

**SOLUCIÓN DE ACCESO A UNA INTRANET UTILIZANDO
LA TECNOLOGÍA PLC - POWERLINE COMMUNICATION**



**Dora Juliana Martínez Cerón
Edwin Humberto Muñoz Ramírez**

**Director:
Mag. Giovanni Perafán**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICAIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES
POPAYÁN
2007**

TABLA DE CONTENIDO

1.	GENERALIDAD DE LAS SOLUCIONES DE ACCESO.....	11
1.1	IMPORTANCIA DEL ÁREA DE ACCESO EN UN SISTEMA DE TELECOMUNICACIONES	11
1.2	TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVAS REDES DE ACCESO	12
1.3	USO DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE EN EL ÁREA DE ACCESO	15
1.4	ACCESO MEDIANTE POWER LINE COMMUNICATION (PLC).....	18
1.4.1	<i>Orígenes de PLC</i>	18
1.4.2	<i>Perspectivas de desarrollo</i>	19
1.4.3	<i>Estándares y Grupos de Apoyo PLC</i>	21
1.4.4	<i>Uso de la red eléctrica para transmisión de datos</i>	24
1.4.5	<i>Estructura eléctrica utilizada para PLC</i>	26
1.4.6	<i>PLC Banda Angosta</i>	27
1.4.7	<i>PLC Banda Ancha</i>	30
2.	TECNOLOGÍA DE ACCESO PLC.....	32
2.1	ESTRUCTURA DE LAS REDES DE ACCESO PLC	32
2.2	REDES PLC IN-HOME	33
2.3	REDES HÍBRIDAS PLC.....	35
2.4	ELEMENTOS DE LA RED PLC	35
2.4.1	<i>Modem PLC – CPE</i>	35
2.4.2	<i>Estación Base Maestra PLC – Head End</i>	36
2.4.3	<i>Repetidor o Equipo intermedio (IE - Intermediate Equipment)</i>	37
2.4.4	<i>Gateway PLC</i>	38
2.4.5	<i>Equipo de Transformación o TE (Transformer Equipment)</i>	40
2.4.6	<i>Unidades de Acoplamiento</i>	41
2.5	CONEXIÓN AL NÚCLEO DE LA RED.....	42
2.5.1	<i>Topologías para las redes de distribución PLC</i>	42
2.5.2	<i>Redes de Media Tensión PLC</i>	44
2.5.3	<i>Tecnologías híbridas de comunicación para redes de distribución PLC</i>	46
2.5.3.1	<i>Estructura No.1: Aplicación de la tecnología PLC en redes de media tensión</i>	47
2.5.3.2	<i>Estructura No. 2: Red de distribución WiFi (Wireless Fidelity), red de acceso PLC</i>	48
2.5.4	<i>Gestión de las redes PLC</i>	49
3.	CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE TRANSMISIÓN PLC.....	51
3.1	MODELO DEL CANAL.	51
3.2	CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE TRANSMISIÓN PLC	54
3.3	INFLUENCIA DE LAS CONSTANTES DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS PARA SISTEMAS PLC AÉREOS Y SUBTERRÁNEOS.	60
3.4	RUIDO EN SISTEMAS PLC	61
3.5	CAPACIDAD DEL CANAL	66
3.5.1	<i>Capacidad del canal Powerline</i>	66
3.5.2	<i>Capacidades de un Canal de acceso PLC Indoor</i>	68
3.5.3	<i>Tasas de bit alcanzadas en un ambiente Indoor (interno)</i>	71
3.5.4	<i>Tasa de datos alcanzable</i>	73
3.6	CONSIDERACIONES ELECTROMAGNÉTICAS	75
3.6.1	<i>Compatibilidad y Susceptibilidad Electromagnética</i>	75
3.6.2	<i>Interferencia Electromagnética</i>	76
3.6.3	<i>Clasificación de Alteraciones Electromagnéticas</i>	78
3.6.3.1	<i>EMI Conducidas</i>	79
3.6.3.2	<i>EMI por Acoplamiento Capacitivo</i>	80
3.6.3.3	<i>EMI por Acoplamiento Inductivo</i>	81
3.6.3.4	<i>Acoplamiento por Radiación Electromagnética</i>	83
3.6.3.5	<i>Duración, Tasa de Repetición y Ciclo Duty</i>	83
3.6.4	<i>Clasificación de las perturbaciones según su frecuencia</i>	84

