) Ruido Asíncrono

Estos tipos de ruidos son los que no tienen relación con la frecuencia de la red o armónicos superiores. Las fuentes de ruidos más importantes para este caso, son los monitores de televisión y los de computadoras, producto de la exploración y sincronización de las señales en este tipo de aplicaciones.

Una característica de este ruido es que ellos ocurren a frecuencias conocidas, como por ejemplo los sistemas de televisión (PAL) a la frecuencia 15625 Hz y armónicos superiores. El ruido de banda estrecha también se encuentra dentro de esta categoría, este ruido consiste en señales sinusoidales de amplitud modulada. La fuente de este tipo de ruido son las estaciones de radio y las variaciones del nivel del mismo, según la hora del día. El ruido de fondo mostrado en la Figura 2.5 representa una forma típica de esta clase. En la Figura también se muestra el ruido síncrono, en donde se puede visualizar los armónicos de la frecuencia de la red. El ruido impulsivo se distingue de los demás debido a la característica de la señal, la cual presenta picos de gran amplitud y corta duración de tiempo.

d) Ruido impulsivo

Este tipo de ruido está caracterizado por picos de tensión muy potentes pero de corta duración, y pueden producir impulsos que saturan cualquier receptor por periodos de alrededor de 10 a 100 μseg y pueden alcanzar magnitudes de hasta 2 kV. Estos impulsos tienen tiempos de subida muy rápidos y son virtualmente imposibles de filtrarlos. Los impulsos son generalmente periódicos con dos veces la frecuencia de la línea de energía, entre 100 o 120 Hz, y muchos ocurren durante medio ciclo, debidos a la conmutación de varias cargas. La red y sus cargas unidas poseen inductancia y capacitancia que pueden producir resonancia en una frecuencia, que depende de la carga instantánea, produciendo atenuación de las formas de onda que duran varios ciclos en las frecuencias de comunicaciones. El ruido impulsivo aparece solo como un acontecimiento único y es causado por todas las operaciones de conmutación, tales como los cierres de contactos. Este tipo de ruido se modela como una señal de impulso debido a su presencia relativamente corta.

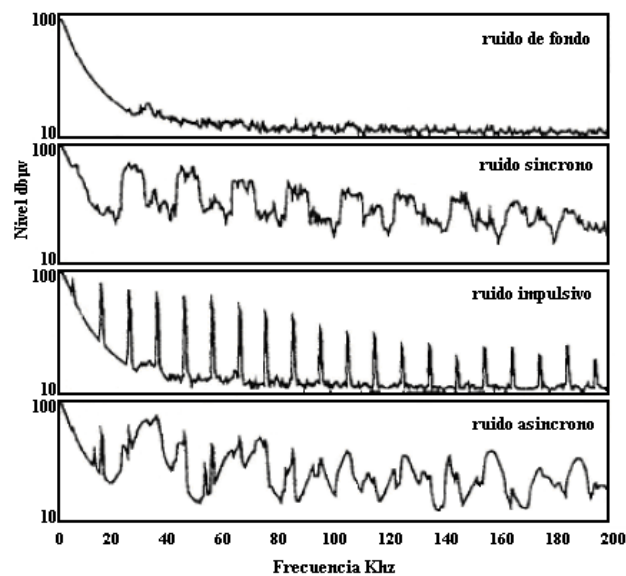


Figura 2.5: Diferentes tipos de ruidos

2.4 Comportamiento de PLC en la red eléctrica

Como se ha mencionado en los puntos anteriores, las redes de distribución eléctrica presentan un ambiente que se caracteriza por presentar una impedancia variable con el tiempo y

la frecuencia, múltiples reflexiones, así como niveles variables de interferencia electromagnética y ruido. Dependiendo de la duración de la interferencia, uno o más bits pueden ser corrompidos.

Otro problema que limita la transmisión a alta velocidad es la atenuación. Generalmente, el valor de la atenuación de una señal está relacionado con la frecuencia y la distancia recorrida por la señal. Este hecho limita considerablemente la distancia de transmisión en altas frecuencias.

En una red eléctrica, la conexión y desconexión de equipos de distintos tipos es muy frecuente, generándose picos y valles de carga lo que crea un ambiente electromagnético particular. La impedancia que desbalancea los dispositivos conectados a la red, puede resultar insignificante para la red eléctrica misma, sin embargo, la pérdida de señal para las comunicaciones de datos a determinadas frecuencias y situaciones de carga de potencia, provoca que algunas de estas frecuencias prácticamente desaparezcan. Además los cables eléctricos al no estar trenzados emiten una radiación elevada que puede interferir a las emisiones de radio.

Según el estudio realizado para el “Congreso Argentino en Ciencias de la Computación 2007”, titulado “Comportamiento de la tecnología PLC en la red eléctrica”, el ruido de fondo medido en una red domiciliaria en reposo, además del ruido generado por motores (secadores de pelo, refrigeradores, licuadoras, etc.) y la interferencia de banda angosta producida por un aparato de televisión es como se presentan en la siguiente figura:

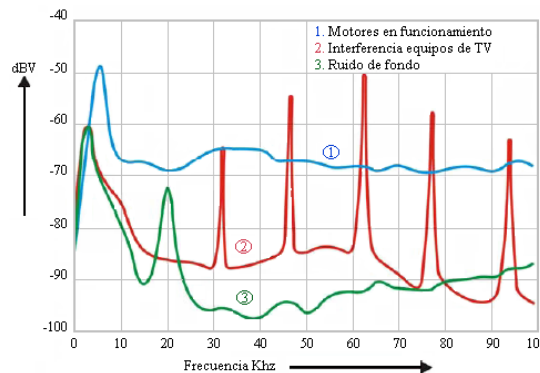


Figura 2.6: Posibles interferencias en una red eléctrica

El ruido de fondo no representa un factor de interferencia crítica para todo tipo de transmisión de información, al ser sus niveles relativamente bajos. En contraste, las interferencias causadas por los motores, como se observa en la curva 1, poseen valores más críticos. En el rango de frecuencias registradas es mucho mayor, que el ruido blanco en un valor de 20 dB.

La curva 2 de la figura 2.6, muestra la interferencia de banda angosta producida por un aparato de televisión. No se observa la frecuencia fundamental en 15,734 KHz, posiblemente por algún filtro del aparato. Sin embargo, las armónicas son de gran amplitud. Un sistema de transmisión que trabajara en ese rango de armónicas no hubiera podido funcionar mientras el televisor estuviera encendido. La ubicación de estas es constante, al punto que podría eliminarse ese rango de frecuencia.

La relación de la señal útil frente a la señal de ruido, como se sabe, se expresa en dB. Se la conoce como relación señal a ruido. En los enlaces de datos esta relación está directamente vinculada a la cantidad de bits erróneos frente a la cantidad de bits enviados. Es lo que se conoce como BER (Bit Error Rate).

2.4.1 Capacidad del canal de Powerline

Se llama capacidad del canal, a la velocidad a la que se pueden transmitir los datos en un canal de comunicación de datos, como es el canal de Powerline. Dicha capacidad, que es expresada en bits por segundo a la que se pueden transmitir los datos, se ve limitada por el ruido existente en el canal, así como por el ancho de banda del mismo.

Ahora bien, las limitaciones del ancho de banda por sí solas no imponen restricciones en la tasa máxima de información. Esto se debe a que sigue siendo posible para la señal tomar un número infinitamente grande de valores distintos de voltaje para cada pulso de símbolo, siendo cada nivel levemente distinto del anterior, que representa a un determinado significado o secuencia de bits. Sin embargo, las limitaciones del ancho de banda combinadas con el ruido, provocan un límite a la cantidad de información que se puede transferir por una señal de potencia limitada.

Para llevar a cabo la cuantificación de información, así como su tasa de transmisión se utiliza la Ley de Shannon, la cual permite estimar la capacidad de un canal con ruido.

La expresión matemática utilizada es como sigue:

$$C = B * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde C indica la máxima velocidad de transmisión de datos en bps, B es el ancho de banda del canal y S/N es la relación señal a ruido del mismo.

Esta fórmula no es aplicable directamente a un canal de PowerLine, ya que la relación señal a ruido no es constante con el ancho de banda B, ya que puede variar sustancialmente. Sin embargo, en la práctica la densidad de potencia de señal transmitida $S_{rr}(f)$ y la densidad de potencia de ruido $S_{nn}(f)$ son dependientes de la frecuencia.

Se les puede considerar dentro de un rango, por lo tanto la formula se puede modificar:

$$C = \int_{f_u}^{f_o} B * \log_2 \left(1 + \frac{S_{rr}(f)}{S_{nn}(f)} \right) df \quad \text{con } B = f_o - f_u$$

Para obtener la expresión anterior se debe conocer el espectro de densidad de potencia de señal transmitida $S_{rr}(f)$. Esta será modificada por el comportamiento del canal, el cual se representa por la función de transferencia $H(f)$ y la densidad de potencia de ruido $S_{nn}(f)$.

$$S_{rr}(f) = S_{nn}(f) * |H(f)|^2$$

La función transferencia, como la densidad de potencia de ruido son características fijas en un canal. Ellas son obtenidas por mediciones efectuadas sobre él. Por lo tanto, las únicas variables que quedan es la densidad de potencia transmitida, la cual está determinada principalmente por el esquema de modulación aplicado.

Luego, se podría concluir que altas velocidades de datos podrían ser alcanzadas aún en canales malos, si la densidad de potencia no fuera limitada. Sin embargo los requerimientos de compatibilidad electromagnética entre PLC y otros servicios inalámbricos establecen limitaciones en el rango de interés de alta velocidad de PLC, por ejemplo entre 1 MHz y 30 MHz.

Las mediciones en numerosos canales, a través de la evaluación de las formulas anteriores, indican que el ancho de banda disponible B, representa el recurso más importante para lograr altas velocidades. Como el ancho de banda en la práctica está fragmentado, diferentes

canales de ancho variable serían distribuidos en el rango de 1 MHz a 30 MHz, obligando a elegir un esquema de modulación que permita un máximo aprovechamiento del mismo.

La capacidad del canal decrece con la distancia debido al comportamiento pasa bajo del canal powerline. Por ejemplo, para distancias de 100 m teóricamente excede los 250 Mbps, aun en distancias de 300 m y restringido a una rango de 5 MHz se puede obtener 14 Mbps. Pero se debe tener en cuenta que en enlaces de más de 200 m en la mayoría de los casos las frecuencias por arriba de 10 MHz no contribuyen en nada.

2.4.2 Característica del canal BPL

El desarrollo de la tecnología de acceso o BPL lleva cierta desventaja comparado con la tecnología PLC indoor (que se abordará en el siguiente punto), debido a que aún es materia de estudio la elección de un estándar único para este tramo de la tecnología PLC. Sin embargo, existe cierto consenso, avalado por estudios, en lo que respecta a la banda de frecuencia necesaria para desarrollar la tecnología BPL, la cual sería hasta la frecuencia de 10MHz aproximadamente.

La razón de elegir este rango de frecuencia se debe a que se produce un efecto de filtro en los cables de áreas residenciales densamente pobladas. Allí, al existir una gran cantidad de derivaciones a los hogares (siendo estos de longitud constante), se produce una característica de FIR (Filtro de respuesta impulsiva), lo que hace que se supriman completamente los rangos de frecuencia por arriba de unos pocos MHz.

Las investigaciones confirman que la velocidad de los datos puede estar en el orden de los Mbps, aún en enlaces críticos. Los distintos tipos de cables no exhiben un comportamiento completamente diferente, pero sus características más importantes se las puede describir con pocos parámetros. Otro resultado importante es la posibilidad de transmitir señales con niveles de potencia moderados. Esto mejora los problemas que se presentan, a causa de fenómenos de compatibilidad electromagnética. En la Figura 2.7, se muestra el resultado de la medición de atenuación y ruido en un cable de tierra de 300 m en un rango de frecuencia de 500 KHz a 20 MHz. Se puede observar, que la atenuación crece con la frecuencia. También un comportamiento pasa bajo, condición que es común a todo cable de conexión a tierra. Puede verse esto, como una propiedad fundamental para frecuencias por arriba de 500 KHz.

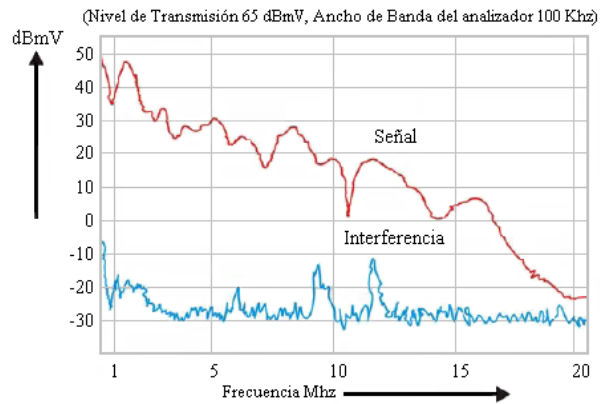


Figura 2.7: Atenuación y ruido en un cable de tierra de 300 m

En la misma figura, se puede observar en un rango extendido, la existencia de ruido de fondo, claramente por debajo de la señal recibida. La relación S/R está medida en el orden de los 50 dB, en el rango de 500 KHz a 6 MHz.

En las cercanías de los 7 MHz, se puede observar que la relación es de 20 dB, lo cual es suficiente para transmisiones de alta velocidad sin perturbaciones. En el rango de 9 a 12 MHz, se observan picos de banda angosta. Ellos corresponden a las señales de difusión de onda corta. Esto lleva a que niveles de transmisión de 65 dBmV, equivalente a 1,77 V que garantizan una comunicación powerline, puedan perturbar la recepción de las señales de radio.

Las condiciones representadas en la Figura 2.8, representan un canal muy favorable. La calidad de los ellos varía enormemente, y uno de los parámetros que interviene es la longitud del cable. En la siguiente figura se representa la atenuación de cables de distintas longitudes.

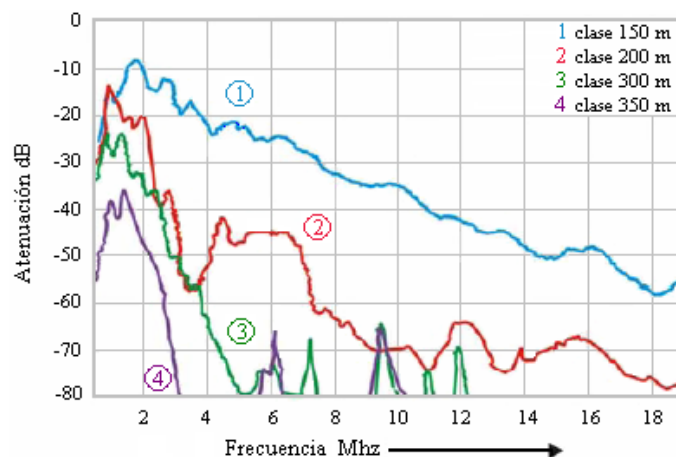


Figura 2.8: Atenuación y ruido en cables de distinta longitud

La curva obtenida para la atenuación en cables cortos, del orden de los 150 m, presenta una característica pasa bajo y niveles de atenuación por debajo de los 60 dB hasta los 20 MHz.

Esto indica, que pueden establecerse comunicaciones sin problemas, aún con modelos de modulación simple y bajos niveles de transmisión. Para los cables de 200 m la atenuación crece significativamente, particularmente más de 25 dB. Esto sucede, quizás, debido a que en esta distancia haya muchos más clientes conectados, que en el cable de 150 m.

Dos casos muy extremos son los cables de 300 m y 380 m. allí se ve que el comportamiento pasa bajo está limitado a frecuencias muy bajas. Esto debido a un mayor número de conexiones domiciliarias que hace se comporte como un filtro de respuesta impulsiva finita.

Del análisis se desprende que, el ancho de banda disponible para BPL, en el tramo de acceso, está por debajo de los 4 MHz. Además, las frecuencias bajas deben ser utilizadas en los enlaces de mayor distancia.

2.4.3 Comportamiento del canal PLC Indoor

La red eléctrica de baja tensión se caracteriza por presentar una impedancia variable con el tiempo y la frecuencia, múltiples reflexiones, así como niveles variables de interferencia electromagnética y ruido. Entre los equipos domésticos que más interferencias introducen a la red eléctrica se encuentran los monitores, los calentadores de inducción, las estaciones de radio o las fuentes de alimentación.

La interacción de estos dispositivos eléctricos supone un problema importante debido a que las frecuencias y nivel de ruido de la red cargada son prácticamente del mismo rango que de la señal a transmitir. Además los cables eléctricos al no estar trenzados emiten una radiación elevada que puede interferir a las emisiones de radio.

En la Figura 2.9 se muestra la curva de atenuación y ruido de una instalación domiciliaria de un edificio. Se observa, que el ruido también está presente en este tipo de instalación, y que tiene las mismas características que el canal outdoor. Además el mismo tiene un rango de atenuación de 40 a 80 dB.

Al comparar las curvas de atenuación del canal outdoor, con las indoor, a pesar de la corta distancia de este último, se puede ver claramente en las curvas de atenuación que se pierde la característica pasa bajo. Esto, obviamente es debido a su corta distancia.

En la instalación del piso 2° se tienen valores de atenuación en el rango de los 20 MHz que permitirían utilizar la red eficientemente para los fines de telecomunicaciones. Ello sugiere extender el ancho de banda a frecuencias mayores y hace que el ancho de banda de 10 MHz a 35 MHz o más aparezca como atractivo para el segmento de red Indoor PLC.

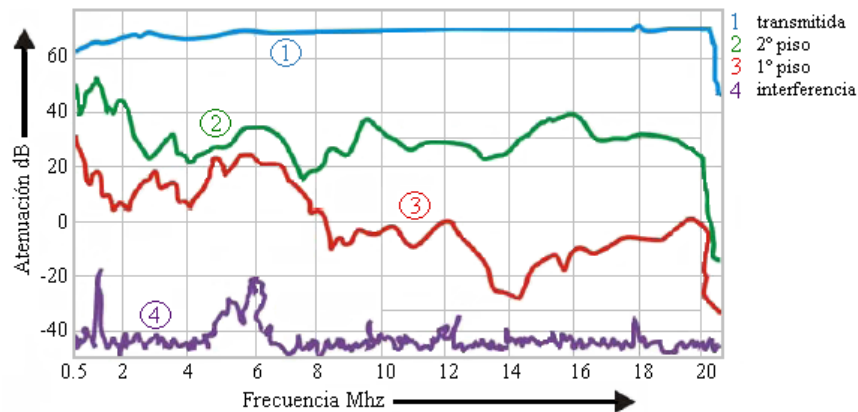


Figura 2.9: Curva de atenuación y ruido en una instalación domiciliaria

Estos datos estarían en concordancia con la norma ETSI Especificación Técnica ETSI TS 101 867 V1.1.1 (2000-11): PowerLine Telecommunications (PLT); Coexistence of Access and In-House PowerLine Systems. En ella, a los sistemas PLC outdoor, se los llama PLT Access; y a los Indoor PLC como PLT In-House. La misma establece el ancho de banda que se destina a cada tipo de servicio y además los niveles de densidad de potencia (PSD) que deben existir para los distintos anchos de banda, y entre la separación de ellos, para la coexistencia de ambos sistemas.

En los últimos años se han realizado importantes progresos en las técnicas de modulación, codificación de canal y corrección de errores para solventar los problemas derivados de la transmisión por red eléctrica.

En el capítulo siguiente se describirán las diferentes técnicas de codificación y modulación usadas por la tecnología PLC.

CAPITULO III

ESTANDARIZACIÓN EN PLC

3.1 Introducción

La estandarización de ciertos procesos o fabricación de componentes garantiza que pueda existir una interoperabilidad entre los diferentes actores que participan en el desarrollo de una tecnología. Al hablar de estandarización en las telecomunicaciones se hace mención de la necesidad de poder contar con normas, esto es, generar especificaciones que regulen la realización o elaboración de productos de diferentes fabricantes, garantizando que exista un correcto acoplamiento de elementos construidos independientemente. Lo anterior evita que se generen arquitecturas cerradas y monopolios, al contar con una variedad de equipos de diferentes fabricantes que permiten realizar las mismas prestaciones, y con la misma calidad según lo que estipule la norma correspondiente.

Disponer de un marco regulatorio estable es esencial para el desarrollo y la aplicación práctica de la tecnología power line communications. Además, como toda nueva tecnología necesita estándares (bandas de frecuencia, potencia, límites EMC, etc.), para poder desarrollarse comercialmente de manera competitiva al permitir la interoperabilidad entre fabricantes.

3.2 Estandarización y marco regulatorio

Si bien la tecnología PLC ha tenido sustantivos avances en el campo del desarrollo tecnológico, lográndose significativos progresos en los equipos PLC (principalmente del ámbito indoor PLC). La carencia de un estándar único para esta tecnología, de algún modo conlleva un retraso y/o obstáculo para el despliegue definitivo de ella.

Lo anterior se ve reflejado en que actualmente cada empresa de desarrollo tecnológico se ha enfocado en diseñar y producir sus propios protocolos propietarios, independientemente del resto. Por lo cual, se genera un problema de incompatibilidad entre los equipos desarrollados por las diferentes empresas.

La solución de este problema pasa por llevar a cabo una estandarización. La cual garantice una solución uniforme, que al menos comprenda los siguientes aspectos:

- Fijación de calidades de servicio, frecuencias y comportamiento que permitan establecer una independencia del voltaje de trabajo de la red. Lo anterior, considerando las diferencias de voltaje en los sistemas eléctricos de distintos países del mundo. A sabiendas que a nivel mundial existen sistemas de 110 V y 220 V en redes de baja tensión.
- Normativa para los niveles de emisión electromagnética. Considerado como uno de los aspectos más importantes a considerar para el despliegue de PLC, sobre todo tomando en cuenta las regulaciones establecidas en los niveles irradiados que difieren en los diferentes países.

Este último punto es sin duda muy importante, ya que además de garantizar que usuarios de sistemas PLC puedan usar modem adquiridos en otros países. Permitiría una compatibilidad electromagnética con otros servicios existentes que ya cuentan con una asignación de frecuencias.

En la actualidad existen diversos organismos trabajando por la estandarización de PLC, entre ellas: PLCforum, UPLC (United Power Line Council), ETSI (European Telecommunications Standards Institute), UPA (Universal Powerline Association), PUA (PLC Utilities Alliance), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Opera (Open PLC European Research Alliance) y HomePlug Powerline Alliance.

3.3 Estándares para la tecnología Power Line Communications

3.3.1 Estándar TS 101 867

EL estándar TS 101867 desarrollado por la ETSI o Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones, define el mecanismo técnico para la coexistencia entre sistemas outdoor e indoor con la red de distribución eléctrica.

Recomienda las condiciones de separación de las bandas de acceso y domésticas: como bandas a utilizar por PLC en las aplicaciones de acceso (PLC Access o BPL) establece el

espectro de frecuencias comprendidas entre 1,6 – 10 MHz, reservando al PLC de las aplicaciones de uso doméstico (PLC Inhouse o PLC Indoor) la banda de 10 – 30 MHz.

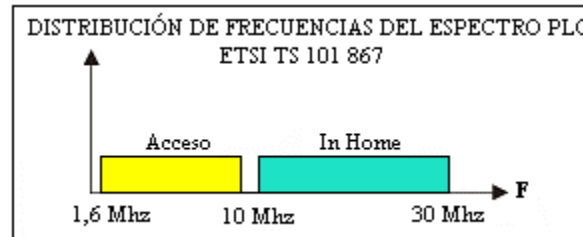


Figura 3.1: Distribución de frecuencias según ETSI TS 101 867

Sin perjuicio de lo anterior, existe una cierta flexibilidad en la asignación de frecuencias. Es así como en el caso de no existir uno de los dos sistemas (Outdoor o Indoor) en ciertos casos puntuales y debido a las limitaciones geográficas, se asigna un mayor espectro al sistema que se encuentre presente, en desmedro del otro sistema que se encuentre ausente.

La condición previa para cualquiera de los dos sistemas que quieran usar el espectro adicional, es la puesta en práctica de un canal común de señalización. El objetivo de esta señalización de canal común es asegurar que los servicios Indoor y Outdoor se encuentren garantizados. Tanto Indoor u Outdoor deben liberar la gama de frecuencia inmediatamente cuando aparezca cualquiera de los dos requiriendo el uso del espectro (en el caso de que uno de los sistemas no se encuentre previamente presente en un lugar).

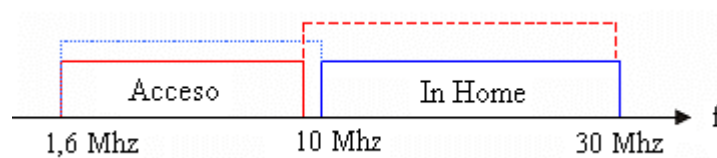


Figura 3.2: Asignación de frecuencias flexibles

3.3.2 Estándar TR 102 049

Este documento elaborado también por la ETSI, contiene una definición de Calidad de Servicio (QoS), parámetros y exigencias QoS para la el establecimiento de una aplicación PLC al interior del hogar o Indoor PLC. Las exigencias de QoS se aplican a servicios como:

- Automatización doméstica
- Telefonía y servicios de voz
- Multimedia interactivos
- Servicio de transferencia de archivos (red de área local)
- Internet y servicios de mensajería

Los requerimientos de QoS se plantean de acuerdo a la aplicación y necesidades del usuario. El objetivo es describir primero las exigencias específicas de cada de usuario antes de establecer los parámetros QoS, que forman el perfil QoS de un servicio particular.

Ciertas aplicaciones (p.ej. MP3 archivos de audio, los vídeos de DVD) pueden usar perfiles fijos predefinidos. La relación entre el uso y el perfil será única para estas aplicaciones. Los perfiles QoS pueden ser usados según los protocolos de descripción de sesión (SDP) definidas en la especificación RFC 2327 en lo que respecta a la petición de QoS a la red. Todos los servicios que no han anunciado sus necesidades, serán transportados como servicios “best-effort” (máximo esfuerzo).

Los servicios proporcionados en la red Indoor PLC, son divididos según su perfil QoS en servicios priorizados y servicios parametrizados. El IETF (Internet Engineering Task Force, en castellano Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet) propuso la recomendación RFC 2475 para servicios priorizados y la recomendación RFC 2210 para ser usada en servicios parametrizados. La red QoS es definida por los siguientes parámetros:

- Rendimiento.
- Retraso (latencia)
- Variación de retraso
- Fiabilidad
- Tarifa de Error de Bit (BER)
- Tarifa de Error de Paquete (PER)
- Probabilidad de descarte de paquete (debido al tiempo de expiración)

Los servicios que solicitan una cierta calidad tienen que especificar sus exigencias para un uso controlado del recurso de red. Distinguiéndose servicios conocidos y servicios desconocidos. Los servicios conocidos, como la reproducción de MP3, la telefonía, son predefinidos por un perfil QoS fijo. El servicio será reconocido por un identificador de tipo de servicio. La reserva será hecha por el perfil predefinido QoS. Ningún protocolo de descripción de sesión es necesario para servicios predefinidos.

Un servicio desconocido tiene que ser descrito según el Protocolo de Descripción de Servicio (SDP) según la recomendación RFC 2327. Los servicios que no son capaces de anunciar sus requerimientos serán controlados sólo como servicios “best-effort” (máximo esfuerzo).

Las aplicaciones en tiempo real, como audio, vídeo o servicios de datos, que exigen una calidad de calidad garantizada de servicio usarán el protocolo de transporte en tiempo real (RTP, Real-time Transport Protocol). Estas aplicaciones proporcionadas por un Proveedor de Internet a través de una red pública de acceso pueden utilizar la Recomendación ITU-T H. 323. Los servicios en tiempo real según la Recomendación ITU-T H. 323 serán transportados sobre la red Indoor PLC según el protocolo RTP. Este estándar describe la distribución de servicios en tiempo real de un conmutador de paquetes de red que no pueda garantizar un QoS.

3.3.3 Estándar OPERA 2

En junio de 2007 salió la primera versión de la especificación de OPERA 2, la cual se elaboró como una propuesta para el estándar IEEE P1901 que aún está en estudio. El Estándar Preliminar IEEE P1901 para Banda ancha sobre Redes de Línea de conducción eléctrica, es el desarrollo del trabajo conjunto entre la IEEE, UPA y OPERA principalmente.

El propósito de este documento es de especificar un sistema para la transmisión de datos que proporcionen los servicios de acceso de BPL basado en la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales. Concretamente esta especificación,

- Describe una capa física (PHY) capaz de lograr tasas de transmisión por encima de 200 Mbps.

- Describe el control de acceso al medio (MAC) optimizado para el ambiente de acceso BPL.
- Describe los mecanismos de QoS disponibles para apoyar las garantías de anchura de banda y estado latente.
- Describe la seguridad que los procedimientos proporcionan a la privacidad de los datos sobre el medio de BPL.

3.3.3.1 Descripción de MAC

En una red preestablecida el acceso al medio es manejado de manera jerárquica. El Head End (HE) maestro planifica el empleo del canal por parte de sus esclavos, dependiendo de los flujos de tráfico y las exigencias de QoS previamente solicitados. El acceso al medio puede ser manejado por el HE usando dos importantes procedimientos.

1. Enviando individualmente a cada uno de los esclavos un conjunto de datos o tramas, transmitiendo datos del HE a los esclavos y finalizando a través de un “token” que contiene el próximo esclavo o la lista de esclavos que utilizarán en un orden predeterminado el canal cuando la primera transmisión haya finalizado. La cantidad de tiempo de uso del canal es asignado por el HE y puede ser fijado para un intervalo de tiempo o no. En el primer caso la asignación del canal puede ser síncrona con la red o no. En el segundo caso si un nodo no utiliza el tiempo entero asignado, el derecho de transmitir es inmediatamente asignado al nodo siguiente en la lista o devuelto al HE.

2. Enviando una muestra de CSMA, eso genera una discusión de priorización entre los nodos que lo reciben. El ganador de la discusión obtendrá el derecho de transmitir la cantidad dada de tiempo, y entonces, el derecho a transmitir es devuelto al HE.

3.3.3.2 Descripción de QoS

Se proporciona varios mecanismos para asegurar el QoS de los flujos de tráfico en la célula BPL. Los flujos de tráfico son sesiones orientadas y etiquetadas con cierta clase de servicio que implica ciertos requisitos en función de la latencia y del ancho de banda, conjuntamente con una exigencia en términos del nivel de certeza de los recursos reservados.

Un esclavo que requiere para transmitir cierto tipo de tráfico, primero lo clasificará en una de las ocho clases de servicio disponibles, cada uno con una latencia preprogramada, ancho de banda y nivel de seguridad de los recursos necesarios, que puede ser la Tasa Variable de Bit (VBR), la Tasa Constante de Bit (CBR), la Tasa Disponible de Bit (ABR) o “Best Effort”. El realizar un mapeo de las clases de servicio de ancho de banda, latencia y tipo de tráfico es común y conocido por todos los nodos en la célula BPL.

Entonces, por medio del protocolo Conexión de Control de Admisión (CAC), los requisitos para transmitir el flujo de tráfico son solicitados al Nodo Maestro de Flujo (FMN) de esta clase de servicio. De ser aceptado se le asignará una identificación de sesión, de lo contrario, será rechazado.

En el caso donde la capacidad máxima del canal es alcanzada, varias políticas de congestión pueden ser aplicadas por el QC (Controlador de QoS) y FMN para admitir, rechazar o dejar caer las sesiones actuales en la célula BPL.

3.3.3.3 Descripción de Seguridad

La especificación IEEE P1901 proporciona un mecanismo de seguridad incluyendo el modo de encriptación AES-CTR de 128 bits con clave individual para cada Unidad de Datos del Protocolo de la Capa de Convergencia (CLPDU) o fracción de CLPDU, mecanismos de integridad por medio de AES-CBC de 128 bits también para cada CLPDU, la protección de integridad de la dirección MAC, RADIUS y 802.1X basada en la distribución de claves, etc.

Las recomendaciones del estándar 802.11i han sido tenidas en cuenta para diseñar la especificación de seguridad de IEEE P1901.

3.3.4 Estándar HomePlug 1.0

HomePlug 1.0 es una tecnología PLC peer to peer para distribución de paquetes IP dentro del hogar. Subdivide el rango de frecuencia de 4,3 hasta 21 MHz mediante OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) en cientos de canales, los cuales transfieren una fracción del tráfico completo de la velocidad de transferencia de datos (con un promedio de cobertura aproximada de 100mts.). Donde cada uno de los canales es libre de receptor y transmisor, existiendo como canales virtuales en la banda de frecuencia. Además, el uso de técnicas de modulación diferenciales (DBPSK, DQPSK) y del prefijo cíclico permite eliminar completamente la necesidad de cualquier verificación.

El transmisor divide la señal de datos en pequeñas partes por transformada de Fourier inversa, que es reconstruida por el receptor utilizando nuevamente el método de la transformada de Fourier. En este proceso, el receptor registra si hace falta un paquete y que canal virtual tuvo que haber tomado. Después el receptor retroalimenta al transmisor que paquete que hace falta y que canal usar para transmitirlo. De esta manera se adapta el sistema de forma dinámica a las condiciones de la red eléctrica eliminando bandas con interferencia y corrigiendo errores mediante “Forward Error Connection” (Viterbi y Reed-Solomon).

Esta especificación no permite construir redes de acceso, ya que debido a su sistema Spread Spectrum, no es posible repetir la señal. Tampoco tiene funcionalidades de SNMP que son esenciales en una red de acceso a internet y VoIP. Sin embargo, es una solución válida para lo que fue creada, aunque tendría para este efecto también soluciones WiFi.

3.3.4.1 Nivel Físico

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es la técnica de transmisión básica usada por el HomePlug. Actualmente es usado en la tecnología DSL, la distribución terrestre inalámbrica de señales de televisión, y también ha sido adaptado por el estándar Wireless LAN del IEEE (802.11a y 802.11g). La idea básica de OFDM es de dividir el espectro disponible en varias subportadoras de baja velocidad. Para obtener la alta eficacia espectral la respuesta frecuencial de las subportadoras se superponen de forma ortogonal. Cada subportadora de banda

estrecha puede ser modulada usando varios formatos de modulación. En el capítulo siguiente se describirá en mayor detalle a OFDM.

3.3.4.2 Nivel MAC

La elección del protocolo de Control de Acceso al Medio (MAC) proporciona un conjunto de desafíos diferentes. Las redes en el hogar deben ser capaces de soportar un conjunto de aplicaciones diversas, desde simples transferencias de archivos a aplicaciones que demanden muy altas exigencias de QoS, como Voz sobre IP (VoIP) y Streaming de medios de comunicación. El HomePlug MAC es elaborado para integrarse con la capa física y dirigir estas necesidades.

El HomePlug MAC es creado para trabajar con el formato de tramas IEEE 802.3. Esta elección simplifica la integración con Ethernet. Añadiendo a las tramas Ethernet cifrado y otra dirección antes de la transmisión de ellas sobre el canal powerline. Un mecanismo de segmentación y nueva sesión son utilizados en los casos donde el paquete completo no es útil en una simple trama.

El HomePlug MAC está diseñado para proporcionar las garantías de QoS. Esto permite soportar aplicaciones como VoIP y Streaming de medios de comunicación. Soportando hasta 4 clases diferentes de prioridad basada en VLAN. Además, los mecanismos de segmentación e inicio de sesión aseguran que el tráfico de más alta prioridad no se haga a expensas del retraso de la transmisión de los paquetes de más baja prioridad.

Formato de trama

La tecnología HomePlug utiliza dos formatos básicos de trama. Una trama extensa, compuesta por un símbolo delimitador del inicio de la trama (SOF), la carga útil y el delimitador final de la trama (EOF). Una trama corta consiste en un delimitador de respuesta, y es usado como parte del proceso de parada y solicitud de repetición automática (ARQ). El mecanismo de ARQ causa la retransmisión de paquetes que se encuentren dañados, reduciendo así la tarifa de error por paquete.

Todos los símbolos delimitadores comparten una estructura común (ver figura 3.3). Un símbolo delimitador consta de un preámbulo y un espacio de información del control de trama. El

preámbulo es una forma de señal espectral que es usada para determinar el comienzo de un símbolo delimitador. Esto es seguido por información del control de trama, que es codificada utilizando un código Turbo y puede ser detectada aún en varios dB debajo del nivel de ruido. Entre otras cosas, los símbolos delimitadores transmiten información de tiempo que es utilizada por el MAC para determinar la disponibilidad del medio.

HomePlug limita la longitud máxima del espacio de carga útil de la trama extensa a 160 símbolos OFDM. Si el paquete no puede ser encajado en la trama extensa, un mecanismo de segmentación y nueva sesión es utilizado para enviarlo en múltiples tramas extensas. El encabezamiento de la trama contiene información que es utilizada por el receptor para reconstruir apropiadamente el paquete dividido. La carga útil es protegida por una trama de control de secuencia (FCS, Frame Check Sequence) para detectar los errores sin corregir.

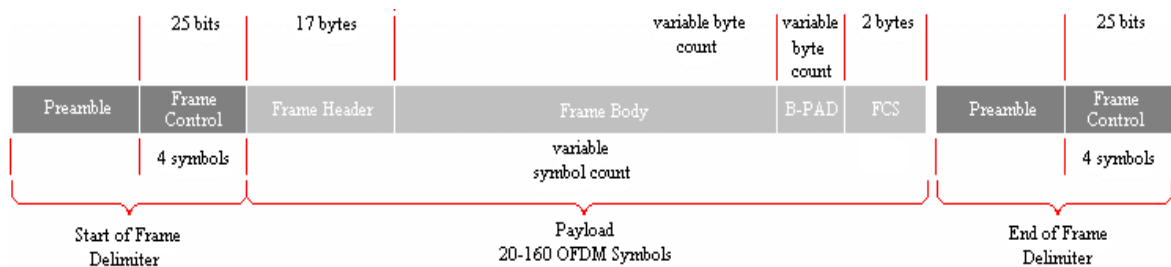


Figure 1: Long Frame Format

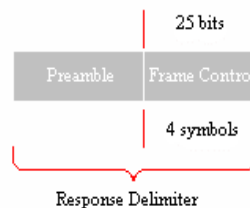


Figure 2: Short Frame Format

Figura 3.3: Formato de tramas HomePlug

Control de acceso al medio

El mecanismo de acceso de canal usado por el MAC HomePlug es una variante del protocolo conocido CSMA/CA (acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones), a la cual se le han añadido algunas características que permiten la priorización según clases, la igualdad y el control de retardos. La utilización CSMA/CA implica que la capa física

debe soportar la transmisión y recepción a ráfagas, es decir cada cliente activa la transmisión sólo en los momentos en los que tiene datos que enviar, y al terminar apaga el transmisor y vuelve al modo de recepción.

Si el medio está ocupado, los nodos dejarán de transmitir hasta que el medio se encuentre desocupado. Cuando el medio esté libre, los nodos esperarán un tiempo escogido al azar (esto es la parte de anulación de colisión). Un nodo transmitirá sólo si este no detecta ningún otro tráfico sobre el medio durante el tiempo escogido. El esquema de acceso de canal que HomePlug construye sobre este mecanismo, proporciona el acceso priorizado con una alta utilización de la red.

El mecanismo de detección de portadora ayuda a los nodos HomePlug a sincronizarse. En el corazón de este mecanismo están los símbolos delimitadores. La tecnología HomePlug usa una combinación de Detección de Portadora Física o PCS (Physical Carrier Sense) y Detección de Portadora Virtual o VCS (Virtual Carrier Sense) para determinar el estado del medio (por ej.: si el medio está libre u ocupado y para cuanto tiempo). PCS es proporcionada por HomePlug PHY y básicamente indica si una señal de preámbulo es descubierta sobre el medio. VCS es mantenido por la capa MAC HomePlug y es actualizado basado en la información contenida en el símbolo delimitador. Los símbolos delimitadores contienen información no sólo en la duración de transmisión actual, sino también cuál tráfico de prioridad puede competir por el medio después de esta transmisión.

La información del PCS y VCS es mantenida por el MAC para determinar el estado exacto del medio.

El mecanismo de la resolución Prioritario proporciona acceso priorizado del medio de una forma sumamente distribuida. Debido a la naturaleza distribuida de este mecanismo, no hay necesidad de un nodo central para coordinar el acceso sobre el medio como es el caso de algunas tecnologías de red.

3.3.4.3 Seguridad

Al utilizar el cableado eléctrico de un hogar cada tomacorriente se convierte en un punto de conexión, por lo cual, si se deseara interceptar el tráfico de datos de una red PLC en un hogar con esta tecnología, se debería contar con acceso a la red eléctrica de dicho hogar. Lo anterior

redunda en que para evitar que se pueda invadir la red PLC se utilice una encriptación de datos. El cifrado utilizado por HomePlug 1.0 contempla la utilización del método DES con palabras código de 56 bit, mediante la cual se genera una contraseña para evitar el acceso a equipos o personas ajenas a la red PLC.

Cada estación mantiene una tabla (ver figura 3.4) de contraseñas de cifrado y asociada a los valores de selección de claves de encriptación (EKS). Los valores de EKS sirven como un índice o identificación para cada clave de codificación. Al transmitir una trama, una clave de cifrado es usada para encriptar el contenido de la trama y el EKS asociado es incluido en el encabezamiento de la trama. Sobre la recepción de la trama, la estación de destino utiliza el EKS para seleccionar la clave de encriptación desde su tabla de contraseñas para descifrar correctamente el contenido de la trama.

EKS	Encryption Key	Note
0x00	0x0856DAF7CF58185	Default Encryption Key (unique for each device)
0x01	0x46D613EF0F84A764C	Network Encryption Key (common for a logical network)
...	...	"
0xFF	...	"

Figura 3.4: Ejemplo de tabla de claves de encriptación

Todas las transmisiones en una red lógica son cifradas con una clave de cifrado de red compartida (NEK). Un único NEK define una red lógica. Para ser parte de una red lógica dada, una estación debe tener el NEK y EKS asociado para la red.

Para facilitar el proceso de selección de claves de encriptación, HomePlug define un medio de uso de contraseñas ASCII para generar las claves de encriptación. Las claves son generadas de las contraseñas que usa la industria de criptografía estándar y algoritmos de hash. De este modo, los usuarios pueden seleccionar una única y fácil contraseña para delimitar sus redes lógicas.

Para más simplicidad, la mayoría de los dispositivos HomePlug vienen con una contraseña de red común de “HomePlug” para generar un NEK que utiliza EKS 0x01. Esto permite la comunicación inmediata entre estaciones.

Si bien el cifrado contribuye a evitar el acceso no autorizado a un red de datos PLC, cabe mencionar que el medidor existente en los hogares contribuye a que la señal PLC no se distribuya

hacia el exterior del hogar, aun cuando pudiese generarse tráfico de datos después del medidor, la atenuación es tal, que es prácticamente imposible tener comunicación libre de errores a través de él.

3.3.5 Estándar HomePlug AV

Diseñado para la transmisión de HDTV y VoIP dentro del hogar y con velocidades de transmisión que llegan a los 200 Mbps. Opera en la banda de frecuencias comprendidas entre los 2 y 28 MHz con una cobertura de 300 mts y el empleo de modulación OFDM. Sin embargo, el uso de Turbo Códigos Convolutivos para la detección y recuperación automática de errores reduce la tasa de bits de información transmitida en aproximadamente 150 Mbps.

HomePLug AV (HPAV) ofrece un enfoque integral para una estructura de red doméstica, convirtiéndola en un potente sistema de red disponible a lo largo de todo el hogar y capaz de soportar señales de múltiples transmisiones de datos de televisión de alta definición (HDTV).

Para poder satisfacer las demandas de Calidad de Servicio “QoS” establecidas para la transmisión de voz sobre IP “VoIP” y entretenimiento, el sistema HPAV funciona con canales de comunicación con conexión directa e indirecta. Los canales de comunicación directos representan conexiones lógicas virtuales punto a punto (similares a una línea RSDI) en cuyo tráfico de datos se comanda un ancho de banda definido que está garantizado durante la duración de la conexión. Una vez que una aplicación ha reservado la conexión entre el transmisor y el receptor, ningún otro tipo de aplicación puede acceder a este ancho de banda mientras la conexión tenga lugar. La desventaja: para poder ratificar este hecho, todas las partes comunicadoras necesitan estar sincronizadas en una base precisa a lo largo de toda la red, y esto sólo puede lograrse con un mecanismo de control central. La ventaja: todos los paquetes de datos llegan en el mismo orden en el que fueron transmitidos y cada uno estuvo propagándose al mismo tiempo que los otros.

3.3.5.1 Arquitectura HomePlug AV

En la figura 3.5 se presenta el diagrama de la arquitectura de un sistema HPAV. Como puede observarse, la arquitectura define los planos de datos y de control. En el primer caso, se observa la clásica división en capas de los sistemas de comunicación basados en los estándares

relativos a las redes de área local, lo que facilita notablemente la integración del dispositivo con los terminales informáticos que hay actualmente en el mercado.

El plano de control tiene la peculiaridad de ser monolítico, es decir, la gestión de la conexión se hace entendiendo los niveles físico, de acceso y de convergencia como un todo, mediante la utilización de técnicas de crosslayer. Ello permite diseñar la unidad de gestión de la conexión de forma mucho más eficiente y flexible a la hora de adaptarla a innovaciones posteriores.

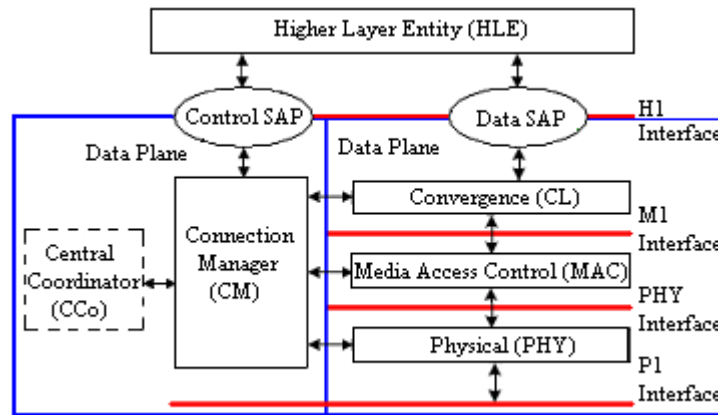


Figura 3.5: Arquitectura HAPV

La arquitectura HPAV exige que de entre todos los modem PLC, que conformen una misma red, uno de ellos deba hacer las veces de estación central. Dicha estación será la única que poseerá un coordinador central encargado de reservar el ancho de banda necesario para las conexiones con requerimientos de QoS (tanto las sincrónicas como las asincrónicas pero con prioridades).

3.3.5.2 Nivel Físico

Los símbolos se transmiten mediante OFDM con un total de 917 portadoras ortogonales disponibles. Este tipo de modulación multiportadora tiene dos grandes ventajas: la primera es que, al utilizar tantas portadoras, el periodo temporal de los símbolos es lo suficientemente largo para hacer la transmisión inmune a los efectos producidos por los desvanecimientos y el ruido impulsivo, ambos fenómenos muy habituales en los entornos PLC. Además, cada uno de esos

917 tonos puede a su vez modularse independientemente utilizando desde un simple BSK hasta un 1024-QAM. Cada portadora elige su modulación en función de la relación señal a ruido que ella misma observa, por lo que el sistema es capaz de adaptarse fácilmente a los cambios repentinos de la función de transferencia del canal de comunicaciones. Lógicamente, el plano de control (y más concretamente la unidad denominada Gestor de la Conexión) es la que se encarga de medir constantemente las características del canal para adaptar convenientemente la señal generada.

Finalmente, a todo el entramado de bits de información se le añade un conjunto de bits de control para la corrección de errores (FEC, Forward Error Correction). Estos bits de control se calculan utilizando turbo códigos convolucionales y permiten recuperar tramas de bits recibidos erróneamente sin necesidad de pedir la retransmisión de la trama.

3.3.5.3 Nivel MAC

El nivel de acceso al medio de HomePlug AV (HPAV-MAC) puede llegar a establecer tres tipos diferentes de modos de transferencia:

- Transferencias orientadas a la conexión, con requerimientos de Calidad de Servicio como el ancho de banda garantizado, la limitación del jitter y de la latencia máxima. Este servicio se proporciona utilizando un sistema TDMA (Time Division Multiple Access) periódico en tiempo.
- Transferencias no orientadas a la conexión, que comparten un mismo canal de comunicaciones pero capaces de establecer prioridades para arbitrar el acceso al medio. Este modo de transferencia es utilizado por servicios asíncronos pero con requerimientos de Calidad de Servicio. Se proporciona mediante un esquema CSMA/CA basado en prioridades.
- Transferencias no orientadas a la conexión, que comparten un mismo canal de comunicaciones. Este modo de transferencia es utilizado por los servicios best-effort mediante un esquema CSMA/CA tradicional.

Para proporcionar estos modos de transferencia, HPAV-MAC implementa una arquitectura de gestión centralizada. El modem PLC encargado de realizar dicha gestión debe activar su CCo (módulo Coordinador Central). El CCo es el encargado de establecer y gestionar el uso de los beacon-period, un periodo de tiempo base que a su vez se divide en tres regiones temporales:

- Beacon region.
- CSMA region.
- Contention-free region.

La primera zona temporal (beacon region) es utilizada por la CCo para advertir a todos los modem PLC conectados a la red sobre la distribución de conexiones preestablecidas que emplearán el resto del periodo (regiones CSMA y Contention-free) para la transmisión de sus datos. La distribución anunciada es persistente en el sentido en que el CCo se compromete a no alterar dicha organización durante un número consecutivo de beacon-periods. Dada la importancia de este periodo para el buen funcionamiento del HPAV-MAC, la señal que se utiliza es una señal eléctrica de una gran robustez y fiabilidad.