3.7	POTENCIAL DE INTERFERENCIAS OCASIONADAS POR LAS CONFIGURACIONES PLC AÉREAS Y SUBTERRÁNEAS	86
3.8	CONFIGURACIONES BALANCEADAS PARA EVITAR EFECTOS DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA..	90
3.9	INTERFERENCIAS CAUSADAS A OTROS SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES	91
3.10	ESTÁNDARES Y ORGANISMOS QUE CONTROLAN LAS INTERFERENCIAS PLC	92
3.10.1	Comités Internacionales	93
3.10.2	Organizaciones Regionales	94
3.10.3	Estándares límites para las emisiones radiadas.....	95
3.10.4	Estándares límites para emisiones conducidas.....	96
4.	DISEÑO DE MODEMS OFDM Y GMSK PARA EL CANAL ELECTRICO.....	98
4.1	MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL (OFDM)	98
4.2	MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA MÍNIMO GAUSSIANO (GMSK).....	99
4.3	MODELADO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN OFDM Y GMSK PARA CANAL PLC	99
4.3.1	Diagrama en Bloques del Sistema.....	99
4.3.1.1	Codificador.....	100
4.3.1.2	Intercalador	100
4.3.1.3	Modulador.....	101
4.3.1.3.1.	OFDM.....	101
4.3.1.3.2.	GMSK.....	102
4.3.1.4	Canal PLC.....	104
4.3.1.5	Ruido y Ecuilizador.....	106
4.3.1.6	Demodulador.....	106
4.3.1.6.1.	OFDM.....	106
4.3.1.6.2.	GMSK.....	107
4.3.1.7	De-Intercalador	107
4.3.1.8	Decodificador.....	107
4.4	PRUEBAS PARA EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN MODELADO OFDM Y GMSK.....	108
4.4.1	Validación del Modelo.....	110
4.4.2	Prueba 1: Modulación GMSK y OFDM sin codificación, con codificación convolucional y con codificación Reed Solomon.....	110
4.4.3	Prueba 2: Modulación OFDM y GMSK sin y con codificación.....	111
4.4.4	Síntesis de Resultados.....	113
4.5	SÍNTESIS DE UN MODELO DE TRANSMISIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS HARDWARE.....	113
5.	DISEÑO DE UNA RED GENÉRICA Y SU FUNCIÓN DE COSTOS DE IMPLANTACIÓN... 115	
5.1	REDES DE BAJO VOLTAJE.....	116
5.1.1	Estructura de las redes de bajo voltaje	116
5.1.2	Modelado de las redes de bajo voltaje y la célula PLC.....	118
5.2	PLANEAMIENTO DE LAS REDES DE ACCESO PLC BANDA ANCHA Y SUS COSTOS.....	120
5.2.1	Problema de Localización de la Estación Base (BSP).....	120
5.2.2	Problema de Asignación del Canal (CAP).....	123
5.3	COMPARACIÓN DE COSTOS EN REDES DE ACCESO PLC Y REDES DE CABLEADO ESTRUCTURADO. 125	
5.3.1	Costos Infraestructura.....	126
5.3.1.1	PLC en el escenario planteado.....	126
5.3.1.2	ETHERNET en el escenario planteado.....	127
5.3.1.3	Análisis de costos de infraestructura de acuerdo al escenario planteado.....	129
5.3.2	Costos Servicios Comerciales.....	130
5.3.2.1	Precios de servicios Adsl/Cable	130
5.3.2.2	Precios de servicios PLC.....	131
5.3.2.3	Análisis de costos de servicios comerciales.....	131
5.4	VENTAJAS ADICIONALES DE PLC.....	131
5.5	PLC EN COLOMBIA	132
6.	SERVICIOS PLC EN UNA INTRANET.....134	
6.1	PARÁMETROS DE SERVICIOS PLC.....	134
6.1.1	Datos	134
6.1.2	Vo IP.....	135