La región contention-free se gestiona mediante un sistema TDMA. Los niveles superiores (TCP o incluso IP, al menos en la versión 6 del protocolo) de un modem PLC cualquiera dialogan con su módulo Gestor de la conexión (CM) para negociar los requerimientos de QoS demandados por la aplicación: ancho de banda garantizado, transmisión libre de errores, latencia limitada y control de jitter. Terminada la negociación, la CM se comunica con el CCo del modem PLC central y le hace saber sus necesidades de Calidad de Servicio. Si la CCo tiene capacidad para aceptar la conexión, le pide al modem PLC que estime la capacidad del canal, emitiendo un tono de prueba por cada una de las portadoras de la modulación OFDM.

El resultado de dicha estimación se envía a la CCo que finalmente determina el número de ranuras temporales que le asigna al modem PLC durante el contention-free region. Las ranuras temporales no utilizadas para el transporte de tráfico con Calidad de Servicio son utilizadas dinámicamente por el resto de modem PLC para la transmisión de tramas CSMA/CA en modo no-persistente. Si éstas últimas no se utilizan, las conexiones con requerimientos de Calidad de

Servicio pueden, con el permiso de la CCo, usar dicho ancho de banda para aumentar su capacidad.

Finalmente, la región CSMA proporciona el intervalo de tiempo en el que los modem PLC pueden luchar por la posesión del canal mediante un esquema CSMA/CA basado en prioridades y de forma persistente. Cada CCo es responsable de controlar una AV Logical Network (AVLN), la cual está constituida por varios modem PLC que comparten un Network Membership Key (NMK), gracias al cual cada miembro de la AVLN puede comunicarse con el resto de miembros de forma privada y segura.

En caso de haber más de una AVLN, los correspondientes CCo de cada red deben coordinarse para compartir, de manera dinámica, el canal común de comunicaciones. El mapeado de la red permite determinar la presencia de otro modem PLC en la misma AVLN que pudiera asumir en un futuro el papel de CCo mediante un protocolo de handover.

Los criterios a seguir para el intercambio de funciones son, en estricto orden de prioridad:

1. Selección del usuario.
2. Capacidad del CCo.
3. Número de estaciones descubiertas en el mapa de la AVLN.
4. Número de AVNL descubiertas.

Cuando todas las estaciones están inactivas, el CCo también es responsable de activar el modo power-saving. En este modo tan solo se activa una pequeña zona temporal de la región CSMA (para que puedan iniciar una transmisión) y contention-free (para que puedan escuchar las señales de control). Durante el resto del beacon-period, los transmisores y receptores deben apagarse, ahorrando energía y evitando posibles interferencias innecesarias con otras señales.

Como se ha descrito anteriormente, HomePlug AV provee un servicio de conexión punto a punto sin contenciones (Contention Free, CF) para apoyar los requerimientos del servicio de calidad QoS (ancho de banda garantizado, requerimientos de latencia y fluctuación) que demandan las aplicaciones de audio-video e IP (Protocolo de Internet). Este servicio de libre contención se basa en TDMA, asignando una duración adecuada para apoyar los requerimientos del servicio de calidad de una conexión.

La sincronización dentro de la red se consigue con señales periódicas transmitidas por la central de coordinación. Un periodo de señales cubre dos ciclos completos 50/60-Hz AC y aguantaría unos 40 o 33 1/3 milisegundos respectivamente.

La transferencia de datos vía cableado eléctrico no puede depender de limitaciones físicas, como la estructura de cables que ofrece Ethernet. Por esta razón, la seguridad tiene que estar asegurada por otros medios lógicos. Las funciones de control de acceso necesitan asegurarse de que sólo los dispositivos autorizados puedan conectarse al sistema de HomePlug AV (AVLN). Las estaciones HomePlug AV pueden manejar múltiples claves de seguridad, que las capacitan para unirse a múltiples AVLNs.

Todo el transporte de datos y la mayoría del tráfico de control en un AVLN están asegurados por la potente codificación 128-bit AES. Las únicas excepciones serían una pequeña selección de comandos de control que no pueden ser codificados. Como encriptación se utiliza la Llave de Encriptación de Red NEK (Network Encryption Key) y actúa sólo en segmentos individuales de la red cuando se crean los paquetes de datos del protocolo MAC MPDUs (MAC Protocol Data Units).

3.3.6 Coexistencia de HomePlug 1.0 y HomePlug AV

Los dispositivos según el estándar HomePlug 1.0 y HomePlug AV pueden trabajar a la vez en la misma red de corriente eléctrica. Sin embargo no es posible un intercambio de datos directo, debido a la especificación técnica del estándar HomePlug AV. Para intercambiar informaciones o datos audiovisuales entre dos redes que trabajen según estándares distintos, basta enchufar un dispositivo HomePlug 1.0 y uno HomePlug AV en tomas de corriente cercana y conectar ambos entre sí con un cable de red Ethernet. A través de este "puente" se pueden transmitir datos de la red HomePlug 1.0 a la red HomePlug AV y viceversa, tal como se observa en la figura 3.6.

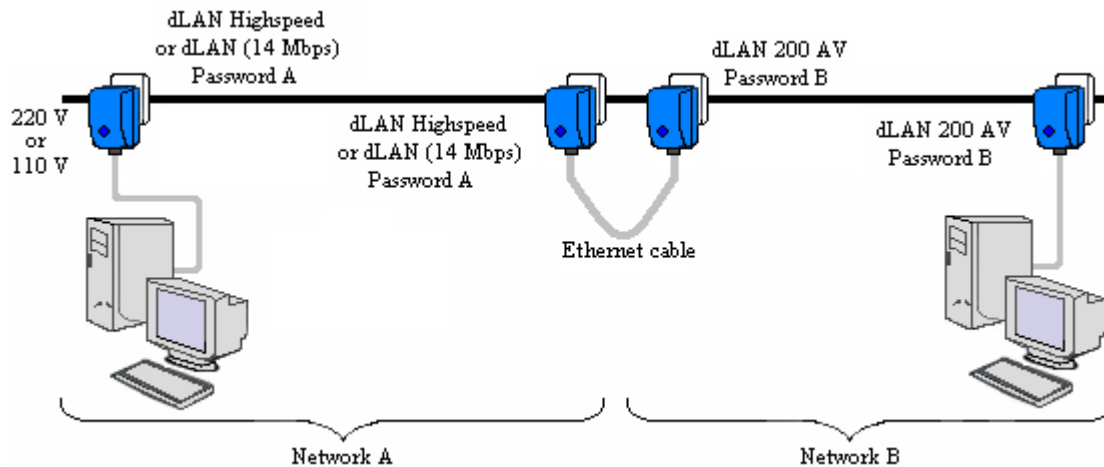


Figura 3.6: Coexistencia estándares HomePlug 1.0 y HomePlug AV

3.3.7 Estándar de facto para PLC

Actualmente se continúa trabajando en el campo de la normalización. Básicamente se ha regulado el uso de la asignación del espectro de frecuencias (para asegurar la compatibilidad con otros servicios de telecomunicaciones) y las especificaciones de calidad de servicio (QoS) para los equipos terminales de abonado CPEs (módems y adaptadores de red).

Mientras eso sucede, se ha creado una estandarización de facto en torno al modelo OSI, en donde la capa 1 utiliza modulación OFDM los niveles TCP/IP y 802.3 (Ethernet) como Estándares de facto. Solamente estaría determinado por el medio físico el nivel uno es decir el control de acceso al medio o capa MAC. Por encima de la capa MAC ya no existen protocolos propietarios de fabricación. Los equipos de una red PLC presentan típicamente una pila de protocolos como la mostrada en la figura 3.7.

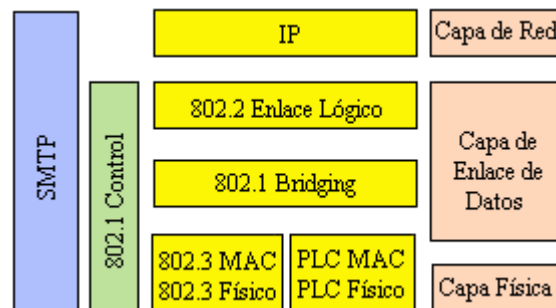


Figura 3.7: Pila de protocolos típica en un equipo PLC

Se observa cómo se tiene la posibilidad de acceder a dos medios diferentes Ethernet u otro PLC, siendo la más utilizada Ethernet. Se realizan funciones de enrutamiento (802.1) y enlace lógico (802.2) y enrutamiento con IP. El control del equipo se lleva a cabo mediante SMTP o mediante el protocolo de control de 802.1.

3.4 Compatibilidad electromagnética

La tecnología PLC es y ha sido objeto de amplios debates con respecto a su comportamiento como fuente originaria de problemas de interferencia por su radiación electromagnética. Una de las mayores incertidumbres que rodean a esta tecnología, es si realmente logrará una convivencia armoniosa entre ella y las emisiones de radio amateur o radio difusión de onda corta y aún con sistemas PLC en sus cercanías.

El uso de la red eléctrica para servicios de telecomunicaciones representa una estructura electromagnética abierta e insuficientemente protegida contra la emisión o recepción de señales en alta frecuencia. Lo anterior debido a que no fue concebida para este fin, sino para señales de baja frecuencia. De esta manera la transmisión de señales de alta frecuencia de PLC puede afectar a sistemas en redes próximas, y diferentes servicios inalámbricos vía los campos radiados si no se toman las medidas necesarias para evitar o paliar los niveles de radiación.

Este fenómeno se denomina Compatibilidad Electromagnética o EMC (Electromagnetic Compatibility). Y se refiere a la coexistencia de diferentes sistemas PLC en las proximidades; con la coexistencia a su vez, de estos con los servicios inalámbricos que se presten en la zona. La compatibilidad electromagnética de servicios de radio y sistemas PLC es básicamente bidireccional. Esto sucede, pues a su vez, los campos electromagnéticos de los servicios de radio inducen tensiones o corrientes en la redes de distribución, dado que las líneas no malladas actúan como antenas.

Por otra parte, las señales de PLC irradian campos, los cuales pueden inhibir a los radios receptores. Mientras los sistemas PLC deben evitar las interferencias de radio, estos deben limitar la radiación en frecuencias que les han sido asignadas con anterioridad, y deben permanecer inalterables. Lo anterior necesariamente conlleva a que la tecnología PLC se adapte a los niveles de emisiones electromagnéticas provenientes de otros servicios de radiodifusión ya existentes, así como de limitar sus propias emisiones electromagnéticas que pudiesen interferir a ya existentes.

Generalmente la intensidad electromagnética decrece con el incremento de la distancia de las líneas que transportan señal. La coexistencia de equipos PLC y servicios de radio implica mantener la intensidad del campo causado por PLC tan bajo que permita recibir el servicio deseado en cualquier lugar sin interferencias. De este modo dos aspectos que también deben tenerse en cuenta para la determinación de los niveles de transmisión en PLC son el rango de frecuencia y la ubicación de los receptores de radio que posiblemente se interfiera.

3.4.1 FCC Parte 15

El PLC, o BPL (Broadband over Power Line) como se le denomina en EE.UU., no tiene una reglamentación propia sino que se rige por lo establecido en el capítulo 15 de la Reglamentación de la FCC (Federal Communications Commission), que regula todo tipo de instrumentos de radiofrecuencia que no requieren licencia y se establecen sus límites de radiación absoluta. También se establece la condición de que ninguno de estos instrumentos ha de causar interferencia perjudicial a servicios radioeléctricos con licencia y han de aceptar, por el contrario, las interferencias que les pueda provenir de servicios con licencia sin derecho a recurso alguno.

La norma USA aplicable al PLC, la FCC Part 15, establece unos límites de emisión que son prácticamente el doble de los que se están considerando en la actualidad en Europa. Así centrándonos en la frecuencia de 10 MHz, la norma USA exige no superar límites de 70 dB/ μ V/m frente a los 30 dB/ μ V/m exigidos por la NB30 alemana. En cualquier caso todos estos límites están muy por debajo de los 150 dB/ μ V/m establecidos como límites para la seguridad humana.

En EE.UU. con la norma Part 15 de la Federal Communications Commission (FCC), que trata de ajustarse a los estándares internacionales del International Special Committee on Radio Interferente (CISPR) como el CISPR 22 ha establecido niveles que están por arriba de los alemanes. Esto permitirá alcanzar mayores velocidades.

Las regulaciones para la Banda Ancha se encuentran estipuladas desde los apartados 15.601 a 15.615, en donde se establecen las bandas de frecuencias que van desde los 1.705 MHz a 80 MHz sobre líneas eléctricas de media y baja tensión.

Para las bandas de frecuencia que van desde los 1.705 MHz a 30 MHz sobre las líneas de conducción eléctrica de media tensión se debe cumplir con los límites de emisión irradiados, los

cuales no deben superar los 30 (microvoltios/metro) a una distancia de 30 mts. Para frecuencias superiores a 30 MHz el límite emisión no debe superar los 90 (microvoltios/metro) a una distancia de 10 mts.

Se establece también en el apartado 15 que el acceso a sistemas PLC deberá incorporar técnicas que mitiguen o reduzcan las interferencias que se pudiesen causar a servicios autorizados en determinadas frecuencias. Lo anterior conlleva en otras técnicas, a la filtración o anulación de frecuencias o bandas de frecuencia (filtro rechaza banda), en las zonas donde se realizan operaciones de radioemisión que estén ya establecidas. Se establece además las zonas de exclusión (servicios de guardacostas, emergencia, etc.) para el despliegue de PLC, zonas a las cuales cualquier implementación de tecnología PLC debe encontrarse a más de 1Km.

3.4.2 EN 55022

EN 55022 se basa en CISPR 22, y se utiliza en la Unión Europea y en todo el mundo. Especifica los procedimientos para la medición de emisión de radiación de señales generadas por los Equipos de la Tecnología de la Información (ITE por sus siglas en inglés). Esta norma tiene una actualización constante, y especifica los límites para la gama de frecuencias de 9 kHz a 400 GHz, tanto para los equipos clase A (para áreas comerciales convencionales) y clase B (para áreas domésticas convencionales).

La intención de EN 55022 es establecer requisitos uniformes para el nivel de las perturbaciones radioeléctricas de los equipos que figuran en el ámbito de la aplicación. Describe los métodos de medición y normaliza las condiciones de funcionamiento y la interpretación de los resultados.

El ámbito de aplicación se amplía a todo el rango de frecuencias de 9 kHz a 400 GHz, pero los límites se formulan sólo en las bandas de frecuencia restringidas, lo que considera suficiente para alcanzar los niveles de emisión adecuados para proteger los servicios de radio y telecomunicaciones.

3.4.3 EN 55024

EN 55024 establece requisitos uniformes para la inmunidad electromagnética de los equipos de tecnología de la información. Los métodos de ensayo se dan en la referencia básica de EMC. EN 55024 especifica las pruebas, niveles de prueba, producto de las condiciones de funcionamiento y criterios de evaluación.

El objetivo de EN 55024 es establecer requisitos que se vayan a proporcionar un nivel adecuado de inmunidad intrínseca a fin de que el equipo funcione de la forma prevista en su medio ambiente. En él se definen los requisitos de ensayo de inmunidad para los equipos definidos en el ámbito de aplicación en relación a las continuas y transitorias, llevado a cabo y radiada disturbios, incluidas las descargas electroestáticas (ESD).

Debido a las pruebas y evaluación del desempeño de consideraciones, algunas pruebas se especifican en determinadas bandas de frecuencia o en determinadas frecuencias. Equipo que cumpla los requisitos en estas frecuencias se considera que cumplen los requisitos en toda la gama de frecuencias de 0 Hz a 400 GHz para los fenómenos electromagnéticos.

CAPITULO IV

TÉCNICAS DE ENCRIPTACIÓN, CODIFICACIONES Y MODULACIONES USADAS EN PLC

4.1 Introducción

El uso de técnicas de encriptación, codificación y modulación sin lugar a dudas representan pilares fundamentales en telecomunicaciones, y por ende en aplicaciones como la tecnología power line communication. Más aún, considerando las características hostiles de la red eléctrica como medio de transmisión de datos, se hace necesario la utilización de técnicas que reduzcan los errores en la transmisión.

De este modo, dada la importancia que representa la combinación de estas técnicas aplicadas en tecnologías de las telecomunicaciones, como es el caso de PLC, en el presente capítulo se dará a conocer las técnicas de encriptación, codificación, y modulaciones que se utilizan en la tecnología PLC.

4.2 Protección de la Señal PLC: Técnicas del control de errores y de flujo

Uno de los desafíos a los cuales se enfrenta PLC, al igual como sucede con otras tecnologías de las telecomunicaciones, es la reducción de los errores de transmisión que, en el caso de PLC, se convierte en prioridad debido a las características de la red eléctrica en donde se desenvuelve y que fueron mencionadas en el Capítulo II.

Cuando se realizan transmisiones de datos, pueden existir problemas en el envío de información, lo que produce un daño en los bits enviados, es decir que los bits están errados. Para evitar esto, existen mecanismos o métodos que permiten anexar datos a las tramas que se envían, de manera de determinar cuando se ha errado un bit. Estos datos se denomina información redundante y existen dos métodos que permiten prevenir este inconveniente ARQ (Automatic Repeat Request) y FEC (Forward Error Correction).

4.2.1 ARQ (Automatic Repeat Request)

Los sistemas PLC generalmente utilizan el protocolo ARQ (Automatic Repeat-reQuest) para proporcionar un servicio fiable al nivel de red. Este protocolo es utilizado para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando la integridad de los mismos. Éste suele utilizarse en sistemas que no actúan en tiempo real ya que el tiempo que se pierde en el reenvío puede ser considerable y ser más útil emitir mal en el momento, que correctamente un tiempo después. Esto se puede ver muy claro con una aplicación de videoconferencia donde no resulta de utilidad emitir el píxel correcto de la imagen 2 segundos después de haber visto la imagen.

Esta técnica de control de errores se basa en el reenvío de los paquetes de información que se detecten como erróneos (Esto quiere decir que no todos los paquetes de información se detectan como erróneos). Para controlar la correcta recepción de un paquete se utilizan ACK's (acknowledge) y NACK's de forma que cuando el receptor recibe un paquete correctamente el receptor asiente con un ACK y si no es correcto responde con un NACK. Durante el protocolo que controla recepción de paquetes pueden surgir múltiples problemas (pérdida de ACK, recibir un ACK incorrecto, etc.) complicándose así el contenido del ACK y surgiendo nuevos conceptos como el de timeout.

Si el emisor no recibe información sobre la recepción del paquete durante un tiempo fijado (timeout) éste se reenvía automáticamente. En este intervalo hay que tener en cuenta el tiempo de transmisión y propagación del paquete y del asentimiento (respuesta receptor) y el tiempo máximo de proceso en el receptor.

El problema que se introduce ahora es bastante claro: un retraso del receptor puede provocar la aparición de tramas o paquetes duplicados por un reenvío del emisor. Esto es también un problema, ya que el receptor no puede distinguir si un paquete es el duplicado de uno anterior o no.

Para resolver este problema, lo que se hace es introducir redundancia en los paquetes, de tal manera que se distingan el último paquete enviado del que se transmite después. Para ello, se introduce un nuevo bit en el paquete, de tal modo que los paquetes quedan marcados de dos formas distintas y el receptor espera siempre una de los dos, si llega el otro lo descarta pensando que es un duplicado.

Esencialmente existen tres tipos de ARQ que son: ARQ de parada y espera (Stop-and-wait ARQ), ARQ de envío continuo y rechazo simple (Go-Back-N ARQ) y ARQ de envío continuo y rechazo selectivo (Selective Repeat ARQ). Aunque en la práctica se combinen buscando el sistema óptimo para cada canal o estado de tráfico concreto.

4.2.1.1 ARQ de parada y espera

En este sistema de transmisión, el emisor envía un paquete y espera a que le llegue el asentimiento del receptor para enviar el siguiente. El receptor puede enviar un asentimiento positivo (ACK): el paquete ha llegado sin errores o bien un asentimiento negativo (NAK): ha ocurrido un error. Si al emisor le llega un NAK, retransmite el último paquete, en caso contrario transmite el siguiente. En este sistema el emisor solo tiene que tener en memoria el último paquete que ha enviado, ya que es el único que tiene pendiente de ser asentido.

4.2.1.2 ARQ de rechazo simple

En este caso, se supone que el emisor no espera a recibir un asentimiento del receptor sino que continua transmitiendo paquetes que a su vez almacena en buffer hasta que sean asentidos, es una ventana deslizante en el emisor. Para diferenciar un paquete de los demás les añade un número de secuencia supuestamente infinito, pero que no aumenta el número de bits de redundancia (es uno de los problemas en la práctica). El receptor asiente cada paquete con su número correspondiente, lo que libera el paquete correspondiente en el buffer del emisor. Si un paquete es erróneo, el emisor vuelve atrás y retransmite a partir de ese paquete (lo que hace inviable este sistema para probabilidades de error elevadas). El receptor solo tiene que almacenar un paquete en su registro pues al final siempre le llegan en orden.

4.2.1.3 ARQ de rechazo selectivo

Para evitar perder tiempo en transmisión, se busca repetir solo los paquetes con error y no el resto. Para eso se usa el emisor del ARQ anterior: transmisión continúa salvo que solo se retransmita el paquete defectuoso (lo sabe por el número de secuencia del asentimiento). El

receptor se complica ya ha de guardar en un registro todas los paquetes posteriores a un error hasta que le llegue la retransmisión del paquete para poder entregarles el orden. Esto complica el sistema bastante: son necesarias ventanas deslizantes tanto en receptor como en emisor y para probabilidades de error bajas no da una gran diferencia en eficacia respecto del sistema ARQ anterior.

4.2.2 FEC (Forward Error Correction)

FEC es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original, siendo de esta manera de gran utilidad en medios de transmisión hostiles, como es el caso de la red eléctrica.

Se utiliza en sistemas sin retorno o sistemas en tiempo real donde no se puede esperar a la retransmisión para mostrar los datos. Entre las tecnologías que utilizan esta técnica de corrección, además de PLC se encuentran; TDT (Televisión digital terrestre) para terminales móviles (estándar DVB-H), en las comunicaciones vía satélite, en las grabadoras de DVD y CD, etc.

La posibilidad de corregir errores se consigue añadiendo al mensaje original unos bits de redundancia a partir de una codificación previa a la modulación de la señal. La fuente digital envía la secuencia de datos al codificador, encargado de añadir dichos bits de redundancia. A la salida del codificador se obtiene la denominada palabra código. Esta palabra código es enviada al receptor y éste, mediante el decodificador adecuado y aplicando los algoritmos de corrección de errores, obtendrá la secuencia de datos original.

El parámetro principal que caracteriza a la técnica FEC es la ganancia de codificación, el cual se define como la reducción en la relación señal a ruido (S/N) necesaria para alcanzar la misma probabilidad de error que un sistema sin codificación, manteniendo las mismas características en la transmisión. Así por ejemplo, un sistema de codificación con 3dB de ganancia de codificación podría aportar las siguientes ventajas:

- Reducir el ancho de banda en un 50%
- Duplicar el throughput (eficiencia)
- Incrementar el alcance en un 40%

- Reducir el consumo de energía a la mitad

Hasta el momento se han llegado a alcanzar ganancias de codificación en powerline de hasta 15dB. Existen múltiples códigos que se pueden utilizar en técnicas FEC:

- **Códigos de bloque:** Hamming, BCH, Reed-Solomon
- **Códigos convolucionales**
- **Códigos de Trellis**
- **Códigos concatenados:** Viterbi/Reed-Solomon

En donde los códigos de corrección de errores más utilizados en “powerline” son los códigos de bloque lineal **BCH** (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) y los códigos concatenados de **Viterbi/Reed Solomon**.

4.2.2.1 Códigos de bloque

La paridad en el codificador se introduce mediante un algoritmo algebraico aplicado a un bloque de bits. El decodificador aplica el algoritmo inverso para poder identificar y, posteriormente corregir los errores introducidos en la transmisión.

La característica más destacada de los códigos de bloque es que cada bloque de **n** bits o palabra código generada en el codificador depende solamente del correspondiente bloque de **k** bits generado por la fuente de información, siendo por la tanto una codificación sin memoria. Este tipo de códigos podemos verlos como un diccionario de 2^k palabras código direccionadas por los mensajes de entrada. Para representarlos se utiliza la notación **(n,k)**.

Los códigos de bloque pueden ser lineales o no lineales. Un código lineal se define mediante una asignación lineal del espacio de mensajes de entrada al espacio de palabras código, y puede representarse como un producto de matrices. Los códigos lineales se denominan también códigos de comprobación de paridad, pues la palabra código se obtiene a partir de sumas módulo dos de subconjuntos de los bits de entrada.

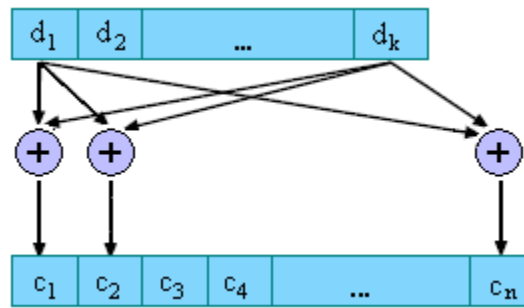


Figura 4.1: Ejemplo de codificación de bloque lineal

Códigos BCH

El código BCH es uno de los más importantes códigos de bloques lineales. La codificación de bloque lineal es el resultado de una aplicación lineal realizada sobre mensajes originales divididos en bloques de k bits a partir de los cuales se obtienen palabras código de n bits. Si se tiene un código BCH (n,k) , siendo n el número de bits de la palabra código y k el número de bits de los bloques originales entonces pueden obtenerse las siguientes relaciones:

$n-k$: número de bits de redundancia o de paridad empleados.

$(n-k)/k$: redundancia del código, es decir, la razón entre el número de bits de paridad empleados y el número de bits necesarios para representar el mensaje.

A las aplicaciones lineales realizadas sobre los datos se les denomina polinomios generadores. Las características del polinomio generador elegido determinan la redundancia introducida y la capacidad para corregir errores.

Idealmente un código debería tener pocos bits de redundancia, sin embargo esto está enfrentado con su eficacia, ya que cuanto mayor es la redundancia mayor es el número de errores que es capaz de corregir. En concreto para el caso de los códigos BCH se cumplen las siguientes relaciones entre capacidad de corrección, redundancia y tamaño de los mensajes:

$$n=2^m-1, \text{ donde } m \geq 3$$

$$n-k \leq m-t, \text{ donde } t \text{ es número de errores que pueden ser corregidos}$$

Cuanto mayor sea la redundancia y menor la longitud de las palabras códigos, mayor será el número de errores corregibles y menor la eficiencia en la transmisión. Los códigos BCH además de lineales son también cíclicos, lo que significa que cualquier desplazamiento de una palabra código es también una palabra código, al igual que cualquier operación realizada sobre palabras código desplazadas. Los códigos cíclicos son especialmente útiles para la detección de errores.

4.2.2.2 Códigos convolucionales

La principal diferencia entre una codificación de bloque lineal y una convolucional es que esta última es recurrente, es decir, la palabra obtenida no sólo depende de los símbolos presentes a la entrada del decodificador, sino también de los anteriores (cierta cantidad de ellos), lo cual implica obligatoriamente la presencia de memoria en dicho codificador.

Otra característica diferenciadora es el número de parámetros que definen genéricamente el código. En el caso bloque lineal, estos parámetros eran la longitud de las palabras código n , y la longitud de los bloques originales k . En los códigos convolucionales existen tres parámetros en vez de dos (n , k , K). Un codificador convolucional está compuesto por un conjunto de K registros de desplazamiento; cada registro de desplazamiento está compuesto por k bits. El codificador posee n salidas siendo cada una de ellas cierta combinación lineal de los $k-K$ bits presentes dentro del decodificador. Al parámetro K se le denomina longitud de constricción.

Al codificador se le van introduciendo mensajes de k bits; la salida, de n bits resulta de una combinación lineal de los $k-K$ bits de información residentes en el codificador; puede comprobarse entonces, que dicha salida, no sólo va a depender del mensaje actual, sino también de los $K-1$ mensajes anteriores. En la figura 4.2 se presenta la estructura de un codificador convolucional genérico:

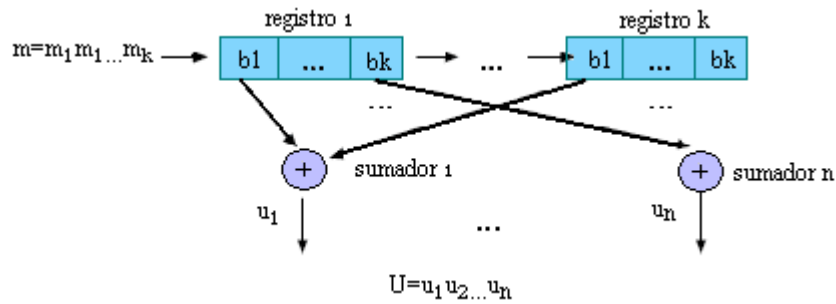


Figura 4.2: Codificador convolucional genérico

El algoritmo de **Viterbi** reduce la complejidad computacional de la codificación convolucional. Una de las características principales de este algoritmo es que presenta un tiempo de decodificación fijo y es adecuado para su implementación hardware. Sin embargo, los tiempos de decodificación crecen exponencialmente en función de la longitud de constricción $\mathbf{K}$, por lo que normalmente no se utilizan valores de K mayores de 9. La compañía norteamericana Intellon utiliza la decodificación de Viterbi con velocidades de 14 Mbps.

La codificación convolucional con decodificación de Viterbi es una técnica FEC especialmente útil para un canal que sufre de ruido blanco gaussiano (AWGN), como es el caso de las redes eléctricas. Sin embargo, la red eléctrica introduce además otro tipo de degradaciones debidas a reflexiones, desvanecimientos o interferencias. Los códigos convolucionales pueden ayudar a tratar estos problemas adicionales pero por sí solos no son la técnica FEC más adecuada para la red eléctrica. Por tanto, una técnica muy común es concatenar los códigos convolucionales con otro tipo de códigos, como los de Reed Solomon, para así aumentar su eficacia en medios de transmisión como la red eléctrica o enlaces de radio terrestres.

Códigos concatenados Viterbi/Reed Solomon

Los códigos concatenados Viterbi/Reed Solomon consisten en la aplicación en serie de dos códigos distintos. La información primero se codifica con el método de Reed-Solomon, y a continuación se aplica una codificación convolucional. En recepción el proceso es inverso, primero se realiza la decodificación convolucional mediante el algoritmo de Viterbi y posteriormente con el de Reed Solomon.

La codificación Reed Solomon es una particularización de los códigos BCH. La nomenclatura típica es **RS (255, 255-2t)**. Cada palabra código contiene 255 bytes, de los cuales **2t** bytes son de redundancia donde **t** es el número de símbolos incorrectos capaces de ser corregidos. Actualmente esta técnica, además de utilizarse en powerline es muy común en DBS y comunicaciones VSAT.

4.3 Seguridad Señal PLC: Técnicas de encriptación

La encriptación es básicamente transformar datos en alguna forma que no sea legible sin el conocimiento de la clave o algoritmo adecuado. El propósito de esta es mantener oculta la información que se considera privada a cualquier persona o sistema que no tenga permitido verla.

La encriptación en general requiere el uso de información secreta para su funcionamiento la cual es llamada "llave". Algunos sistemas de encriptación utilizan la misma llave para codificar y decodificar los datos, otros utilizan llaves diferentes. La técnica de encriptación a aplicar se basa en la complejidad de la información a ocultar, es decir, entre más compleja mejor.

En PLC, como cualquier red de área local, debe contar con cierto grado de seguridad ante eventuales intromisiones no deseadas en la red. Es aquí donde toman relevancia las técnicas de encriptación, que en el caso de PLC se usan indistintamente:

- DES (Data Encryption Standard)
- AES (Advanced Encryption Standard)

4.3.1 Data Encryption Standard

DES (Data Encryption Standard, estándar de cifrado de datos) es un algoritmo desarrollado originalmente por IBM a requerimiento del NBS (National Bureau of Standards, Oficina Nacional de Estandarización, en la actualidad denominado NIST, National Institute of Standards and Technology, Instituto Nacional de Estandarización y Tecnología) de EE.UU.

Este algoritmo trabajaba sobre bloques de 128 bits, teniendo la clave igual longitud. Se basaba en operaciones lógicas booleanas y podía ser implementado fácilmente, tanto en software como en hardware.

Tras las modificaciones introducidas por el NBS, consistentes básicamente en la reducción de la longitud de clave y de los bloques, DES cifra bloques de 64 bits, mediante permutación y sustitución y usando una clave de 64 bits, de los que 8 son de paridad (en la práctica usa 56 bits), produciendo así 64 bits cifrados.

Un cifrado DES da la posibilidad de instalar redes separadas en el mismo circuito eléctrico con dos claves diferentes de cifrado, las cuales se pueden configurar mediante un herramienta de software que suele venir con los equipos. Internamente, DES consiste de:

- Una permutación inicial del texto, seguida por la separación en dos grupos de 32 bits cada uno.
- 16 rondas que combinan permutación, sustitución, y XOR con partes de la clave.
- Una permutación final que invierte la inicial.

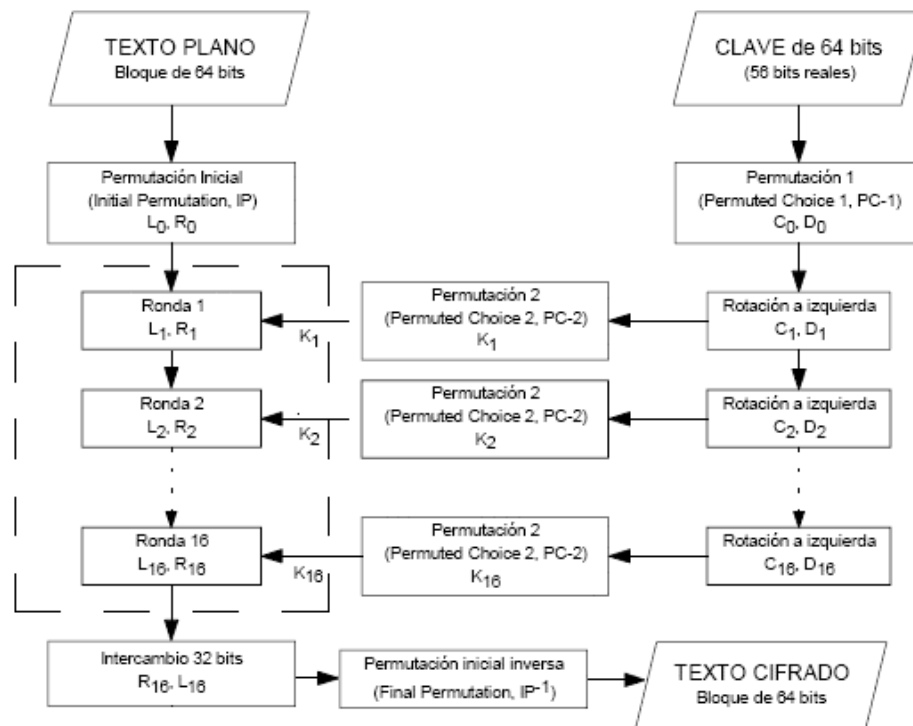


Figura 4.3: Esquema general del algoritmo DES

Como se puede observar en la figura anterior, el sistema parte de una clave de 64 bits, de los cuales se eliminan los 8 bits de paridad. Por lo tanto, para todos los efectos se puede suponer que la clave original K está formada por 56 bits. Esta clave original K genera sucesivamente 16 claves $K_1, K_2, \dots, K_{16}$ todas ellas de longitud 56.

El sistema cifra bloques de información M de 64 bits, aplicando en primer lugar una permutación P fija. El bloque permutado se divide en dos sub-bloques (L_0, R_0) cada uno de 32 bits. Posteriormente, para la ronda $i=1, \dots, 16$ se aplica el proceso siguiente:

$$L_i = R_{i-1}$$

$$R_i := L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$$

Al resultado final (L_{16}, R_{16}) se le aplica la permutación P^{-1} y el resultado final es el cifrado del bloque M .

Generación de las subclaves:

La clave original de 64 bits se reduce a dos bloques de 28 bits, (C_0, D_0) convenientemente permutados por la permutación $PC1$. Cada uno formados por los bits:

$$C_0 = [57, 49, 33, 25, 17, 9, 1, 58, 50, 42, 34, 26, 18, 10, 2, 59, 51, 43, 35, 27, 19, 11, 3, 60, 52, 44, 36]$$

$$D_0 = [63, 55, 47, 39, 31, 23, 15, 7, 62, 54, 46, 38, 30, 22, 14, 6, 61, 53, 45, 37, 29, 21, 13, 5, 28, 20, 12, 4]$$

La clave K_i se forma entonces mediante:

$$C_i = LS(C_{i-1}) \quad , \quad D_i = LS(D_{i-1})$$

$$K_i = PC2(C_i, D_i)$$

Siendo:

- LS una permutación circular a la izquierda de una posición para $i=1, 2, 9, 16$ y de dos posiciones para los restantes índices.
- $PC2$ es una permutación junto con una selección de 48 de los 56 bits

La función $f(R_{i-1}, K_i)$:

La entrada de la misma son los 32 bits de R_{i-1} y los 48 bits de K_i . La función f viene dada por las siguientes operaciones:

R_{i-1} se expande en $E(R_{i-1})$ que está formado por 48 bits. Esto aumenta rápidamente la dependencia entre bits de salida y de entrada, para que cada bit de salida sea una función de cada bit de entrada y cada bit de la clave.

Ahora el resultado de $B := E(R_{i-1}) \oplus K_i$ pasa por operaciones de sustitución, realizadas por 8 S-boxes ($B = B^1, \dots, B^8$). Cada S-box tiene una entrada de 6 bits y se aplica a B^i la función S_i , el resultado es $S_i = (B^i)$ que está formado por 4 bits a la salida.

La salida $S(B) = S(S_1(B^1), \dots, S_8(B^8))$ se permuta por una permutación Q proporcionando $f(\dots)$ (lo cual vuelve a reducir los datos a 32 bits).

Los S-boxes $S_i, i=1, \dots, 8$ son una de las razones de la robustez del método. Cada una de ellos, S , es una tabla de doble entrada formada por 16 columnas (numeradas en binario 0000, 0001, ...) y 4 filas (numeradas 00, 01, 10, 11). Cada fila de la tabla contiene una permutación de los enteros 0, 1, ..., 15. Si el bloque de entrada es $b = (b_6 b_5 \dots b_1)$, la salida $S(b)$ viene dada por la representación binaria del entero que corresponde $b_6 b_1$ a la fila y la columna $b_5 b_4 b_3 b_2$.

4.3.1.1 Modos de operación

1) ECB (Electronic Code Book)

Cada bloque de texto es encriptado independientemente. Tiene una debilidad teórica en que el mismo texto siempre se encripta de la misma manera (con la misma clave), pero tiene la ventaja que el encriptamiento no tiene que ser secuencial, ej.: puede usarse para registros de una base de datos:

Name	Position	Bonus
A d a m s . L e s l i e	C l e r k	\$ 1 0
B l a c k . R o b i n	B o s s	\$ 5 0 0 . 0 0 0
C o l l i n s .	M a n a g e r	\$ 1 0 0 . 0 0 0
D a v i s . B o b b i e	J a n i t o r	\$ 5

Bytes ← 16 8 8

Figura 4.4: Registros base de datos

2) CBC (Cipher Block Chaining)

Antes de encriptar cada bloque, se le hace un $\oplus$ con el bloque anterior ya encriptado. Para el primer bloque, se usa un **vector de inicialización** (IV) aleatorio (puede ser distinto cada vez pero no es esencial). No es necesario que el sea secreto. Para encriptar o descriptar cada bloque, se hace:

$$C_i = E_K(P_i \oplus C_{i-1}) \quad , \quad P_i = C_{i-1} \oplus D_K(C_i)$$

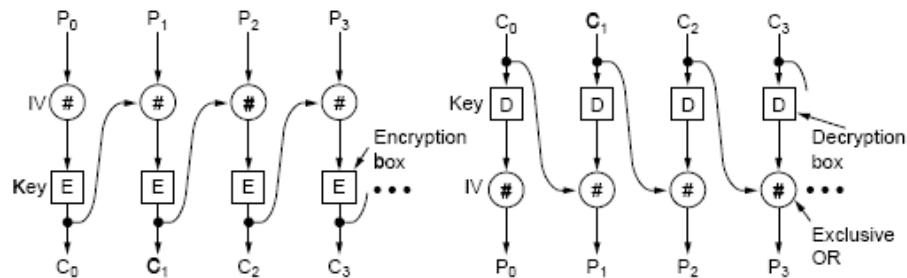


Figura 4.5: Esquema descripción modo de operación CBC

Si bien esto dificulta el criptoanálisis, la desventaja es que no puede que no puede empezarse el encriptamiento antes que haya llegado el primer bloque de texto, lo cual no sería recomendable para un terminal, por ejemplo.

Un error de transmisión (o memoria) en un bit del texto encriptado convierte un bloque entero en basura, y daña un bit del bloque siguiente. Un error de sincronización (se inserta o se quita un bit) echa a perder el resto de la comunicación.

3) CFB (Cipher FeedBack)

Esta técnica convierte un sistema de bloque en uno de “stream”. El sistema de bloque se usa en modo “encriptar” tanto para la encriptación como el descifrado:

$$C_i = P_i \oplus E_K(C_{i-1})$$

$$P_i = C_i \oplus E_K(C_{i-1})$$

Inicialmente se carga un registro de acarreo con un IV único (no repetido). Esto se encripta, y se combina con el primer byte del texto:

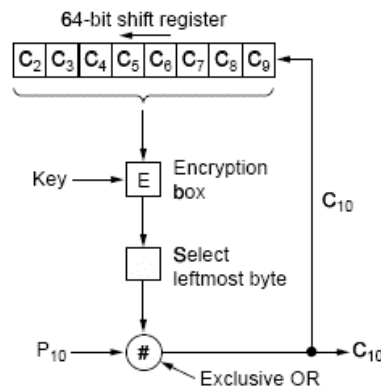


Figura 4.6: Esquema descripción modo de operación CFB

Un bit de error en el texto encriptado causa un bit de error en el byte correspondiente del texto recuperado, seguido por 8 bytes de basura (porque el bit incorrecto se introduce en el registro). Un error de sincronización (de un byte) también afecta 8 ciclos.

4) OFB (Output FeedBack)

OFB es un método similar a CFB, excepto que los bits de la clave se generan independientemente del texto, por lo tanto se llama un synchronous stream cipher. Esto es razonable si la secuencia de clave tiene período suficientemente largo (mucho más largo que el mensaje más largo). Usa un IV, que tiene que ser único pero no necesariamente secreto.

$$S_i = E_K(S_{i-1})$$

$$C_i = P_i \oplus S_i$$

$$P_i = C_i \oplus S_i$$

La ventaja es que los bits de la clave (el keystream) pueden ser generados previamente (sólo dependen de la clave). Un error de transmisión afecta únicamente al bit correspondiente, pero un error de sincronización destruye el resto del mensaje.

4.3.2 Advanced Encryption Standard

Advanced Encryption Standard (AES), también conocido como Rijndael, es un esquema de cifrado de datos por bloques, que utiliza una estrategia de red de sustitución-permutación a diferencia de su predecesor (Data Encryption Standard), que usa una estrategia de red de Feistel. Utiliza 128 bits como tamaño de bloque y 128, 192 o 256 como tamaño de llave, si bien en su versión original el algoritmo podía usar indistintamente 128, 160, 192, 224 o 256 bits.

4.3.2.1 El State

Se trata del estado en el que se encuentra el bloque de datos a cifrar. Se almacena en una matriz cuadrada de 4 x 4 elementos de 1 byte (lo cual da 16 bytes o los 128 bits del tamaño del bloque del algoritmo) que se va transformando con cada paso del algoritmo.

Para facilitar los cálculos la clave de cifrado se almacena también en una matriz, pero en este caso rectangular, de 4 x n columnas. Calcular n es tan sencillo como dividir el tamaño de la clave (en bits) entre 32. De esta manera quedan claves de 4 x 4, 4 x 5, 4 x 6, 4 x 7 o 4 x 8 columnas.

La manera en que se almacenan tanto la clave como el bloque de cifrado es por columnas, de manera que en primer lugar se rellena la primera columna, a continuación la segunda. En este mismo orden se extraerán los contenidos cifrados.

4.3.2.2 Rondas

El algoritmo consta de una serie de rondas de cifrado $R_i[i]$ cuyo número depende del tamaño de la clave de cifrado:

128 bits: 10 rondas.

192 bits: 12 rondas.

256 bits: 14 rondas.

Las rondas $R_i[i]$ son todas iguales, ejecutándose cuatro pasos (excepto en la última, que se omite uno de ellos) que son:

Paso 1: SubBytes

En este paso se sustituyen los bytes del estado. Aquí se opera sobre cada byte del state de manera independiente en base a una tabla llamada S-Box, independiente de la entrada introducida en el bloque de cifrado y que ha sido precalculada.

Lo que se suele hacer es sustituir el byte en cuestión por el byte que se encuentra en la posición de la S-Box indicada por el propio byte a sustituir. Se puede dejar más claro usando la notación matemática:

$$a(i, j) = SBox[a(i, j)]$$

Este paso introduce la no linealidad en el cifrado.

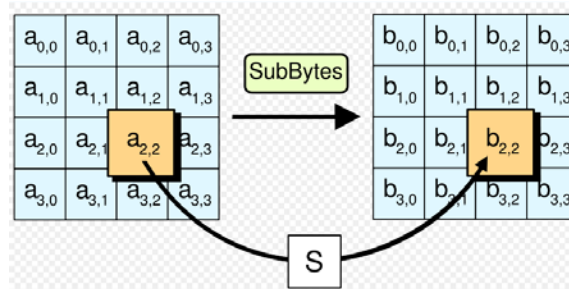


Figura 4.7: Diagrama explicativo del paso SubBytes

Paso 2: ShiftRows

En este paso se "rotan" los bits de cada fila. Más que una rotación la operación es un desplazamiento de bytes, en el que las posiciones que quedan vacías a la derecha se van rellenando con los bits que dejan de tener hueco a la izquierda.

Cada byte de la segunda fila se desplaza uno a la izquierda. Del mismo modo, la tercera y cuarta filas se desplazan por las compensaciones de dos y tres, respectivamente. Para el tamaño de bloque de 128 bits y 192 bits el cambio de patrón es el mismo. Se puede ver una explicación gráfica en el diagrama que se presenta a continuación:

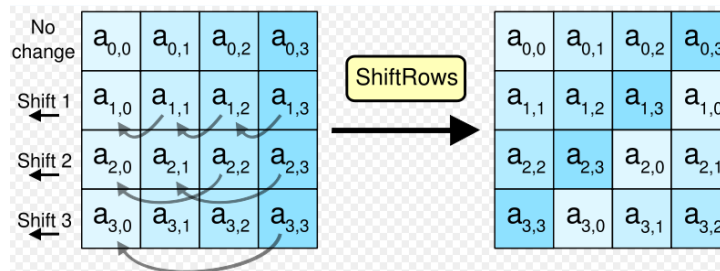


Figura 4.8: Diagrama explicativo del paso ShiftRows

Paso 3: Mixing Columns

Este paso es el que más matemáticas implica. Aquí, los cuatro bytes de cada columna del state se combinan usando una transformación lineal invertible. Esta transformación toma cuatro bytes como entrada y devuelve cuatro bytes, donde cada byte de entrada influye todas las salidas de cuatro bytes. Tanto este paso como el anterior agregan un poco de difusión al algoritmo de cifrado.

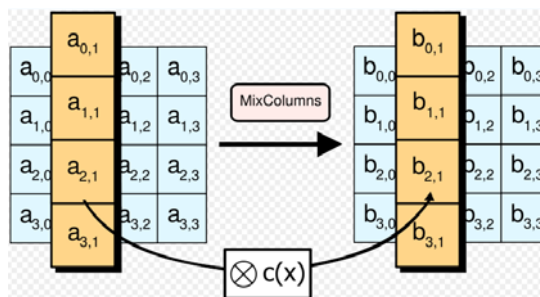


Figura 4.9: Diagrama explicativo del paso Mixing Columns

Paso 4: AddRoundKey

En este paso se aplica lo que podríamos llamar una Clave de Ronda, una clave derivada de la Clave de cifrado (aunque no de manera directa) y de la misma longitud que el bloque de cifrado (recordemos que la clave puede tener una longitud distinta). Esta Clave de Ronda no es más que parte de una clave expandida que genera el algoritmo antes de ningún paso de cifrado tomando como base la clave de cifrado original.

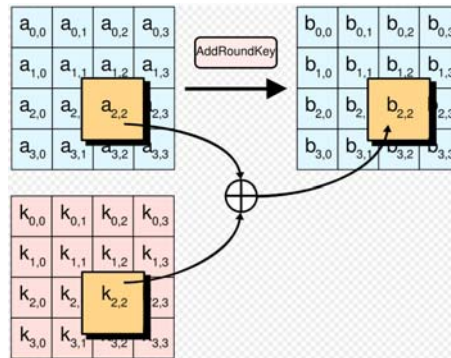


Figura 4.10: Diagrama explicativo del paso AddRoundKey

El tamaño de esta clave (y por tanto el número de iteraciones) viene determinado por el número de rondas que debe ejecutar el algoritmo, más concretamente el número de operaciones AddRoundKey que se ejecutan. Así, para una palabra de 128 bits el número de veces a ejecutar AddRoundKey es de 11 (10 rondas más una inicial). Dado que cada AddRoundKey necesita de una clave de 128 bits (16 bytes), tendremos que rellenar 176 bytes.

4.4 Nivel de enlace: Métodos de acceso al medio

4.4.1 Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

El protocolo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Acces with Collision Avoidance) o acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones es el método de acceso menos popular. CSMA/CA intenta evitar colisiones utilizando un paquete explícito de reconocimiento (ACK), en donde un paquete ACK es enviado por la estación receptora confirmando que el paquete de datos llegó intacto.