6.1.3	<i>Video Streaming</i>	135
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LAS REDES DE TELECOMUNICACIONES.....	12
FIGURA 1.2. ESTRUCTURA DE REDES MÓVILES INALÁMBRICAS	14
FIGURA 1.3. ESTRUCTURA DE UNA RED INALÁMBRICA	14
FIGURA 1.4. ESTRUCTURA DE UNA RED DE ACCESO DSL.....	16
FIGURA 1.5. ESTRUCTURA DE UNA RED DE ACCESO DE TELEVISIÓN POR CABLE	17
FIGURA 1.6. RANGO DE FRECUENCIAS Y NIVELES LÍMITES PARA PLC BANDA ANGOSTA, SEGÚN EL ESTÁNDAR EN 50065.....	21
FIGURA 1.7. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS ETSI TS 101 867.....	23
FIGURA 1.8. RED ELÉCTRICA Y PLC	27
FIGURA 1.9. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN USANDO PLC BANDA ANGOSTA	30
FIGURA 2.1. ESTRUCTURA DE UNA RED DE ACCESO PLC	32
FIGURA 2.2. ESTRUCTURA DE UNA RED PLC IN-HOME.....	34
FIGURA 2.3. ACOPLADOR ELÉCTRICO.....	36
FIGURA 2.4. RED PLC CON REPETIDORES (R).....	37
FIGURA 2.5. CONEXIÓN DIRECTA A LOS USUARIOS PLC.....	38
FIGURA 2.6. CONEXIÓN DE USUARIO A TRAVÉS DE UNA GATEWAY.	39
FIGURA 2.7. GATEWAYS EN UNA RED DE ACCESO PLC.....	40
FIGURA 2.8. EQUIPO PLC EN EL ÁREA DE ACCESO Y DISTRIBUCIÓN.....	41
FIGURA 2.9. RED DE DISTRIBUCIÓN EN BUS Y EN ESTRELLA.....	43
FIGURA 2.10. TOPOLOGÍA EN ANILLO PARA REDES PLC	43
FIGURA 2.11. RED DE ACCESO Y DISTRIBUCIÓN PLC	45
FIGURA 2.12. ESTRUCTURA DE LA RED DE COMUNICACIÓN DE UN SECTOR RESIDENCIAL USANDO UNA RED PLC DE MEDIA TENSIÓN	46
FIGURA 2.13. CONEXIÓN AL CORE MEDIANTE PLC	48
FIGURA 2.14. RED HÍBRIDA PLC-WIFI	49
FIGURA 3.1. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA UNA LÍNEA ELÉCTRICA QUE ALIMENTA ALGÚN CIRCUITO EN UN ÁREA INDOOR	52
FIGURA 3.2. PROPAGACIÓN DE SEÑAL MULTIRUTA	53
FIGURA 3.3. CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉCTRICO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	55
FIGURA 3.4. PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL SOBRE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	57
FIGURA 3.5. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CABLE PARA LÍNEA ELÉCTRICA TÍPICA DE 2, 3 Y 4 CONDUCTORES.....	58
FIGURA 3.6. CLASIFICACIÓN DE RUIDO EN AMBIENTES POWERLINE	61
FIGURA 3.7. AMBIENTE DE RUIDO ADITIVO EN LÍNEAS POWERLINE	63
FIGURA 3.8. MEDIDAS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL DEL RUIDO DE TRANSFONDO.....	64
FIGURA 3.9. MODELO DE DENSIDAD ESPECTRAL PARA EL RUIDO PARA EL RUIDO DE TRANSFONDO GENERAL	64
FIGURA 3.10. SEÑAL EN EL DOMINIO DEL TIEMPO DE DOS EVENTOS IMPULSIVOS	65
FIGURA 3.11. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE TRES CANALES PLC (ESPECTRO DE AMPLITUD Y ÁNGULO DE FASE).....	69
FIGURA 3.12. SUMINISTRO DE POTENCIA DE UN APARTAMENTO O CASA.....	69
FIGURA 3.13. VARIACIÓN DEL ESPECTRO DE AMPLITUD DE UNA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CANAL CON RESPECTO AL TIEMPO (8 HORAS)	70
FIGURA 3.14. MEDIDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE UN TALADRO ELÉCTRICO (A) Y MEDIDA DE LA DENSIDAD DE POTENCIA ESPECTRAL DE RUIDO DE UN CANAL PLC CON UN TALADRO ELÉCTRICO (2) Y SIN ÉL (1).....	71
FIGURA 3.15. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVAS DE CAPACIDAD DE CANALES PLC. CATEGORÍA BUENA 61 CANALES, PROMEDIO 259 CANALES Y POR DEBAJO DEL PROMEDIO 110 CANALES	72
FIGURA 3.16. COMPARACIÓN DE CAPACIDADES DE CANAL DE UN AMBIENTE EN UN APARTAMENTO (142 CANALES) Y UN AMBIENTE DE OFICINA (166 CANALES).....	72
FIGURA 3.17. VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE UN CANAL PLC EN EL TIEMPO.....	73
FIGURA 3.18. ESQUEMA CDF DE LAS TASAS DE BIT ALCANZABLES PARA MODULACIÓN ADAPTATIVA.	74
FIGURA 3.19. ESQUEMA CDF DE LAS TASAS DE BIT ALCANZABLES.....	75
FIGURA 3.20. MODELO BÁSICO DE UN PROBLEMA ELECTROMAGNÉTICO	77
FIGURA 3.21. EMI EN MODO DIFERENCIAL	79
FIGURA 3.22. EMI EN MODO COMÚN	80