CSMA/CA trabaja de la siguiente manera: una estación que quiere transmitir sensa el canal enviando una trama corta de control de solicitud de transmisión RTS (Request To Send). Este mensaje de control RTS contiene las direcciones de MAC del equipo origen y destino. Si el equipo destino recibe esta trama significa que está preparado para recibir una trama. Este equipo devolverá una trama de contestación: preparado para transmitir CTS (Clear To Send) o receptor ocupado (RxBUSY). Si la respuesta es afirmativa el equipo origen transmite la trama en espera (DATA). Si el equipo destino recibe correctamente el mensaje contesta con la trama de confirmación positiva ACK (ACKnowledged) y si no la recibe correctamente contesta con la trama de confirmación negativa NAK (NAKnowledged) y el equipo origen tratará de volver a enviarlo. Este procedimiento se repite un número predefinido de veces hasta conseguirse una transmisión correcta de la trama DATA.

Este método asegura así que el mensaje se recibe correctamente. Sin embargo, debido a las dos transmisiones, la del mensaje original y la del reconocimiento del receptor, pierde un poco de eficiencia. Este sistema incrementa el volumen de tráfico en el cable y reduce las prestaciones de la red, motivo por el que se usa poco. En redes inalámbricas, no se puede escuchar a la vez que se transmite: no pueden detectarse colisiones.

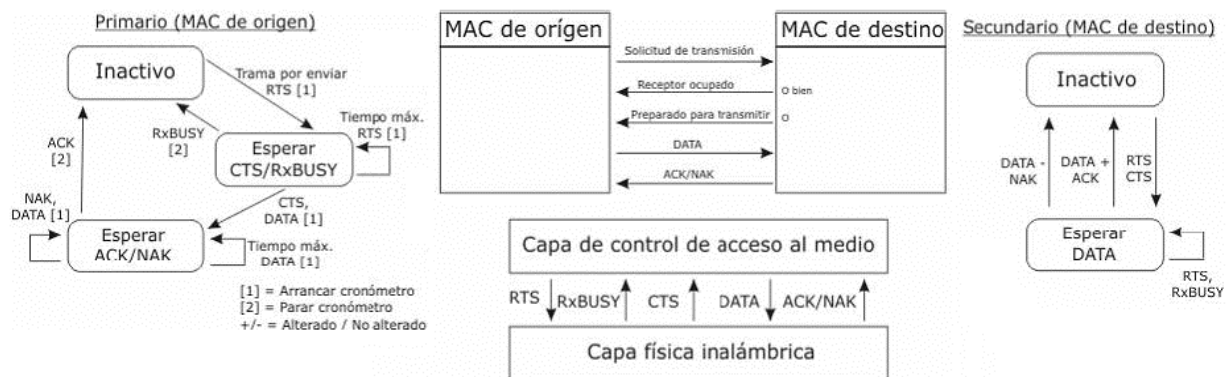


Figura 4.11: Esquema general método de acceso al medio CSMA/CA

4.4.2 Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

CSMA/CD, siglas que corresponden a Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (en español, "Acceso Múltiple con Sensado de Portadora y Detección de Colisiones"), es una técnica usada en redes Ethernet para mejorar sus prestaciones. Actúa sensando el medio

para saber cuando puede acceder, e igualmente detecta cuando sucede una colisión (por ej.: cuando dos equipos transmiten al mismo tiempo). CSMA/CD opera de la siguiente manera:

- Una estación que tiene un mensaje para enviar escucha al medio para ver si otra estación está transmitiendo un mensaje.
- Si el medio esta tranquilo (ninguna otra estación esta transmitiendo), se envía la transmisión.
- Cuando dos o más estaciones tienen mensajes para enviar, es posible que transmitan casi en el mismo instante, resultando en una colisión en la red.
- Cuando se produce una colisión, todas las estaciones receptoras ignoran la transmisión confusa.
- Si un dispositivo de transmisión detecta una colisión, envía una señal de expansión para notificar a todos los dispositivos conectados que ha ocurrido una colisión.
- Las estaciones transmisoras detienen sus transmisiones tan pronto como detectan la colisión.
- Cada una de las estaciones transmisoras espera un periodo de tiempo aleatorio e intenta transmitir otra vez.

La detección de portadora es utilizada para escuchar al medio (la portadora) para ver si se encuentra libre. Si la portadora se encuentra libre, los datos son pasados a la capa física para su transmisión. Si la portadora está ocupada, se monitorea hasta que se libere.

Luego de comenzar la transmisión, continúa el monitoreo del medio de transmisión. Cuando dos señales colisionan, sus mensajes se mezclan y se vuelven ilegibles. Si esto ocurre, las estaciones afectadas detienen su transmisión y envían una señal de expansión. La señal de expansión de colisión asegura que todas las demás estaciones de la red se enteren de que ha ocurrido una colisión.

Funciones de CSMA/CD

El estándar CSMA/CD de la IEEE define un modelo hecho de hasta seis funciones. Tres de estas funciones están relacionadas con el envío de datos y las otras tres de la recepción de datos. Las funciones de recepción funcionan en paralelo con las de envío.

Encapsulado/Desencapsulado de datos

La función de encapsulación y desencapsulación de datos es llevada a cabo por la subcapa MAC. Este proceso es responsable de las funciones de direccionamiento y del chequeo de errores.

El encapsulado es realizado por la estación emisora. El encapsulado es el acto de agregar información, direcciones y bytes para el control de errores, al comienzo y al final de la unidad de datos transmitidos. Esto es realizado luego que los datos son recibidos por la subcapa de control de enlace lógico (LLC). La información añadida es necesaria para realizar las siguientes tareas:

- Sincronizar la estación receptora con la señal.
- Indicar el comienzo y el fin de la trama.
- Identificar las direcciones tanto de la estación emisora como la receptora.
- Detectar errores en la transmisión.

El desencapsulado es realizado por la estación receptora. Cuando es recibida una trama, la estación receptora es responsable de realizar las siguientes tareas:

- Reconocer la dirección de destino y determinar si coincide con su propia dirección.
- Realizar la verificación de errores.
- Remover la información de control que fue añadida por la función de encapsulado de datos en la estación emisora.

Administración de acceso al medio

La función de administración de acceso al medio es realizada por la subcapa MAC. En la estación emisora, la función de administración de acceso al medio es responsable de determinar si el canal de comunicación se encuentra disponible. Si el canal se encuentra disponible puede iniciarse la transmisión de datos.

Adicionalmente, la función de administración es responsable de determinar que acción deberá tomarse en caso de detectarse una colisión y cuando intentará retransmitir. En la estación receptora la función de administración de acceso al medio es responsable de realizar las comprobaciones de validación en la trama antes de pasarla a la función de desencapsulado.

Codificación/Decodificación de datos

La función de codificación/decodificación es realizada en la capa física. Esta función es responsable de obtener la forma eléctrica u óptica de los datos que se van a transmitir en el medio.

La codificación de datos es realizada por la estación emisora. Esta es responsable de traducir los bits a sus correspondientes señales eléctricas u ópticas para ser trasladadas a través del medio. Adicionalmente, esta función es responsable de escuchar el medio y notificar al la función de administración de acceso al medio si el medio se encuentra libre, ocupado o se ha detectado una colisión.

La decodificación de datos es realizada en la estación receptora. Esta es responsable de la traducción de las señales eléctricas u ópticas nuevamente en un flujo de bits.

Trama de transmisión CSMA/CD

El formato de la trama permite a los equipos de red reconocer el significado y propósito de algunos bits específicos en la trama. Una trama es generalmente una unidad lógica de transmisión conteniendo información de control para el chequeo de errores y para el direccionamiento. El formato de la trama CSMA/CD (IEEE 8023.3) se encuentra estructurado de la siguiente manera:

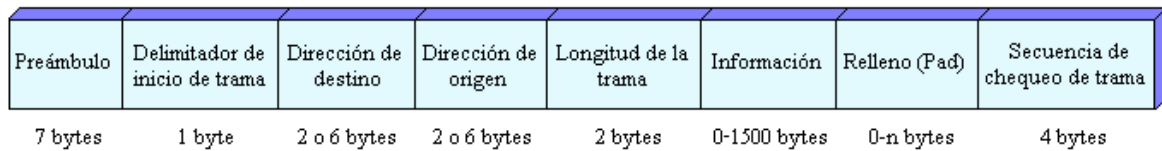


Figura 4.12: Formato trama CSMA/CD

4.4.3 Time Division Multiple Access

El acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) es una técnica mediante la cual el acceso múltiple se hace por la división de una unidad de tiempo para acomodar a los usuarios que quieran hacer uso del canal de comunicación. Utilizada en sistemas de telefonía celular como IS-54 (North American Digital Cellular), GSM (Global System for Mobile Communications) y PDC (Personal Digital Cellular), en sistemas satelitales y más recientemente en aplicaciones powerline desarrolladas principalmente por la compañía fabricante de chips DS2.

En TDMA cada portadora o trozo de espectro se divide en pequeños períodos de tiempo o microsegmentos llamados time slots, de forma que a cada usuario se le asigna en cada momento un time slot, lo que permite multiplicar el número de usuarios. Al hacer la división de tiempo, se pone disponible todo el ancho de banda del canal para el usuario en turno. Ejemplo, para acomodar a 20 usuarios de un canal de comunicación, se tiene 1 segundo de tiempo. Por lo cual a cada usuario se le asignan 50 mS, al primer usuario se le asignan los primeros milisegundos de 0 a 50, al segundo usuario de 50 a 100 y así sucesivamente, hasta el usuario 20 que se le asignan los milisegundos de 950 a 1000.

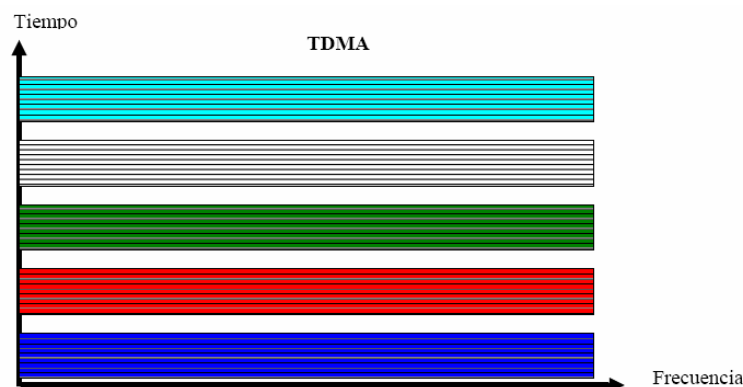


Figura 4.13: Acceso múltiple por división de tiempo

En TDMA la transmisión se organiza en tramas de duración T_t . Una trama es una sucesión de N intervalos, cada uno de los cuales se asigna a un usuario. La duración de intervalo es $T = T_t/N$, tiempo en el cual el usuario efectúa su acceso y en el que dispone de todo el recurso del ancho de banda del canal de comunicación. Todo usuario transmite en el tiempo T la información de tráfico recopilada durante una trama, más otras señales auxiliares, en un proceso de almacenamiento y envío. La información se transmite en forma de un tren de bits llamado ráfaga (burst). Por su propia naturaleza, TDMA únicamente es posible con señales digitales de origen o analógicas digitalizadas.

En la figura 4.14 se presenta un ejemplo de una trama TDMA que consta de 16 ventanas de tiempo.

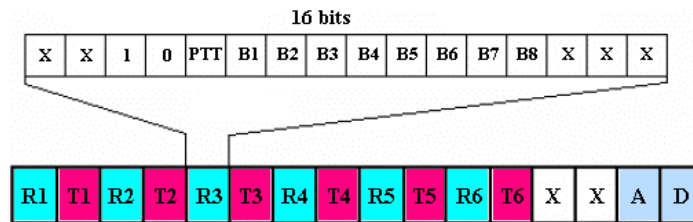


Figura 4.14: Tramas TDMA

Se aprecia en la figura que se han asignado 6 time slots para los canales de transmisión (T1 a T6), 6 para los canales de recepción (R1 a R6), 2 para los canales que contienen una secuencia de sincronismo (canales A y D) y 2 para los canales adicionales (para futuros usos, como por ejemplo incluir un séptimo canal de transmisión/recepción de voz) marcados con X.

La tecnología TDMA dispone de mecanismos de direccionamiento y sincronización, de forma que cada receptor extrae del flujo de señal únicamente las ráfagas destinadas al mismo e ignora las demás. De esta manera se evita la ocurrencia de traslapes entre las transmisiones de los diversos usuarios.

4.5 Nivel Físico: Técnicas de modulación

La primera generación de módems “powerline” utilizaban modulación FSK, sin embargo las tasas de bit obtenidas mediante esta modulación eran muy bajas (unos 25 Kbps), por lo que se

optó por otros tipos de modulaciones que adaptasen la carga a las condiciones cambiantes del medio.

La red eléctrica se caracteriza por presentar desvanecimientos variables con el tiempo y la frecuencia. Un desvanecimiento es una distorsión provocada por las variaciones de las características físicas del canal que tiene como resultado una disminución de la potencia recibida. Las mayores distorsiones son provocadas por los desvanecimientos profundos que son selectivos en frecuencia, afectando de manera distinta a los diferentes componentes frecuenciales de la señal enviada. De esta manera, algunas frecuencias se verán muy atenuadas mientras que otras pueden tener una ganancia en potencia.

Como consecuencia inmediata de la atenuación soportada en las portadoras más afectadas por el desvanecimiento, se tiene que si el nivel de ruido en el canal es suficientemente elevado, no va a ser posible recuperar la información transportada por las mismas, aunque se utilicen técnicas FEC. Este hecho que implicaría la aparición de una ráfaga de errores en la decodificación, obligaría a la retransmisión de los paquetes de datos dañados.

Por tanto en PLC se hizo necesario utilizar técnicas de modulación que se adaptasen a las condiciones variables del canal, de manera de aprovechar al máximo el ancho de banda de la red eléctrica y evitar las retransmisiones derivadas de los errores de ráfaga. Es así que entre las técnicas de modulación utilizadas por la tecnología PLC a lo largo de su evolución se encuentran:

- DSSSM (Direct Sequence Spread Spectrum Modulation), que se caracteriza porque puede operar con baja densidad espectral de potencia.
- GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), que optimiza el uso del ancho de banda pues realiza un prefiltrado previo a la modulación que reduce los lóbulos secundarios que aparecen en el espectro de la señal MSK18, limitando por tanto el ancho espectral ocupado en la transmisión.
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex), que utiliza un gran número de portadoras con anchos de banda muy estrechos.

4.5.1 FSK (Frequency Shift Keying)

La modulación por desplazamiento de frecuencia o FSK es la más simple de las modulaciones digitales y por lo tanto es de bajo desempeño. En este tipo de modulación la frecuencia portadora se modula sumándole o restándole una frecuencia de desplazamiento que representa los dígitos binarios “1” o “0”.

Este tipo de modulación permite enviar datos sobre los cables eléctricos de una casa a través de módems de baja velocidad, en la que los dos estados de la señal binaria se transmiten como dos frecuencias distintas (f_1 y f_2), las cuales están en una estrecha banda justo por encima del nivel donde ocurren los ruidos e interferencias. Por lo tanto, cualquier problema que surja en el filtrado de estos ruidos puede afectar la normal transmisión del flujo de datos a través del cableado eléctrico, provocando por ende, que el ordenador o PC tenga que volver a enviar toda la información nuevamente.

Generalmente f_1 y f_2 corresponden a desplazamientos de igual magnitud pero en sentidos opuestos de la frecuencia de la señal portadora.

$$v(t) = \begin{cases} V_p \sin(2\pi f_1 t) & \text{para un "1" binario} \\ V_p \sin(2\pi f_2 t) & \text{para un "0" binario} \end{cases}$$

La frecuencia de la portadora varía en función de la moduladora:

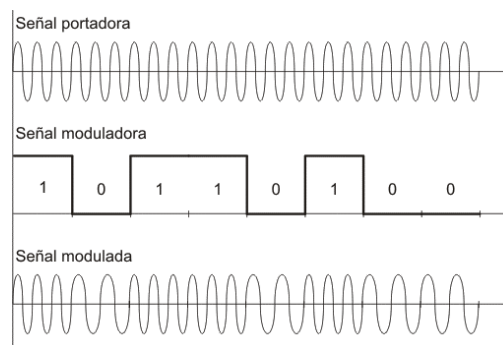


Figura 4.15: Modulación FSK

La señal modulada se puede obtener utilizando un único oscilador de frecuencia variable (modulación coherente) o con dos osciladores conmutados (modulación no coherente):

- **FSK Coherente:** Esta se refiere a cuando en el instante de asignar la frecuencia se mantiene la fase de la señal.
- **FSK No Coherente:** Aquí la fase no se mantiene al momento de asignar la frecuencia. Las frecuencias son generadas por diferentes fuentes.

La modulación FSK fue una de las primeras técnicas de modulación que se usó en la implementación de la tecnología PLC, sin embargo, ha comenzado a perder terreno con respecto a las últimas técnicas de modulación que actualmente se aplican en la tecnología PLC.

4.5.2 DSSSM (Direct Sequence Spread Spectrum Modulation)

El principio que subyace a la modulación del espectro expandido consiste en "expandir" información por una banda de frecuencia mucho más ancha que la banda necesaria, con el propósito de contrarrestar las señales de interferencia y las distorsiones relacionadas con la propagación: la señal se confunde con el ruido. La señal se codifica separadamente y se asigna un código a cada usuario. Este código se decodifica luego cuando llega a su destino. La expansión se garantiza aplicando señales pseudo-aleatorias que se denominan código expansor. La recepción de esta señal se ve como un ruido si el receptor no conoce el código. Debido a que la señal se transmite a un nivel más bajo que el ruido, el ancho de banda es bajo. De esta manera, la modulación de espectro expandido se optimiza para contrarrestar el ruido, reduciendo los efectos producidos por éste.

DSSS o espectro extendido en secuencia directa es una técnica de modulación, que al igual que como ocurre con otras tecnologías de propagación del espectro, la transmisión de la señal ocupa más ancho de banda que la señal de información que está siendo modulada. Esta técnica no requiere cambiar de frecuencia sino que cada transmisor modifica los datos con bits adicionales (un mínimo de 10) y sólo el que conoce el algoritmo de estos bits adicionales puede descifrar los datos.

La tecnología de Espectro Extendido está diseñada para intercambiar eficiencia en ancho de banda por confiabilidad, integridad y seguridad. Es decir, más ancho de banda es consumida con respecto al caso de la transmisión en banda angosta, pero a cambio, se produce una señal que

es en efecto más fuerte y así más fácil de detectar por el receptor que conoce los parámetros de la señal de espectro extendido que está siendo difundida. Si el receptor no está sintonizando la frecuencia correcta, una señal de espectro extendido se miraría como un ruido en el fondo.

El espectro extendido en secuencia directa se basa en una secuencia pseudoaleatoria llamada secuencia de dispersión, generándose un patrón de bits redundante para cada bit que sea transmitido, lo que permite modular una portadora en banda estrecha. Este patrón de bit es llamado “código chip”, el cual mientras más grande sea, más grande será la posibilidad de que los datos originales puedan ser recuperados (aunque se requerirá más ancho de banda). Ahora bien, si uno o más bits son dañados durante la transmisión, técnicas estadísticas incluidas dentro del radio transmisor podrán recuperar la señal original sin necesidad de retransmisión.

Características

- Se basa en la multiplicación de la secuencia de bits original por una secuencia digital (chips) de velocidad mucho mayor.
- El código de expansión expande la señal por una gran banda de frecuencias.
- La expansión es proporcional al número de bits usados.
- Se combina la información digital de la secuencia de bits con los bits de la secuencia de expansión, usando OR exclusivo.
- La señal binaria de datos modula una portadora RF, y la señal modulada resultante es modulada por la señal código (la señal código consiste en una sucesión de bits de código ('chips') entre +1 y -1).

Ventajas y desventajas

- Acceso múltiple: si múltiples usuarios usan el canal a la vez, habrá múltiples señales DS superpuestas en tiempo y frecuencia. Si los códigos usados tienen muy poca correlación, podrán separarse los canales sin problemas.
- Interferencia multicamino: si la secuencia código está bien seleccionada, la señal será cero fuera del intervalo $[-T_c, T_c]$, donde T_c es la duración del chip.

- Interferencia de banda estrecha.
- La generación de señales código es sencilla.
- No es necesaria la sincronización entre usuarios.

4.5.3 GMSK (Gaussian minimum shift keying)

GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) es un esquema de modulación continua en fase, una técnica que consigue suavizar las transiciones de fase entre estados de la señal, consiguiendo por tanto reducir los requisitos de ancho de banda.

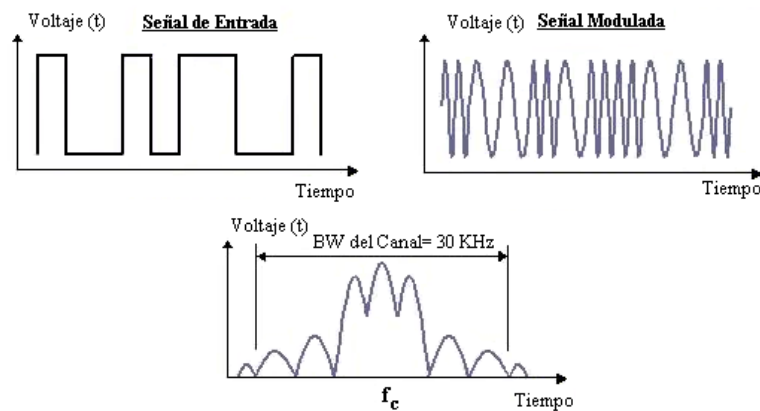


Figura 4.16: GMSK (Gaussian minimum shift keying)

Como se observa en la figura anterior, con GMSK los bits de entrada representados de forma rectangular (+1, -1) son transformados a pulsos gaussianos (señales de forma acampanada) mediante un filtro gaussiano para posteriormente ser suavizados por un modulador de frecuencia. En la mayoría de los casos, la duración del pulso gaussiano supera a la de un bit, dando lugar como consecuencia a lo que se conoce como interferencia inter-simbólica (ISI). El grado de esta superposición es determinado por el producto del ancho de banda del filtro gaussiano y la duración de un bit. Este producto se conoce normalmente como BT. Cuanto menor sea el valor de BT mayor será el solapamiento entre pulsos gaussianos.

La portadora resultante es una señal continua en fase lo cual es importante porque las señales con transiciones suaves entre fases requieren menor ancho de banda para ser transmitidas.

Por otra parte, este suavizado de la señal hace que el receptor tenga que realizar un trabajo mayor en la demodulación de la señal ya que las transiciones entre bits no están bien definidas.

Además en la transmisión de datos por la red eléctrica, este tipo de modulación es muy utilizado también en redes GSM, y en comunicaciones aeroespaciales debido al poco ancho de banda necesario y a la robustez de la señal en medios hostiles. En la práctica, GMSK es muy atractiva por su excelente eficiencia de potencia y espectral.

Otra ventaja de GMSK es que puede ser amplificada por un amplificador no lineal y permanecer inalterada. Esto se debe a que no existen elementos de la señal que son llevados como variaciones de amplitud. Lo que significa que es inmune a las variaciones de amplitud y, por tanto, más resistente al ruido que otras formas de modulación, debido a que la mayoría del ruido se basa principalmente en amplitud.

4.5.4 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

La técnica de modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) constituye un caso particular de las modulaciones multiportadora MCM (Multi-Carrier Modulation), en el cual un simple flujo de datos es transmitido sobre un número finito de subportadoras. OFDM puede ser visto tanto como una técnica de modulación, como una técnica de multiplexación.

OFDM es en la actualidad la técnica de modulación que se ha impuesto en los sistemas PLC para combatir las problemáticas del canal de transmisión. Lo anterior, gracias a su eficiencia espectral que opera adecuadamente sobre el ruido, los cambios de impedancia y las reflexiones producidas por los múltiples caminos que recorre la señal. Sumado también a su habilidad para usar o dejar de usar cualquier subcanal, adaptándose a la función de transferencia del canal con el fin de mantener una óptima tasa de error.

La modulación OFDM también se utiliza en otros sistemas como DSL, televisión digital terrestre, satelital, WIMAX y WLAN (IEEE 802.11a) para aumentar la eficiencia de la transmisión en medios hostiles.

4.5.4.1 Fundamentos de transmisión con modulación multiportadora

Si se tiene una secuencia de símbolos $[D_0, D_1, D_2, \dots, D_{N-1}]$ y estos símbolos están modulados. Usando técnicas de procesamiento digital de señales, como por ejemplo la transformada inversa de Fourier, se puede convertir esta secuencia de símbolos OFDM tales que:

$$d_k = \sum_{n=0}^{N-1} D_n e^{j2\pi n \frac{k}{N}}$$

Esto es, se hace un mapeo de símbolos modulados, por ejemplo símbolos BPSK, a símbolos OFDM, donde la parte del exponente complejo indica que se realizó una transformada inversa de Fourier para pasar de símbolos binarios (dominio del tiempo) a símbolos OFDM (dominio de la frecuencia).

La idea en la que se basa el funcionamiento de OFDM es convertir una señal de datos de alta velocidad a varias señales de datos de baja velocidad que se transmiten sobre un número de subportadoras. Estas subportadoras se convierten en una sola señal portadora y esta es transmitida por un canal de comunicación. En el receptor la señal portadora es descompuesta en las subportadoras. Las señales subportadoras de OFDM son ortogonales entre sí, tal como se observa en la siguiente figura:

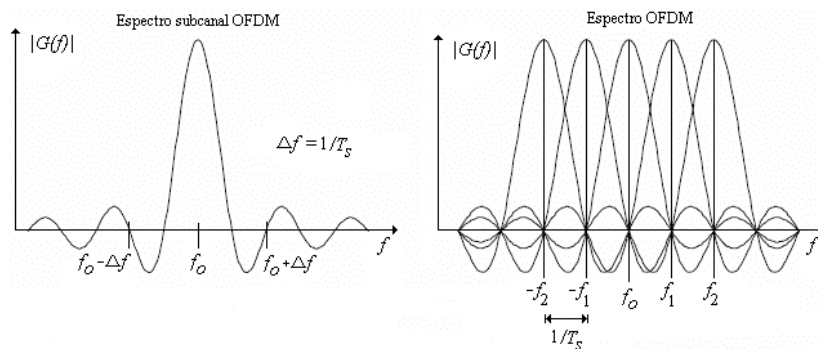


Figura 4.17: Espectro OFDM

Aunque no es en sí una forma de acceso múltiple, OFDM tiene la ventaja que proporciona un método para transmitir datos a grandes velocidades, aun en ambientes con alta dispersión y recepción multi-trayectoria.

Una señal OFDM es la suma de L portadoras que son moduladas por separado y que tienen esquemas de modulación diferente M-PSK, M-QAM. La siguiente ecuación muestra como se lleva a cabo esto:

$$x(t) = \sum_{i=1}^L a_i(t) \cos(\omega_i t) + b_i(t) \sin(\omega_i t)$$

Donde a_i y b_i son las modulaciones, siendo uno de los principales problemas el que algunas de las técnicas de modulación pueden producir un alto PAPR (Peak-to-Average Power Ratio), lo que resulta en distorsión no lineal incrementando el BER (Bit Error Ratio) de manera considerable.

Debido al problema técnico que supone la generación y la detección en tiempo continuo de los cientos, o incluso miles, de portadoras equiespaciadas que forman una modulación OFDM, los procesos de modulación y demodulación se realizan en tiempo discreto mediante la Transformada de Fourier Inversa (IFFT) y la Transformada Rápida de Fourier (FFT) respectivamente.

4.5.4.2 Transmisor de OFDM

La figura 4.18 muestra el diagrama a bloques resumido de un transmisor OFDM, el primer paso para generar una señal OFDM es codificar la señal, esta codificación se hace con alguno de los métodos de codificación fuente vistos en el punto 4.2. Enseguida se modula con alguna forma de modulación digital, ya sea BPSK (Binary Phase Shift Keying) o QAM (Quadrature Amplitud Modulation). Luego el tren de símbolos resultantes de la modulación se convierte de serie a paralelo, lo cual genera N trenes de impulsos de menor velocidad (N veces menor). A cada uno de estos trenes de pulsos de baja velocidad se les realiza una transformada inversa de Fourier (IFFT). Lo que los pasa del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, generando un conjunto de subportadoras solapadas y espaciadas en saltos de frecuencia iguales a la inversa del periodo de símbolo ($1/T$). Utilizando espaciados entre portadoras de $1/T$ (o múltiplos de éste), se consigue que las portadoras sean ortogonales entre sí, lo que permite remodularlas a pesar de que exista un solapamiento espectral. Generalmente se cumple la condición de ortogonalidad solo con que sean frecuencias armónicas, unas de otras. Es decir, una

frecuencia que sea múltiplo de otra. El siguiente paso es sumar esas frecuencias ortogonales y modularlas en una sola portadora, que es la frecuencia a la que se transmitirán.

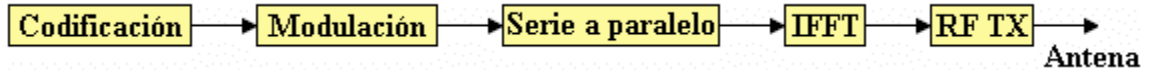


Figura 4.18: Transmisor OFDM

Para generar OFDM la relación entre todas las portadoras se debe controlar con éxito, de manera de mantener la ortogonalidad de las portadoras. Es por esta razón que OFDM es generado en primer lugar eligiendo el espectro requerido, basado en los datos de entrada, y el esquema de la modulación usado. Cada portadora que se producirá se asigna a ciertos datos a transmitir. La amplitud y fase que requiere la portadora se calculan basándose en el esquema de la modulación.

4.5.4.3 OFDM y el concepto de multiportadora

Una de las principales razones por las que se utiliza OFDM, es porque esta técnica incrementa la robustez en contra del desvanecimiento por selección de frecuencia o interferencia de banda estrecha. En un sistema simple de portadoras, el simple desvanecimiento o interferencia puede causar una falla en cualquier aplicación. Pero en sistemas de varias portadoras, solo un pequeño porcentaje de esas subportadoras desaparecerá. La corrección del código de error es usada para corregir las pequeñas subportadoras que vienen con información errónea.

En la figura 4.19, se ilustra un diagrama a bloques de un proceso de modulación y demodulación de una señal OFDM. Primero se generan los datos binarios que incluyen la información. Dichos datos son introducidos al modulador de forma serial. El siguiente proceso, es convertir esos datos a paralelo; como se mencionó anteriormente, los datos en paralelo permiten al modulador de OFDM crear simultáneamente varias frecuencias de señales portadoras, he aquí el concepto de multiportadora. Después cada grupo de símbolos puede ser modulado digitalmente de manera individual (es posible modular cada símbolo con un tipo de modulación diferente). El siguiente paso es que estos símbolos entren a un integrador a gran escala que realice varios cálculos de transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. El motivo por el que los datos son trabajados en el dominio de la frecuencia, radica en el

hecho de que es posible analizar en mayor detalle a una señal. Es en este bloque, que el concepto de multiportadora tiene origen, ya que la IFFT genera un conjunto de subportadoras, cada una espaciada de forma específica.

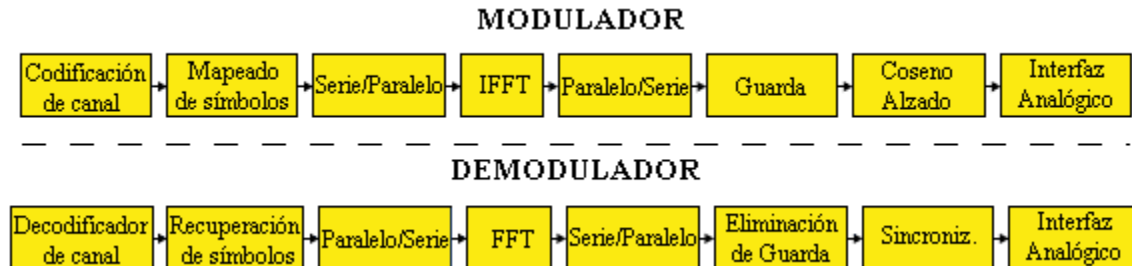


Figura 4.19: Modulador/Demodulador OFDM

El siguiente paso es eliminar la interferencia entre símbolos (ISI), para lo cual se agrega un periodo de guarda en cada símbolo que debe ser mayor que la dispersión del retardo esperada. Si el período de guarda se dejase vacío se produciría una interferencia entre portadoras, ya que estas perderían la ortogonalidad entre sí. Para evitar esto se extiende cíclicamente el símbolo OFDM en el período de guarda. Esto asegura que las réplicas retrasadas de los símbolos OFDM siempre tengan un número entero de ciclos dentro del intervalo FFT. Finalmente se suman esas frecuencias ortogonales y se modulan en una sola portadora, que es la frecuencia a la que se transmitirán.

4.5.4.4 Importancia de la ortogonalidad

La parte ortogonal incluida en el nombre de OFDM, indica que existe una relación matemática entre las frecuencias de las portadoras del sistema. Cada portadora contiene exactamente un número entero de ciclos en un intervalo de tiempo dado T . En un sistema normal FDM, las muchas portadoras se encuentran espaciadas en diferentes frecuencias, de esta manera en el receptor se puede utilizar un filtro convencional para extraer cierta portadora. En estos receptores, bandas de guarda tienen que ser introducidas entre las diferentes portadoras, y la introducción de estas bandas en el dominio de la frecuencia resulta en una ineficiencia del espectro de frecuencias.

Es posible, sin embargo, arreglar las portadoras en la señal de OFDM con el objetivo de que las bandas laterales de las portadoras individuales se traslapen y la señal pueda seguir siendo recibida sin interferencia entre portadoras. Por esta razón las portadoras deben seguir el principio de ortogonalidad.

Si el producto punto de dos señales determinadas es igual a cero, se dice que ambas son ortogonales entre si.

$$\int_a^b \psi_p(t) \psi_q(t) dt = \begin{cases} 1, & p=q \\ 0, & p \neq q \end{cases}$$

El principio de ortogonalidad, puede ser entendido también desde el punto de vista estadístico que dice que si dos procesos aleatorios no son correlacionados entonces son ortogonales. Como es el caso de la naturaleza de las señales en las comunicaciones, los símbolos creados son generalmente aleatorios, y por lo tanto dada la explicación anterior, OFDM implica el principio de ortogonalidad.

La ortogonalidad puede ser vista tanto en el tiempo, como en la frecuencia. En ambos casos el principio general es no traslapar el valor de la señal portadora, sino únicamente sus bandas laterales.

4.5.4.5 Generación de subportadoras utilizando IFFT

Matemáticamente, cada portadora puede escribirse como una onda compleja:

$$S_c(t) = A_c(t) e^{j[\omega_c t + \phi_c(t)]}$$

Tanto $A_c(t)$ y $\phi_c(t)$, la amplitud y la fase de las portadoras, puede variar de un símbolo a otro. Los valores de los parámetros son constantes durante la duración de un periodo τ de un símbolo. OFDM consiste de muchas subportadoras. Por lo tanto, la señal compleja $S_c(t)$ está representada por:

$$S_s(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A_k(t) e^{j[\omega_k t + \phi_k(t)]}$$

En donde N representa al número de muestras

Debido a que es una señal continua. Si la forma de onda de cada componente de la señal sobre un periodo de símbolo es considerada, entonces las variables $A_c(t)$ y $\Phi_c(t)$ tomarían valores determinados, los cuales dependerían de la frecuencia particular de cada portadora, y por tanto puede describirse:

$$\begin{aligned}\phi_c(t) &\Rightarrow \phi_k \\ A_c(t) &\Rightarrow A_k\end{aligned}$$

Si la señal se muestrea usando una frecuencia de muestreo de $1/T$, entonces la señal resultante se representa por:

$$S_s(nT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A_k(t) e^{j[(\omega_0 + k\omega_u)nT + \phi_k]}$$

$$\text{Donde: } \omega_k = \omega_0 + k\omega_u$$

El uso del proceso inverso en el receptor es esencial, puesto que no solo basta generar las señales, sino también recibirlas.

En el transmisor, la señal es definida en dominio de la frecuencia. Cada portadora de OFDM corresponde a un elemento del espectro de la transformada de Fourier. Las amplitudes y las fases de las portadoras dependen del dato que es transmitido. Las transiciones de los datos son sincronizados en las portadoras y pueden ser procesadas todas juntas, símbolo a símbolo.

La definición de una transformada discreta de Fourier (DFT) de N-puntos es:

$$X_p[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x_p[k] e^{-j(2\pi/N)kn}$$

y la transformada discreta inversa de Fourier (IDFT) de N-puntos es:

$$X_p[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_p[n] e^{j(2\pi/N)kn}$$

Una consecuencia natural de este método es que permite generar portadoras que son ortogonales. El concepto de ortogonalidad le da la calidad de linealidad independiente.

Considerando una secuencia de datos ($d_0, d_1, d_2, \dots, d_{N-1}$), donde cada d_n es un número complejo de la forma $d_n = a_n + jb_n$: ($a_n, b_n = \pm 1$ para QPSK, $a_n, b_n = \pm 1, \pm 3$ para QAM-16, ...) la serie de datos que llega, es primero convertida de serial a paralelo y agrupado a x bits hasta generar un número complejo. El número x determina la constelación de la señal que le corresponde a cada subportadora, como lo son QAM-16, QAM-64, etc. Los números complejos son modulados en banda base con la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) y convertidos de nuevo a transmisión de datos en serie. Un intervalo de guarda es introducido entre símbolos para evitar la interferencia entre símbolos (ISI) causada por la distorsión multitrayecto. Los símbolos discretos son convertidos a análogos y filtrados con un filtro pasabandas para su preparación de radiofrecuencia (RF). La siguiente figura muestra un generador de señales OFDM con la IFFT:

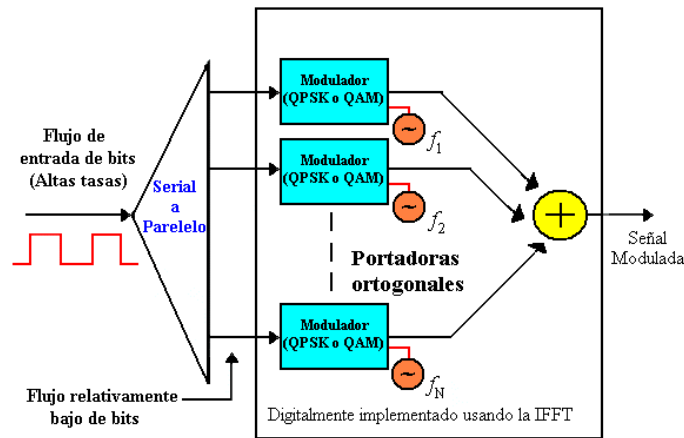


Figura 4.20: Generador de señales OFDM con IFFT

El receptor desarrolla el proceso inverso al transmisor. Un ecualizador es utilizado para corregir la distorsión de los canales. Además se le añade una tarea muy importante, la sincronización, ya que las portadoras sólo son ortogonales si el emisor y el receptor utilizan exactamente las mismas frecuencias. Por ello el receptor debe corregir cualquier desviación en la frecuencia de la portadora para la señal recibida. En el receptor OFDM se realiza la demodulación y aplicación de la FFT. La FFT transforma la señal cíclica del dominio del tiempo en su espectro equivalente de la frecuencia. Esto se hace encontrando la forma de onda equivalente, generada por una suma de componentes sinusoidales ortogonales. Por último los coeficientes son filtrados y calculados basados en la información del canal.

4.5.4.6 Periodo de guarda y extensión cíclica

En un ambiente de multitrayecto, la señal transmitida es reflejada por un sinnúmero de objetos. Como resultado de esto, múltiples versiones de la señal transmitida llegan hasta el receptor. Estas versiones llegan con un retardo en la información. OFDM fue creado para soportar eficientemente este problema. Para eliminar la interferencia entre símbolos (ISI) casi por completo, un intervalo de guarda es introducido a cada símbolo de OFDM. La longitud de dicho intervalo es seleccionada de modo que sea mayor a la propagación retardada esperada.

De modo es, que si un símbolo de OFDM llega con cierto retraso, el periodo de guarda generará un espacio suficiente para que este símbolo no vaya a interferir con uno subsiguiente. La figura 4.21 ilustra un típico caso de la interferencia entre símbolos (ISI).

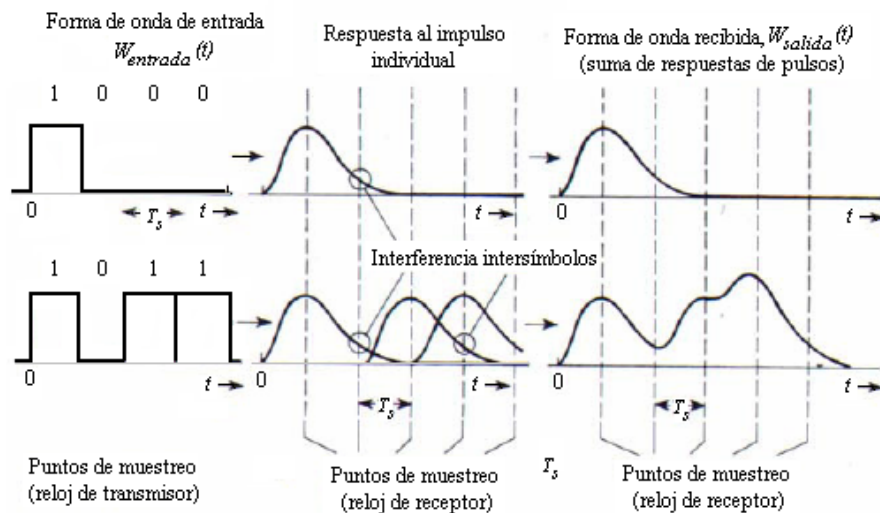


Figura 4.21: Ejemplos de interferencia entre símbolos (ISI)

El intervalo de guarda, puede consistir de información nula, es decir, de ausencia de señal. En ese caso, sin embargo, es posible que se genere el problema de una interferencia entre portadoras (ICI). La ICI es una cierta interferencia que se genera entre varias portadoras, la cual, significaría que la señal de OFDM perdiera su principio de ortogonalidad. El efecto de la ICI se muestra en la figura 4.22. En este ejemplo, una subportadora 1 y subportadora retrasada 2 son mostradas. Cuando un receptor OFDM trata de demodular la primer subportadora, encontrará algunas interferencias de la segunda subportadora porque dentro del intervalo de la FFT, no

existe un número entero de ciclos de diferencia entre la subportadora 1 y la 2. Al mismo tiempo existirá interferencia de la primera a la segunda subportadora por la misma razón.

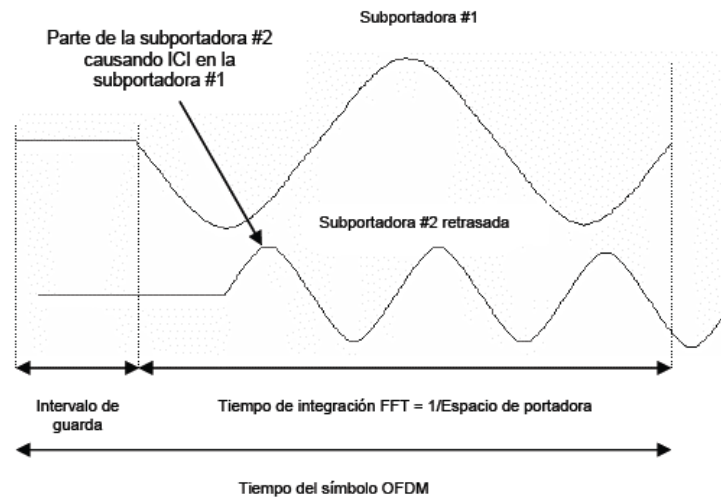


Figura 4.22: Efecto de multitrayecto con una señal nula de intervalo de guarda

Para eliminar la ICI, el símbolo de OFDM es extendido cíclicamente en el periodo de guarda, como se muestra en la figura 4.23. De esta manera se asegura que las réplicas retardadas del símbolo de OFDM siempre tengan un número entero de ciclos dentro del intervalo de la FFT. Como resultado de esto, mientras el retraso sea menor al intervalo de guarda, no existirá la ICI.

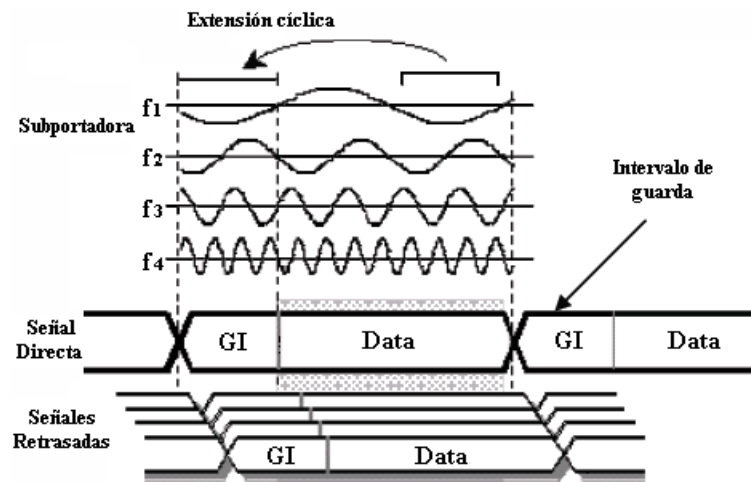


Figura 4.23: Extensión cíclica del símbolo de OFDM

Un ejemplo de cómo afecta el efecto multitrayecto a una señal OFDM se muestra en la figura 4.24. La línea punteada representa a una réplica de la señal, solo que retardada. Tres subportadoras son mostradas durante tres intervalos de la duración de un símbolo. En donde el total de duración de un símbolo es $T_{\text{total}} = T_g + T$, siendo T_g el intervalo de guarda y T la duración útil del símbolo. Los valores que puede tomar el intervalo de guarda son $1/4$, $1/8$, $1/16$ y $1/32$ de la duración de la parte útil del periodo de símbolo.

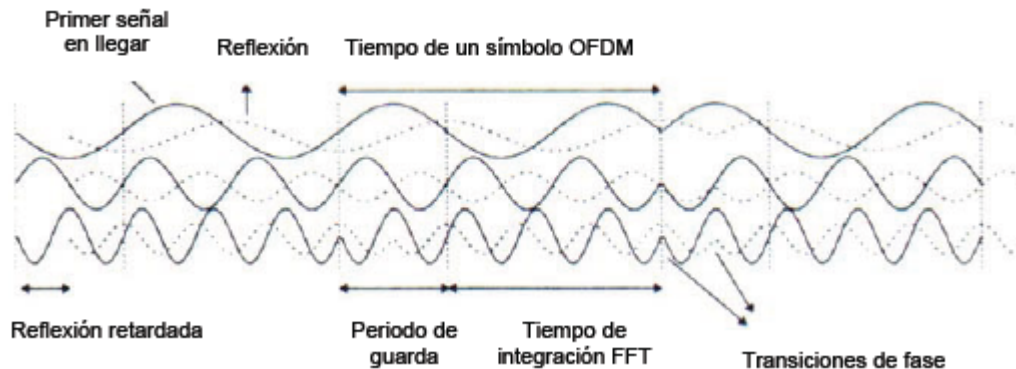


Figura 4.24: Ejemplo de una señal OFDM con 3 subportadoras en el canal de multiportadora

En realidad, un receptor OFDM solo ve la suma de las tres señales, pero se muestran de manera separada para que se pueda observar más claramente el efecto de multitrayecto. En este ejemplo, la propagación retardada es menor que el periodo de guarda, lo que significa que no existirán transiciones de fase durante el intervalo de la FFT. Las transiciones de fase que muestra la figura, solo son resultado de la extensión cíclica, y en ningún momento representan destrucción alguna al principio de ortogonalidad entre subportadoras. El único momento en que se perdería la ortogonalidad, es si el retardo causado por el efecto de multitrayectoria llega a ser mayor que el periodo de guarda. En ese caso, la señal OFDM pierde su ortogonalidad y por lo tanto, produce cierto nivel de interferencia.

De manera de tener una idea de que tanto afecta el hecho de que el periodo de guarda sea insuficiente ante el posible retardo en un símbolo, la figura 4.25 ilustra un diagrama de 4 constelaciones, en donde se representa una simulación de un enlace de OFDM con 48 subportadoras, cada una de las cuales fue modulada con QAM-16. La figura 4.25 (a), representa una constelación de QAM-16 sin distorsión alguna, es decir, cuando el periodo de guarda es

mayor al símbolo retardado. La figura 4.25 (b), muestra a una constelación en donde el símbolo retardado sobrepasa al period de guarda en un 1% de la fracción del intervalo de la FFT.