FIGURA 3.23. EJEMPLO DE UNA BUENA CONEXIÓN DE DIFERENTES CIRCUITOS A UNA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN	80
FIGURA 3.24. EJEMPLO DE ACOPLAMIENTO CAPACITIVO	81
FIGURA 3.25. EJEMPLO DE DIAFONÍA INDUCTIVA	82
FIGURA 3.26. EJEMPLO DE ACOPLAMIENTO RADIADO	83
FIGURA 3.27. PERTURBACIONES DE ACUERDO AL RANGO DE FRECUENCIA	86
FIGURA 3.28. SISTEMA PLC USANDO REDES AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN	87
FIGURA 3.29. MODELO ELECTROMAGNÉTICO DE UN SISTEMA PLC	87
FIGURA 3.30. COMPORTAMIENTO DE LAS PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS GUIADAS Y RADIADAS	89
FIGURA 3.31. SISTEMA BALANCEADO HORIZONTALMENTE USANDO CONDUCCIÓN DIFERENCIAL	90
FIGURA 3.32. GANANCIAS DE CONFIGURACIONES DE LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN PARA EVITAR EFECTOS DE RADIACIÓN	91
FIGURA 3.33. GRUPOS DE TRABAJO EN COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA DE LA IEC.....	93
FIGURA 4.1. SUPERPOSICIÓN DE SUBPORTADORAS ORTOGONALES.....	98
FIGURA 4.2. DIAGRAMA EN BLOQUES DEL SISTEMA (A) TRANSMISOR B) RECEPTOR	100
FIGURA 4.3. DIAGRAMA EN BLOQUES DE UN MODULADOR OFDM	101
FIGURA 4.4. DIAGRAMA EN BLOQUES GMSK	102
FIGURA 4.5. RED DE PRUEBA, MEDIDAS Y SIMULACIÓN CON N=4 RUTAS: A) RESPUESTA EN AMPLITUD, B) DETALLES DE LA FASE, C) RESPUESTA IMPULSO	105
FIGURA 4.6. ESPECTRO CANAL PLC DEL MODELO SIMULADO.....	106
FIGURA 4.7. DIAGRAMA EN BLOQUES DE DEMODULADOR OFDM.....	106
FIGURA 4.8. DIAGRAMA EN BLOQUES DE DEMODULADOR GMSK.....	107
FIGURA 4.9. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO DEL CANAL PLC USADO EN SIMULACIÓN, Y LA UBICACIÓN ESPECTRAL DE LOS CANALES USADOS.....	108
FIGURA 4.10. VALIDACIÓN DEL MODELO SIMULADO (A) GMSK (B) OFDM.....	110
FIGURA 4.11. VALIDACIÓN DEL MODELO SIMULADO EN ESCALA LOGARÍTMICA (A) GMSK (B) OFDM.....	111
FIGURA 4.12. BER VS. SNR PARA GMSK Y OFDM (A) SIN CODIFICACIÓN (B) COD. CONVOLUCIONAL (C) COD. REED SOLOMON.....	112
FIGURA 5.1. ESTRUCTURA GENERAL DE UNA RED DE ACCESO PLC.....	115
FIGURA 5.2. JERARQUÍA DE LAS REDES ELÉCTRICAS.....	116
FIGURA 5.3. ESTRUCTURA DE LA RED DE BAJO VOLTAJE TIPO C.....	117
FIGURA 5.4. MODELO EN ÁRBOL DE LA RED DE BAJO VOLTAJE	118
FIGURA 5.5. EJEMPLO DE UN SITIO PLC	119
FIGURA 5.6. CONDICIÓN DE VISIBILIDAD DEL BSP.....	123
FIGURA 5.7. COMPARATIVA DE COSTOS VERSUS VELOCIDAD DE ACCESO DE LAS TECNOLOGÍAS BANDA ANCHA FRENTE A LAS TRADICIONALES (RED TELEFÓNICA CONMUTADA (RTC),RED DIGITAL DE SERVICIOS INTEGRADOS (RDSI), GSM)	132