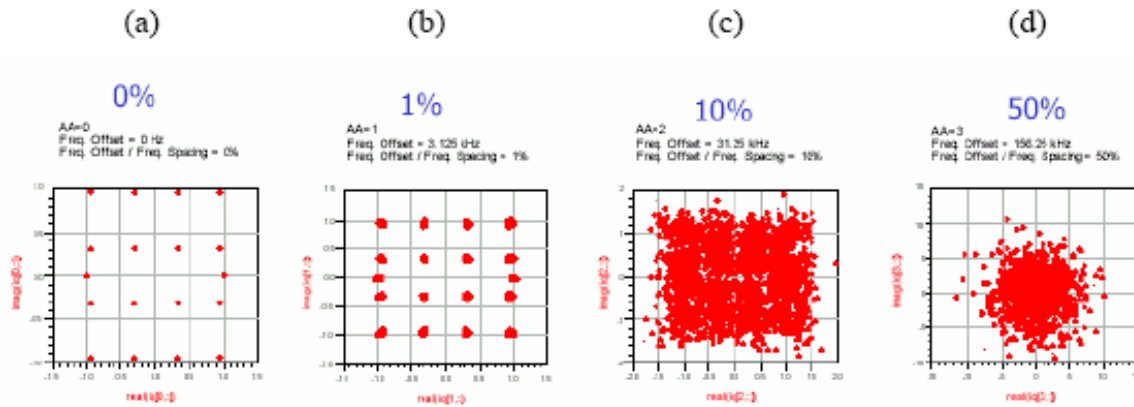


Figura 4.25: Constelación de QAM-16 que representa a una señal de OFDM con 48 subportadoras

Se observa que como resultado de esto, las subportadoras ya no son ortogonales entre si, sin embargo, la interferencia es tan pequeña que aun se puede ver una constelación recibida de manera razonable. En la figura 4.25 (c), el símbolo retardado supera en un 10% al intervalo de guarda, por lo que se puede notar que dicha constelación representa a la información de una manera inentendible. Por último, la figura 4.25 (d), representa la constelación de una señal OFDM en donde el retardo sobrepasa al intervalo de guarda en un 50%, por lo que la interferencia es tan grande que la transmisión representa un serio problema de comunicación, causando así que la tasa de error sea inaceptable.

4.5.4.7 Adecuación de la señal al medio

Hasta el momento se ha visto como OFDM es capaz de aumentar la eficiencia de la transmisión utilizando múltiples portadoras solapadas en vez de sólo una. Sin embargo, la eficiencia de la transmisión aún puede incrementarse más si se adapta de forma dinámica la tasa de bit de cada portadora a las condiciones cambiantes del canal, monitorizando las condiciones de relación señal ruido de cada subportadora como se muestra en la siguiente figura:

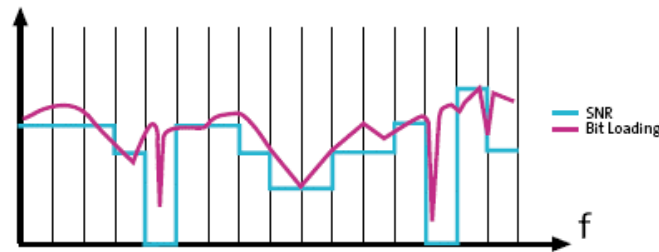


Figura 4.26: Distribución de la carga en modulación OFDM

La modulación adaptativa permite medir los niveles de atenuación y ruido con una alta resolución espectral y en base a esta información, usar unas u otras subportadoras para enviar la información. De esta manera se consigue que una línea de potencia se convierta en un medio de transmisión de alta velocidad, pero también seguro en cuanto a la correcta transmisión de la información.

Mediante OFDM puede alcanzarse velocidades de 45Mbps y últimamente de 200Mbps. Sin embargo, al no existir un estándar para PLC, la modulación OFDM utilizada para los equipos PLC varía según los fabricantes de esta nueva tecnología.

La principal razón por la que la técnica de OFDM tomo mucho tiempo en ser aceptada y aplicada, fue debido a su puesta en práctica. Ha sido muy difícil generar una señal en OFDM y aun más difícil recibirla y demodularla. La solución física, hasta ese entonces, era utilizando múltiples moduladores y demoduladores, que de algún modo eran imprácticos para utilizarse en los sistemas civiles.

La habilidad para definir señales en el dominio de la frecuencia, en software o en procesadores VLSI y para generarlas usando la transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) ha sido la llave para la presente popularidad.

CAPITULO V

PRUEBAS REALIZADAS CON EQUIPOS PLC

5.1 Introducción

Con el propósito de conocer el desempeño de la tecnología PLC HomePlug previa a su implementación, se procedió a realizar pruebas con los adaptadores powerline, tanto en laboratorio, como en dependencias de la Escuela Rural Coihueco.

El objetivo de estas pruebas radica en el hecho de analizar el funcionamiento de los equipos PLC en ambientes eléctricos con diferentes condiciones de carga. De manera de comprobar y medir la capacidad de transmisión de datos, y observar los efectos que se producen en la transmisión ante la presencia o ausencias de equipos eléctricos conectados a la red eléctrica.

5.2 Equipos y software utilizado

Los equipos requeridos para la realización de las pruebas, tanto en el laboratorio, como en la Escuela Rural Coihueco, son:

Laboratorio	
Material	Cantidad
Computador de escritorio	2
Adaptador Powerline	2

Escuela	
Material	Cantidad
Computador de escritorio	1
Adaptador Powerline	2
Notebook	1
Modem satelital	1
Switch	1
Hub	1

Para la medición de la tasa de transferencia de los archivos se utilizó el programa **DU Meter**, el cual gracias a su sencilla interfaz resultó de gran ayuda para la medición de la

velocidad de transferencia, tanto de bajada, como de subida. La interfaz de este programa se observa a continuación:

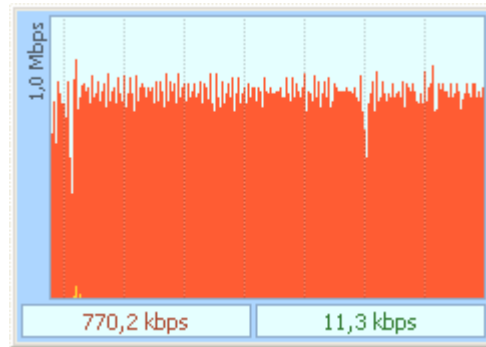


Figura 5.1: Interfaz programa DU Meter

En la figura anterior, la tasa de transferencia de bajada se grafica en color rojo, mientras que la tasa de subida en color verde (estos colores se pueden cambiar, si se desea).

5.3 Pruebas realizadas en laboratorio

Se procedió a configurar una red LAN a través del cableado eléctrico del laboratorio de electrónica, del Instituto de Electricidad y Electrónica.

Los computadores fueron conectados a una distancia de 2,24 mts., tal como se muestra en la siguiente figura:

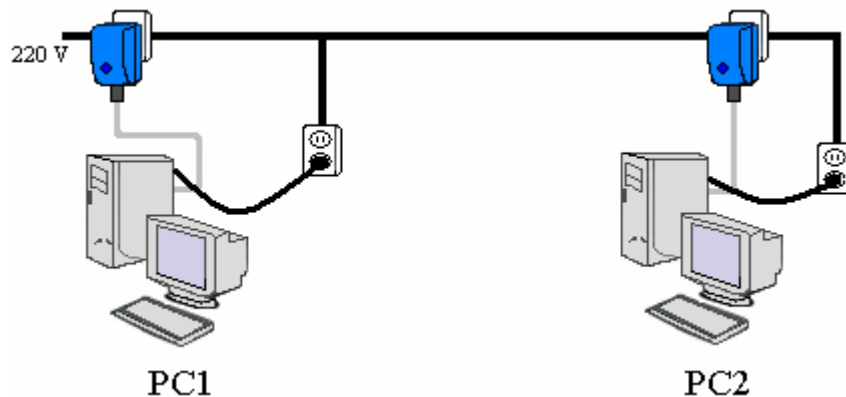


Figura 5.2: Conexión de equipos en laboratorio

5.3.1 Configuración red de área local

Configuración de equipos

El primer paso fue configurar las propiedades de la red local, realizándose para ello la asignación de direcciones IP y máscara de subred en ambos computadores utilizados, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Configuración	PC1	PC2
Dirección IP	192.168.0.1	192.168.0.2
Máscara de subred	255.255.255.0	255.255.255.0

A continuación se realizó la configuración de la red. Para lo cual se utilizó la herramienta de Windows “Configurar una red doméstica”.

Luego de reiniciar ambos computadores, y conectar los equipos PLC al puerto RJ45, se ejecutó el comando **net view** para verificar que los equipos se viesen en red.

5.3.2 Mediciones de la tasa de transferencia de archivos

Para la realización de estas pruebas se utilizaron archivos de 1.8 MB, 12.4 MB, 62.9 MB y 382 MB. Los cuales se transfirieron desde el PC2 al PC1.

Las mediciones fueron realizadas en el PC1, y los resultados de las mismas se presentan en la siguiente tabla:

Tamaño archivo	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Tiempo transcurrido
1,8 MB	1,6 Mbps	92 kbps	5 segundos
12,4 MB	5 Mbps	110 kbps	20 segundos
62,9 MB	5,2 Mbps	114 kbps	2 minutos
382 MB	5,3 Mbps	111 kbps	10 minutos, 39 segundos

5.4 Pruebas realizadas en Escuela

Estas pruebas fueron realizadas en dependencias de la Escuela Rural de Coihueco, comuna de Panguipulli. Este establecimiento educacional cuenta con un enlace satelital de internet, para lo cual posee una red compuesta por el equipo de modem satelital, un Switch y un Hub y los correspondientes computadores. El enlace satelital posee una velocidad de conexión de 200 kbps, repartidos entre 9 computadores de escritorio y un notebook.

La conexión de los equipos utilizados para la realización de las pruebas se presenta a continuación:

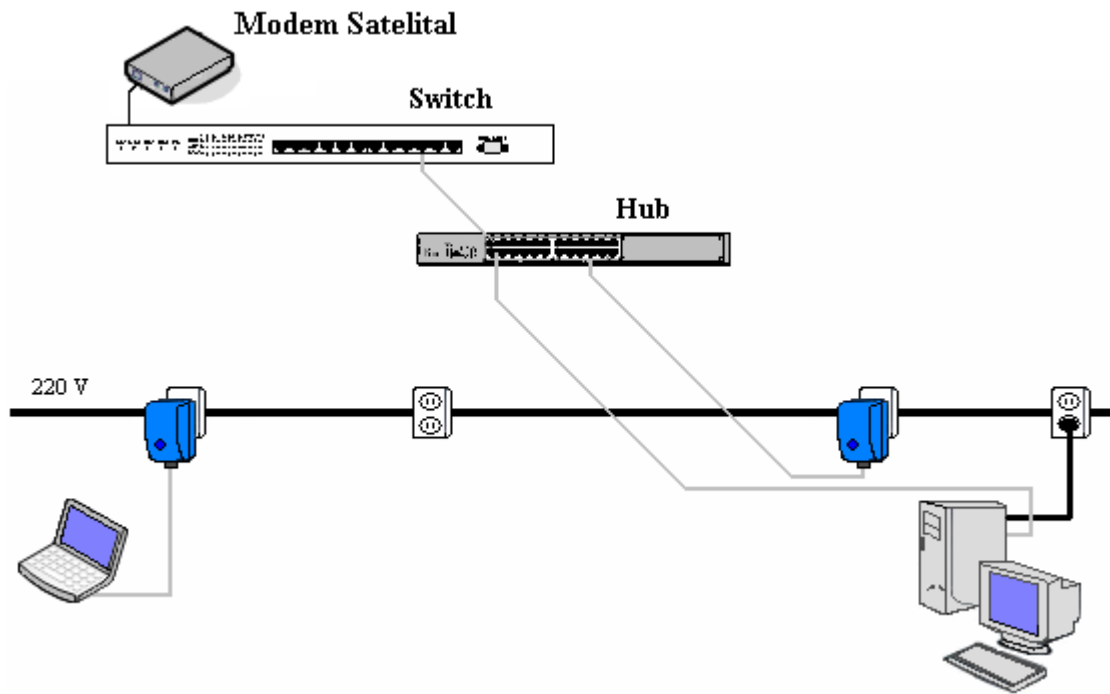


Figura 5.3: Conexión red LAN y conexión de equipos para la realización de las pruebas

Esta configuración se mantuvo, exceptuando la posición del notebook. El cual se fue conectando en otros enchufes de la red eléctrica del colegio.

5.4.1 Configuración red de área local

Configuración de equipos

Dado que todos los equipos se encontraban configurados en red y que la asignación de las direcciones IP era realizada de manera dinámica por el Switch, no fue necesario realizar configuración alguna en los equipos utilizados para las pruebas.

Las propiedades de red de los equipos al ejecutar el comando **ipconfig**, se presentan en la siguiente tabla:

Configuración	PC	Notebook
Dirección IP	10.1.1.5	10.1.1.6
Máscara de subred	255.255.255.0	255.255.255.0
Puerta de enlace predeterminada	10.1.1.1	10.1.1.1

5.4.2 Medición de la velocidad de conexión a internet

Esta prueba consistió en utilizar medidores de velocidad de conexión online. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Página Medición	Velocidad de bajada	Velocidad de subida
ABELTRONICA	47,28 kbps	21,84 kbps
TELEFONICA CHILE	166 kbps	50,1 kbps

5.4.3 Prueba de alcance de la señal PLC

Para la realización de esta prueba, se procedió a conectar la entrada RJ45 de uno de los adaptadores powerline a una de las bocas del Hub situado en el laboratorio de computación (ver figura 5.3). Para luego conectar el adaptador a un tomacorriente.

Con el empleo de un notebook y el otro adaptador powerline se fue verificando el alcance de la señal PLC a través de la red eléctrica del colegio. Realizándose para ello la carga de páginas como www.google.cl y www.uach.cl.

Gracias a esta prueba se pudo constatar que la señal PLC abarcaba todas las salas de clases, además del comedor del establecimiento.

5.4.4 Mediciones de la tasa de transferencia de archivos

Para la realización de las pruebas se utilizaron los mismos archivos transferidos en el laboratorio, y que tienen tamaños de: 1.8 MB, 12.4 MB, 62.9 MB y 382 MB. Debido a que los computadores ya se encontraban configurados en red, tan sólo bastó compartir estos archivos en red. La transferencia de archivos se realizó desde un computador de escritorio a un notebook.

Las mediciones fueron realizadas en el notebook, para lo cual se le debió instalar el programa **DU Meter**. Las primeras pruebas se realizaron en el laboratorio de computación, luego en una sala de clases y finalmente en el comedor del establecimiento.

Pruebas en el laboratorio de computación

Aquí se desarrollaron dos pruebas de transferencia. La primera de ellas con los archivos grabados en un CD. Razón por la cual se debió compartir la unidad de CD del computador de escritorio.

Los resultados obtenidos para esta primera prueba fueron los siguientes:

Tamaño archivo	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Tiempo transcurrido
1,8 MB	1,2 Mbps	21,5 kbps	33 segundos
12,4 MB	1,2 Mbps	29,2 kbps	2 minutos, 13 segundos
62,9 MB	1 Mbps	24 kbps	10 minutos, 19 segundos

La siguiente medición fue realizada con los archivos presentes en la carpeta mis documentos del computador de escritorio. Obteniéndose las siguientes velocidades:

Tamaño archivo	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Tiempo transcurrido
1,8 MB	1,3 Mbps	28 kbps	24,3 segundos
12,4 MB	1,2 Mbps	29 kbps	2 minutos, 2 segundos
62,9 MB	1,2 Mbps	25 kbps	8 minutos, 43 segundos

Debido a la demora en la transferencia del archivo de 382 MB, tan sólo se realizó una medición de velocidad para este archivo. Logrando transferirse en aproximadamente 45 minutos, a una tasa de 1,2 Mbps.

Pruebas realizadas en sala de clases

Esta prueba fue realizada en la sala N° 3 (ver anexo A2), situada en la medianía de la infraestructura del establecimiento. Las tasas de transferencia obtenidas se presentan a continuación:

Tamaño archivo	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Tiempo transcurrido
1,8 MB	1,6 Mbps	34,9 kbps	13,4 segundos
12,4 MB	4,4 Mbps	85 kbps	32,7 segundos
62,9 MB	4,5 Mbps	88,6 kbps	2 minutos, 9 segundos
382 MB	4,6 Mbps	91,9 kbps	14 minutos, 2 segundos

Este fue el único punto en donde se realizó la transferencia del archivo de película, debido a la buena tasa de transmisión obtenida.

Pruebas realizadas en comedor

Esta prueba fue realizada aquí debido a que es el punto más lejano desde el laboratorio de computación, encontrándose en el otro extremo del establecimiento. Las velocidades obtenidas se presentan en la siguiente tabla:

Tamaño archivo	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Tiempo transcurrido
1,8 MB	1,2 Mbps	31,9 kbps	21,4 segundos
12,4 MB	1,9 Mbps	60 kbps	59,7 segundos
62,9 MB	2,1 Mbps	53,5 kbps	4 minutos, 9 segundos

Reproducción de un archivo de video

Finalmente, se procedió a realizar la reproducción de un archivo de película, el cual tiene una tasa de reproducción de 709 kbps.

La primera medición se realizó en el laboratorio de computación, obteniendo una reproducción satisfactoria, debido a que la tasa de transferencia alcanzado por los equipos powerline era de aproximadamente 1,1 Mbps. Luego se llevó a cabo la misma prueba, pero ahora en la sala N° 3 del establecimiento, ubicada aproximadamente a 15 mts de la sala de computación. Lográndose una reproducción sin retardos.

Por último, se realizó la misma prueba pero en la sala N° 4 y con un computador de escritorio alimentado desde una UPS. En esta oportunidad se observó claramente una disminución de la tasa de transferencia, atribuidas a la presencia del UPS. Lo anterior provocó que el archivo de película se reprodujese con cierto retraso, debido a que las mediciones de la tasa de transferencia medidas gracias al software DU Meter fueron de 689 kbps.



Figura 5.4: Reproducción archivo de video

CAPITULO VI

PROPUESTA E IMPLEMENTACIÓN DE CONEXIÓN EN BANDA ANCHA UTILIZANDO EQUIPOS PLC

6.1 Introducción

Más allá de la importancia de poseer acceso a internet, este se ve potenciado si se cuenta con la infraestructura adecuada para su utilización, sobre todo cuando se trata de establecimientos educacionales. Los cuales por su carácter formador, necesitan sacarle el máximo de provecho a las herramientas que les entrega internet.

El presente trabajo se enmarca en proponer una conexión en banda ancha con equipos con tecnología PLC, de modo de permitir generar una mayor conectividad a una red ya existente.

El lugar escogido para llevar a cabo la propuesta, y posterior implementación de los equipos PLC es la Escuela Rural Coihueco. Establecimiento educacional que si bien cuenta con una sala de computación y conexión satelital a internet, no posee conectividad hacia otras salas de clases.

6.2 Planteamiento del problema

Como se mencionó anteriormente, el presente trabajo tiene por finalidad proponer un modelo de conexión en banda ancha con equipos con tecnología PLC. Equipos que quedarán implementados en la Escuela Rural de Coihueco.

La limitante de la cobertura de la red implementada en dicho establecimiento hace necesaria la búsqueda de una alternativa de conexión, que permita prolongar la cobertura de internet con la que cuenta el establecimiento.

Además, con la extensión de la cobertura de red se podría complementar las labores educativas llevadas a cabo por los docentes. No limitándose a realizarlas cuando se encuentren en el laboratorio de computación. El que además es asignado por horas a cada curso.

6.3 Escuela Rural Coihueco

La Escuela Rural Coihueco posee un enlace satelital que proporciona internet a los computadores dispuestos en la sala de computación. Este enlace, y el mantenimiento de los equipos son llevados a cabo por la Red Enlaces, a través de la Unidad de Gestión Valdivia, de la Universidad Austral de Chile.



Figura 6.1: Sala de computación

6.3.1 Ubicación

Este establecimiento educacional se encuentra ubicado en la comuna de Panguipulli, Región De Los Ríos. Aproximadamente a unos 14 kilómetros al noreste de la ciudad de Panguipulli.

En la figura 6.2 se puede apreciar una imagen satelital obtenida gracias al software Google Heart de parte de la comuna de Panguipulli.

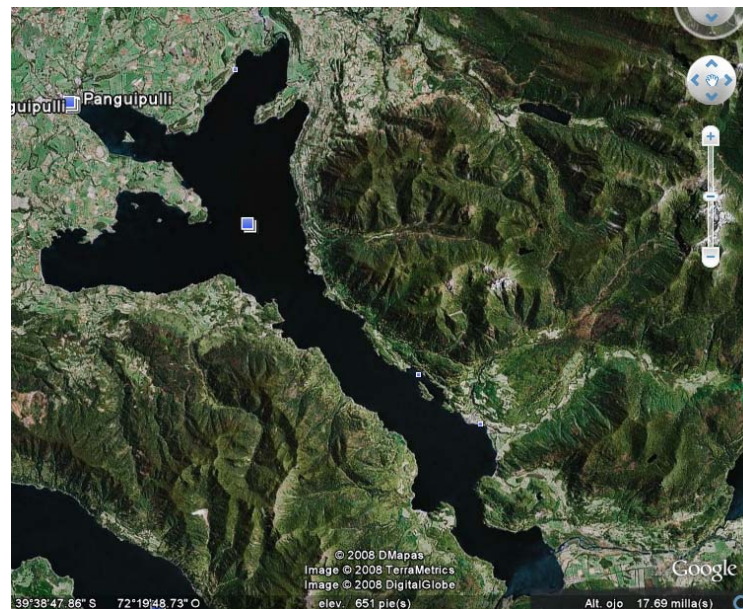


Figura 6.2: Imagen satelital de Panguipulli

En la figura 6.3 se puede observar, encerrada en un círculo rojo, la ubicación de la localidad de Coihueco. Mientras que en la figura 6.4 se observa las dependencias del establecimiento educacional.



Figura 6.3: Imagen ubicación de la localidad de Coihueco



Figura 6.4: Escuela Rural Coihueco

6.3.2 Distribución estructural

La escuela posee una planta de 6 x 50 mts aproximadamente, en una distribución de volumen extendido:

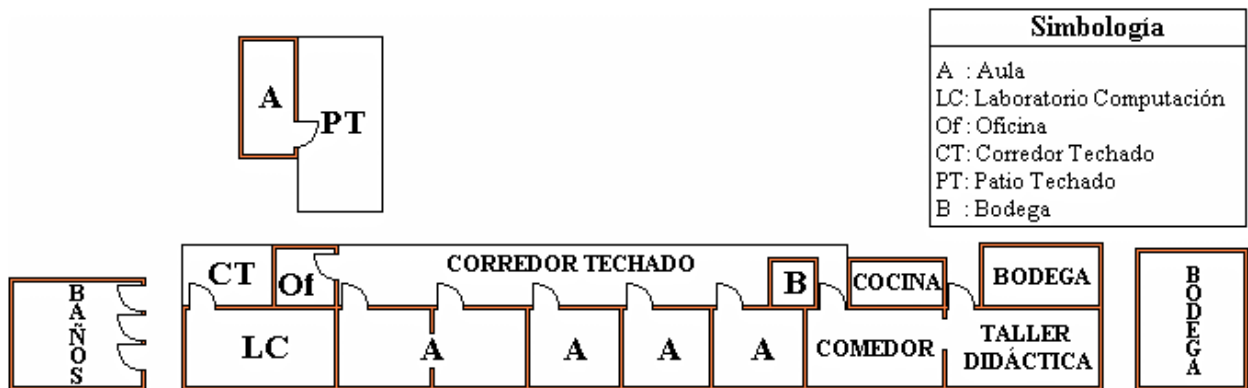


Figura 6.5: Plano estructural Escuela Rural Coihueco

Tal como se observa en la figura anterior, la sala de computación se encuentra en un extremo del establecimiento, colindante con la primera sala de clases (formada por la anexión de dos salas).

La red eléctrica del establecimiento se encuentra en un solo circuito, el cual abarca la totalidad de las dependencias del mismo.

6.3.3 Características de la red LAN

Los equipos que posee el establecimiento son 9 computadores de escritorio y un notebook. Estos equipos se encuentran conectados en red, y acceden a internet a través de un Hub y un Switch.

El único computador que se conecta directamente al Switch es el dispuesto para el profesor encargado, tal como se muestra en la figura 6.6.

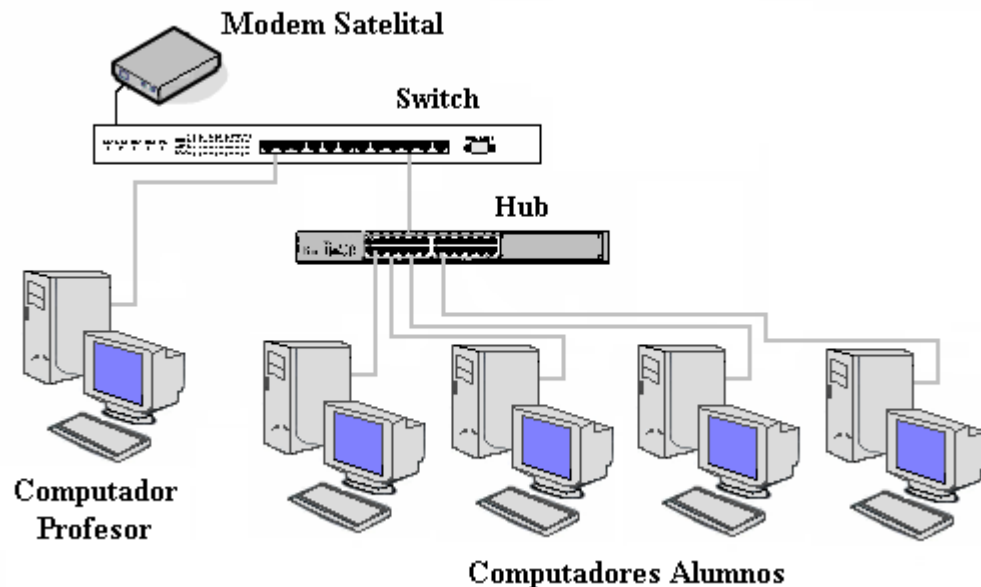


Figura 6.6: Conexión red LAN

Las direcciones IP de los PCs son asignadas de manera dinámica por parte del Switch, con lo que tan sólo basta conectar un equipo configurado para que su IP sea asignada.

6.4 Análisis de los escenarios posibles para la propuesta

De acuerdo a las pruebas realizadas, y tomando en cuenta la forma en que están configurados los equipos, y los dispositivos presentes en la red LAN, la mejor forma de

proporcionar una extensión de la red sería conectando un adaptador powerline directamente a una de las bocas del Hub.

Surgen de este modo dos escenarios posibles para la implementación de la conexión:

- Laboratorio de computación
- Salas de clases.

6.4.1 Laboratorio de computación

Una conexión en el laboratorio de computación permitiría complementar la red existente, a la cual se le podría agregar un equipo móvil o de escritorio. Complementando de este modo a los equipos ubicados en la sala de computación.

Sin embargo, las pruebas realizadas con los equipos powerline permitieron observar que la tasa de transferencia de archivos se ve mermada en comparación a otras dependencias del establecimiento. Disminución que se acentúa cuando se encuentran funcionando todos los equipos de la sala de computación.

6.4.2 Salas de clases

Gracias a la movilidad que ofrecen los adaptadores PLC, se puede disponer de un computador móvil o de escritorio en cualquiera de las salas de clases. Lo cual permitiría realizar las correspondientes clases con apoyo multimedia de algún equipo del laboratorio de computación o de internet.

Además, las pruebas de transferencia realizadas en las salas permitieron observar que la tasa de transferencia era mucho mayor que las obtenidas en la sala de computación. A pesar de encontrarse más distantes del punto donde se inyectó la señal PLC a la red eléctrica (enchufe ubicado en la sala de computación).

6.5 Propuesta de conexión

En lo que respecta a la sala de computación, analizando los resultados obtenidos en la sala, se optó por descartar sugerir una conexión aquí, al menos en lo que respecta a transferencia de archivos. Lo anterior, debido a los magros resultados de velocidad obtenidos en las pruebas desarrolladas. Y que se deben en gran medida a la cantidad de equipos que están conectados a la red eléctrica en esta sala. Siendo los monitores, impresoras y una UPS los principales responsables de la merma en la tasa de transmisión.

Los resultados obtenidos en las salas de clases, sumado al hecho de que la utilización de un equipo móvil permite complementar las experiencias multimedia de una clase en particular, hacen que la conexión propuesta sea la de utilizar un notebook como herramienta de apoyo a las clases que así lo requieran. De este modo, se extiende la conexión de internet por todo el colegio, siendo la única limitante la cantidad de adaptadores powerline con la que se cuente.

Sin perjuicio de lo anteriormente mencionado, y dadas las características de los equipos PLC, estos pueden ser complementados con otros equipos powerline HomePlug de mayor tasa de transmisión, los cuales son compatibles con los equipos que quedarán en el colegio.

Además, si los encargados del establecimiento desean, se pueden complementar los equipos PLC con un router inalámbrico para proveer un punto de acceso o acces point, en caso de contar con otro notebook. Dispositivo que se conectaría al puerto RJ45 de unos de los adaptadores powerline.

6.5.1 Configuración de la propuesta de conexión

Como se mencionó en el punto anterior, la propuesta contempla la utilización de los adaptadores powerline en conjunto con el notebook con el que cuenta el establecimiento.

En la siguiente figura se puede observar como se pueden disponer los adaptadores powerline en las diferentes salas con que cuenta el establecimiento educacional:

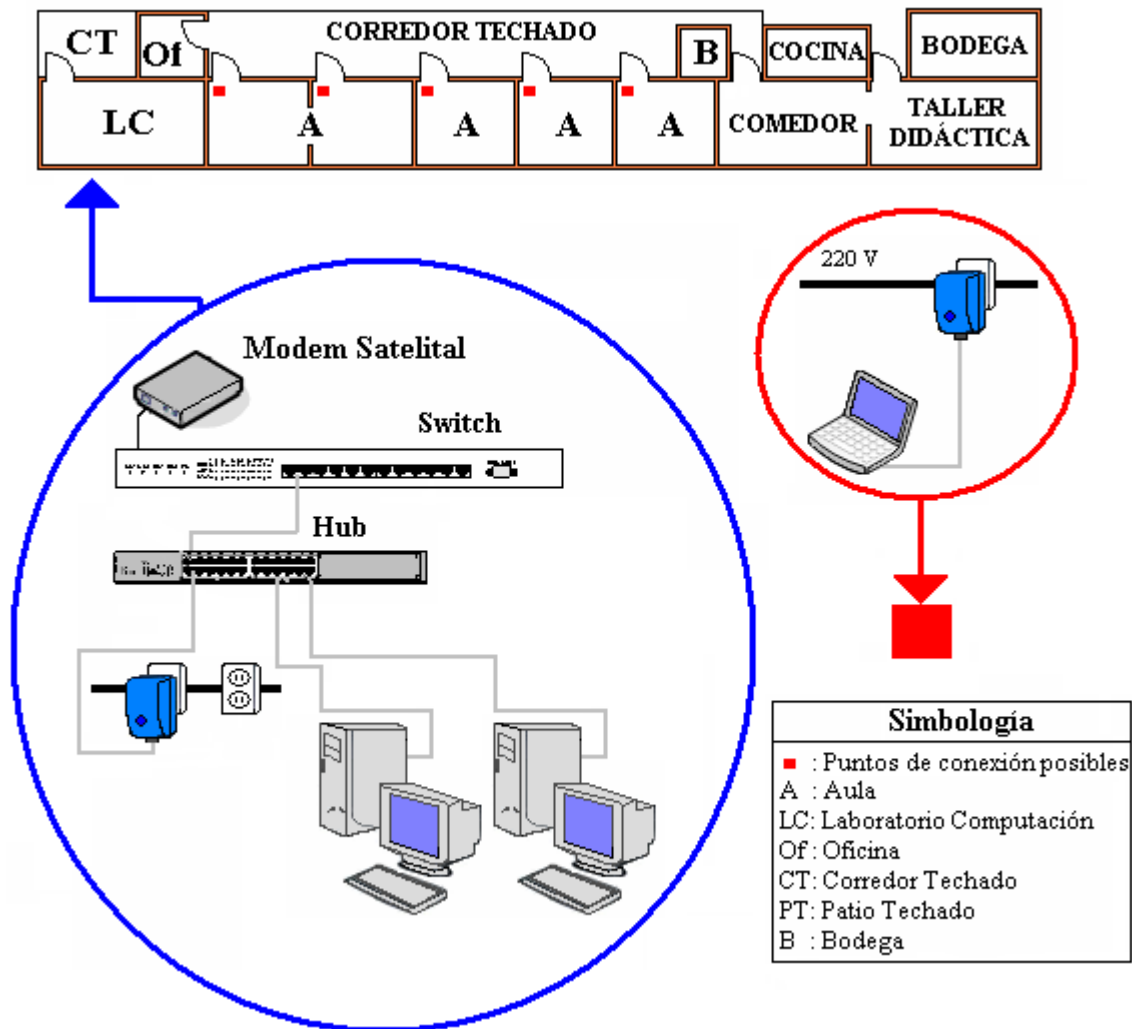


Figura 6.7: Puntos de conexión posibles de la propuesta

6.5.2 Beneficios para la Escuela Rural Coihueco

A los recursos ya proporcionados por la conexión a internet: enciclopedias, noticieros, acceso a bibliotecas y otros materiales educativos de valor, se suman los siguientes beneficios obtenidos con la implementación de los dispositivos Powerline:

- **Extensión de la red LAN:** Los equipos Powerline permiten extender la red sin necesidad de cableado adicional. Gracias al aprovechamiento de la red eléctrica como medio de

transmisión de datos, cualquier enchufe se transforma en punto de conexión a la red LAN implementada.

- **Movilidad:** Al permitir generar puntos de conexión a la red LAN en cualquiera de las salas del colegio. Permitiendo conectarse a ella a través de computadores de escritorio o notebooks.
- **Acceso a internet:** En cualquiera de los enchufes de que disponga una sala. Logrando de esta manera extender la cobertura de la conexión a internet. Y así acceder a ella sin la necesidad de encontrarse en la sala de computación que pudiese encontrarse ocupada.
- **Transferencia de archivos:** Realizar la transferencia de archivos compartidos en red, sean estos de video, música, software, texto, imágenes, etc.
- **Reproducción de archivos:** Poder reproducir archivos compartidos de audio o video, sin la necesidad de copiarlo en el computador que se esté usando.

6.5.3 Sugerencias para un mejor rendimiento de los equipos PLC

De acuerdo a los resultados de las mediciones, y con el objetivo de sacarles el máximo provecho a los equipos PLC se sugiere:

- Evitar la utilización de los equipos en ambientes con muchos equipos conectados a la red eléctrica, debido a que en ambientes con mucho ruido eléctrico, sobre todo ante la presencia de UPS, la tasa de transmisión disminuye (no se produce pérdida de información, sino que una demora en la transmisión de la misma).
- Mantener en buen estado la calidad de los cables ethernet de los equipos PLC.
- Utilizar, en lo ideal, plataformas de Windows 2000, 98 o XP. Debido a que los equipos PLC son de primera generación (HomePlug 1.0) pudiesen no funcionar correctamente en los equipos con plataforma Windows Vista.
- Mantener los PCs en buen estado, sobre todo, libre de virus que pudiesen mermar la capacidad de procesamiento o que generar problemas con la conexión.

CONCLUSIONES

PLC se presenta como una atractiva tecnología, al permitir la transmisión de datos por el cableado eléctrico, a tasas que en la actualidad superan los 14 Mbps. Sin embargo, aún persisten problemas de despliegue de esta tecnología, debido principalmente a la falta de estándares y compatibilidad electromagnética con otras tecnologías ya desplegadas. No obstante, el desarrollo alcanzado por los dispositivos PLC Indoor, a través del estándar HomePlug principalmente, le ha dado un nuevo empuje a la tecnología. Convirtiéndose este estándar en la línea a seguir para la formulación de un estándar único para PLC.

El estudio teórico, y la realización de las pruebas prácticas con los equipos PLC, permitieron conocer y comprobar el avance que ha logrado la tecnología PLC. Las mediciones efectuadas además, proporcionaron información referente al alcance de la señal PLC de los adaptadores HomePlug y las limitaciones de los mismos. Información que resultó muy importante para la formulación de la propuesta e implementación de los equipos.

La utilización de los adaptadores HomePlug, permitirá a los docentes y alumnos de la Escuela Rural Coihueco contar con una gran herramienta educativa. Ya que podrán acceder y aprovechar los recursos que proporciona el enlace satelital de internet, desde cualquier enchufe disponible en las salas de clases. Complementando de este modo las materias impartidas en los diferentes ramos.

El desarrollo alcanzado por PLC en aplicaciones Indoor, deja abierta la posibilidad de que en los próximos años se pueda ofrecer acceso a Internet con aplicaciones Outdoor. Principalmente en zonas rurales, en donde no se encuentre desplegada otra tecnología de acceso.

Como conclusión final, destacar que este trabajo de tesis permitió profundizar mis conocimientos sobre la tecnología PLC, de la cual sólo tenía algunas referencias. Además de sentir una gran satisfacción por el hecho de proporcionar una herramienta que irá en directo beneficio a las actividades de docencia impartidas en la Escuela Rural Coihueco.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] José M. Huidobro, David Roldán, “Redes y Servicios de banda ancha”, McGraw-Hill, España, 1ª. Edición, 2004.
- [2] Subsecretaría de Telecomunicaciones, Subtel, www.subtel.cl
- [3] European Telecommunications Standards Institute, ETSI, www.etsi.org
- [4] Open PLC European Research Alliance, OPERA, www.ist-opera.org
- [5] Foro PLC de Argentina, www.plcforum.org.ar
- [6] Universal Powerline Association, UPA, www.upapl.org
- [7] HomePlug Powerline Alliance, HPA, www.homeplug.org
- [8] Federal Communications Commission, FCC, www.fcc.gov
- [9] DS2, Fabricante de circuitos integrados PLC, www.ds2.es
- [10] Intellon, Fabricante de circuitos integrados PLC, www.intellon.com
- [11] Schneider Electric Powerline Communications, ILEVO, www.ilevo.com
- [12] Comportamiento de la Tecnología PLC en la Red Eléctrica, Congreso Argentino en Ciencias de la Computación 2007, www.cacic2007.unne.edu.ar
- [13] Sistema eléctrico de potencia, Web de tecnología eléctrica, www.tuveras.com

- [14] Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central, CDEC-SIC, www.cdec-sic.cl
- [15] Enciclopedia virtual Wikipedia, <http://es.wikipedia.org>
- [16] Digital Powerline Communications Networking, www.powerlinecommunications.net
- [17] Puente HomePlug a Ethernet, Papers empresa IOGEAR, www.iogear.com
- [18] “Comunicaciones por línea eléctrica (PLC)”, www.bandaancha.es
- [19] Alejandro Montiel Oliveros, Tesis noviembre 2005 “Simulación de un transmisor OFDM basado en el estándar IEEE 802.11a usando serenade”, Universidad de Carabobo, Venezuela.
- [20] Raúl César Vilcahuamán Sanabria, Tesis “Análisis Interactivo Gráfico De Sistemas Eléctricos De Distribución Primaria”, Pontificia Universidad Católica De Chile.

ANEXOS

A1 Equipos power line communications

A1.1 Equipo cabecera PLC o Head End

Considerado como el componente vital en la arquitectura de una red PLC, este dispositivo funciona como equipo principal realizando la coordinación de la frecuencia y actividad del resto de los equipos que constituyen la red PLC. Asegurando con esto, que se mantenga constante el flujo de datos a través de la red eléctrica. Este equipo se instala en los centros de transformación de energía eléctrica, donde el ámbito de funcionamiento de este equipo puede ser en el tramo de media tensión (MT) y de baja tensión (BT).

El Head End o también llamado equipo cabecera PLC, actúa como medio de conexión o interfaz entre el proveedor de servicios de Internet (ISP) y las líneas de distribución de energía eléctrica. En donde la naturaleza del enlace de conexión de Internet puede fibra óptica, satelital o bien un radio enlace.

La elección de su ubicación es un factor importante en la arquitectura de una red PLC, dado que de esto dependerá que la introducción del flujo de datos tenga la máxima cobertura o alcance posible dentro de la red eléctrica. Es así como en redes de distribución de media tensión se llegan a cubrir distancias de 600 mt, mientras que en redes de distribución de baja tensión la distancia aproximada de transmisión de datos efectiva alcanza los 300mt.



Figura A1.1: Equipo cabecera PLC

- Tasa de transmisión de 200 Mbps
- Soporta hasta 1024 direcciones MAC
- Conexiones PLC activas: 64
- Modulación OFDM con 1536 portadoras
- Densidad espectral de potencia: máx. -50 dBm/Hz
- Control de transmisión de potencia: automático
- QoS Dinámico: configuración usando clasificación del servicio
- Actualización remota del software
- Soporta VLAN 802.1Q
- Priorización del tráfico según 802.1P
- Firewall / NAT Router incorporado
- DHCP, DNS, FTP cliente & servidor
- Agente SNMP: soporta SNMP v2c
- Estándar: compatibilidad con estándar OPERA
- EMC: EN55022 Clase B, EN55024

A1.2 Repetidor

El repetidor, también llamado Home Gateway, permite la extensión de una red de datos sobre líneas eléctricas a partir de la regeneración de la señal, en intervalos constantes y sucesivos, o en división de frecuencia y en forma simultánea. Se requiere cuando hay una distancia considerable entre el módem del servidor (HE) y el módem del cliente.

Un HE se entiende con un HG en la frecuencia de outdoor, y un HG conversa con un módem PLC en la frecuencia indoor. En este caso, el sistema maestro esclavo se establece de la siguiente forma:

- HE es maestro, el HG es esclavo.
- HG es maestro, módem PLC es esclavo.

Un HG, es instalado al interior de una vivienda o edificio, a continuación del medidor de energía eléctrica, actuando como puente entre la red eléctrica domiciliaria y la red de baja tensión. Su utilización está relacionada con la cantidad de equipos módem PLC que estén

instalados en el interior de la vivienda o edificio, como también la distancia que exista entre el HE y el módem PLC.

Un HG, puede ser utilizado para expandir la cobertura de la red PLC, o mejorar el ancho de banda disponible. Si se desea implementar una red LAN al interior de un hogar, es requisito disponer de un HG, para que este cumpla funciones de Router.



Figura A1.2: Equipo Repetidor PLC

Características técnicas

- Tasa de transmisión de 200 Mbps
- Soporta hasta 1024 direcciones MAC
- Conexiones PLC activas: 64
- Modulación OFDM con 1536 portadoras
- Densidad espectral de potencia: máx. -50 dBm/Hz
- Paso de transmisión de potencia: 1 dB
- Ganancia programable de transmisión: 33 dB y 21 dB
- Ganancia programable de recepción: -12 dB a 30 dB
- Rango dinámico: 90 dB min
- QoS Dinámico: configuración usando clasificación del servicio
- Actualización remota del software
- Soporta VLAN 802.1Q
- Priorización del tráfico según 802.1P
- Firewall / NAT Router incorporado

- DHCP, DNS, FTP cliente & servidor
- Agente SNMP: soporta SNMP v2c
- Estándar: compatibilidad con estándar OPERA
- EMC: EN55022 Clase B, EN55024

A1.3 Modem PLC

Equipo para el usuario final. Se usa para conectar el equipamiento multimedia (computadoras, cámaras, teléfonos, etc.) a la red de comunicación. Se conectan directamente al tomacorriente del usuario.

Equipo para el usuario final. Diseñado para conectar un equipo a la red de datos establecida por el HE. Este módem recibe la señal de alta frecuencia, y se ocupa de demodularla extrayendo los datos que entrega mediante un interfaz Ethernet, USB o Wireless 802.11b. Adicionalmente, el módem puede integrar un gateway de VoIP, el cual a través de un interfaz RJ11 se puede conectar a un teléfono tradicional para poder ofrecer servicios de telefonía (VoIP) al usuario final.



Figura A1.3: Modem PLC

Internamente el modem PLC implementa un acoplador eléctrico capaz de separar la señal de datos de la señal eléctrica de baja frecuencia. Este acoplador eléctrico consta básicamente de un filtro pasabajo, que permite pasar la baja frecuencia de la señal de energía y cancela la señal de alta frecuencia, y otro filtro pasa-alto para extraer la alta frecuencia y cancelar la señal de baja frecuencia. Este equipo sería el equivalente al “splitter” de ADSL.

Características técnicas

- Tasa de transmisión de 200 Mbps
- Modulación OFDM con 1536 portadoras
- Densidad espectral de potencia: máx. -56 dBm/Hz
- Paso de transmisión de potencia: 1 dB
- Ganancia programable de transmisión: 33 dB y 21 dB
- Ganancia programable de recepción: -12 dB a 30 dB
- Rango dinámico: 90 dB min
- QoS Dinámico: configuración usando clasificación del servicio
- Soporta VLAN 802.1Q
- Priorización del tráfico según 802.1P
- DHCP, DNS, FTP cliente & servidor
- Agente SNMP: soporta SNMP v2c
- Estándar: compatibilidad con estándar OPERA
- EMC: EN55022 Clase B, EN55024

A1.4 Adaptador o Bridge

Este equipo permite conectar una red Ethernet al cableado eléctrico, ya sea por medio de una conexión RJ45 o USB, alcanzando velocidades que van desde los 14 Mbps.

La tecnología de este tipo de dispositivos se enmarca en el estándar HomePLug, para conexiones al interior del hogar, o también llamada Indoor PLC. Permiten dar internet a través del cableado eléctrico del hogar si se dispone de una conexión, independiente de la naturaleza de esta (ADSL, radio enlace, PLC, etc).

Características técnicas

- Equipos con compatibilidad especificación HomePlug Powerline Alliance
- Conexión puerto RJ45
- Velocidad de 14 Mbps

- Alcance de 90 metros entre nodos powerline
- Encriptación 56-bit DES
- Soporta protocolo CSMA/CA
- Rango de frecuencia: 4.3 MHz a 20.9 MHz

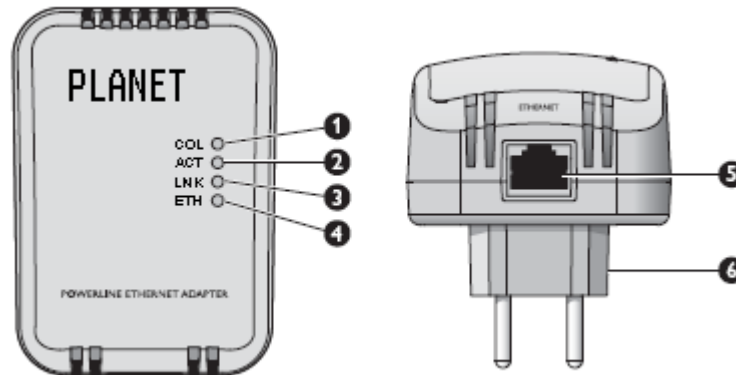


Figura A1.4: Adaptador Ethernet

1.- Luz de colisiones de red

Muestra las colisiones del cableado de la red eléctrica doméstica.

- Intermitente – uso aumentado del cableado de la red eléctrica doméstica
- Apagada – no hay colisiones en el cableado de la red eléctrica doméstica

2.- Luz de actividad de red eléctrica

Indica la actividad en el cableado de la red eléctrica doméstica.

- Apagada – sin actividad
- Intermitente – actividad

3.- Luz de enlace de red eléctrica

Indica el estado de la conexión a la red.

- Apagada – no se encuentra ningún otro adaptador ethernet por red eléctrica
- Intermitente – buscando otro adaptador ethernet por red eléctrica
- Encendida – conectado a otro adaptador ethernet por red eléctrica

4.- Luz de actividad ethernet

Indica la actividad en el puerto Ethernet.

- Apagada – sin actividad
- Intermitente - actividad

5.- Puerto de red

Sirve para conectar un cable de red (Ethernet UTP5e) a un dispositivo de red.

6.- Enchufe eléctrico

Se conecta a la fuente de alimentación

A1.5 Acopladores

A1.5.1 Acopladores Capacitivos

Los acoplamientos capacitivos para tecnología PLC sobre líneas de distribución eléctrica, son unidades altamente compactas que incluyen en los mismos dispositivos, el condensador de acoplo y el circuito de sintonía. Estos dispositivos maximizan el ancho de banda disponible y optimizan la adaptación de impedancias entre la línea de media tensión y el equipo de comunicaciones. El alto aislamiento brinda la más completa seguridad, ya sea dando protección a los operarios y/o a los equipos de comunicaciones. Estos tipos de acoplamiento son muy utilizados para líneas aéreas, y el costo es razonable para este tipo de aplicaciones.



Figura A1.5: Acoplador capacitivo

A1.5.2 Acopladores Inductivos

El acoplamiento inductivo puede ser un método muy utilizable conociendo exactamente las características de la red y si hay un profundo conocimiento de la propagación de la señal.

Efectúan el acoplamiento sin contacto directo mediante la generación de un campo magnético alrededor del cable, con lo cual inyectan la señal de datos en él. Si bien tienen un nivel mayor de pérdida que los acopladores capacitivos, presentan la ventaja de poder manipular su instalación sin la necesidad de interrumpir la corriente.



Figura A1.6: Acoplador inductivo

A1.6 Caja de distribución

La caja de distribución es utilizada para facilitar la distribución de la señal PLC en paneles eléctricos en edificios. Por lo general van equipados también con un filtro que se encarga de filtrar los ruidos inyectados a la línea por los electrodomésticos, motores, etc., que afectan la señal PLC al provocar variaciones en la impedancia y pérdidas.



Figura A1.7: Caja de distribución PLC

A1.7 Filtro aislador de ruidos

Este dispositivo fue diseñado para filtrar el ruido de la señal eléctrica, minimizando los impactos que pueden afectar a la red de PLC.

Este filtro está concebido para un usuario final en la red de PLC con una conexión filtrada al encendido de cualquier dispositivo. Este conector eficaz filtra el ruido potencial generado por cualquier aplicación eléctrica sobre la operación del PLC la que es minimizada. Esto permite un mejor desempeño del sistema PLC, con la reducción del nivel de ruido en la red.

Características técnicas

- Rendimiento físico hasta 200Mbit/s
- Limitación de ancho de banda y garantía
- Gestión de Latencia Inteligente
- Manejable remotamente
- Montaje de pared
- Modulación OFDM
- Densidad espectral de potencia : -56 dBmW/Hz
- Rango de frecuencia. 2 – 4 MHz



Figura A1.8: Filtro aislador de ruidos

A2 Plano Estructural Escuela Rural Coihueco