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. RANGO DE FRECUENCIAS Y SU ÁREA DE APLICACIÓN	21
TABLA 3.1. PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS DE ACUERDO A IEC TC 77	86
TABLA 3.2. POSIBLES VÍCTIMAS ELECTROMAGNÉTICAS PARA PLC Y SUS BANDAS DE OCUPACIÓN	92
TABLA 3.3 LÍMITES DE CAMPO ELÉCTRICO PERMITIDO POR NB 30 PARA PLC Y OTROS SISTEMAS BAJO HILO	96
TABLA 3.4. LÍMITES PARA PERTURBACIONES CONDUCCIONADAS EN PUERTOS PARA LÍNEA ELÉCTRICA.....	97
TABLA 3.5. LÍMITES PARA PERTURBACIONES CONDUCCIONADAS EN MODO COMÚN PARA PUERTOS DE EQUIPOS TELECOMUNICACIONES.....	97
TABLA 4.1 ESQUEMA DE MAPEO QPSK UTILIZADO EN EL MODULADOR OFDM.....	101
TABLA 4.2 ESTRUCTURA PARA INSERCIÓN SÍMBOLOS PILOTO OFDM	101
TABLA 4.3. PARÁMETROS DEL MODELO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CANAL PLC	104
TABLA 4.4. PARÁMETROS DEL MODELO DE 4 RUTAS	105
TABLA 4.5. PARÁMETROS DEL MODELO SIMULADO	109
TABLA 5.1. DISTRIBUCIÓN USUARIOS PARA PLC.....	126
TABLA 5.2. COSTO EQUIPOS PLC	127
TABLA 5.3. DISTRIBUCIÓN USUARIOS PARA ETHERNET.....	128
TABLA 5. 4. COSTO EQUIPOS ETHERNET	129
TABLA 5. 5. PAQUETES COMERCIALES ADSL Y CABLE EN ESPAÑA.....	130
TABLA 5. 6. PAQUETES COMERCIALES PLC EN ESPAÑA.	131
TABLA 6.1. VELOCIDADES REQUERIDAS POR DIFERENTES CODECS.....	135
TABLA 6.2. REQUERIMIENTOS DE QOS Y BW PARA SERVICIOS SOBRE PLC	136

ÍNDICE DE ANEXOS

1. CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC – MEDIUM ACCES CONTROL) PARA SISTEMAS POWERLINE.....	6
2. MECANISMOS FEC PARA CORRECCIÓN DE ERRORES	23
3. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE MODEMS OFDM Y GMSK PARA EL CANAL ELECTRICO	40
4. POSIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN HARDWARE MEDIANTE FPGA ´S	106
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

INTRODUCCIÓN

La enorme aceptación que en los últimos años ha mostrado el acceso a Internet, ha disparado el número y tipo de servicios ofrecidos por las diferentes empresas de telecomunicaciones a nivel mundial. La mayoría de estos servicios hacen uso del Protocolo Internet (*IP - Internet Protocol*) como protocolo de red, demandando anchos de banda que hasta hace sólo algunos años eran inalcanzables por el usuario. Lo anterior permite explicar el éxito que tecnologías como ADSL (*Asymmetrical Digital Subscriber Line*) han obtenido y están obteniendo hasta el momento. No obstante este tipo de soluciones están ligadas a la tenencia del bucle de abonado, actualmente en manos del operador dominante o del monopolio de antiguas empresas de telecomunicaciones.

Los nuevos operadores de red tratan de realizar sus propias redes de acceso para los suscriptores, y así no depender del alquiler a otras empresas monopolistas. Para este fin se plantean tres soluciones que permiten la expansión de las redes de acceso. Una de ellas es la construcción de nuevas redes de acceso, pero esta solución es costosa y necesita de un largo período para su implantación. La segunda solución es el uso de la infraestructura existente (Por ejemplo: xDSL¹ (*x Digital Subscriber Line*) o Televisión por cable (*CATV - Cable Television*)), que en la mayoría de los casos está en propiedad de monopolistas. La última opción permite a cada usuario tener acceso a servicios y recursos de la Internet desde sus hogares usando la red de distribución de suministro eléctrico mediante la tecnología de Comunicación por la Línea Eléctrica denominada *PLC (Power Line Communication)*, convirtiéndose en una alternativa más atractiva.

La utilización del cableado eléctrico como soporte físico para la transmisión de información, además de energía, no es una idea nueva en especial para las compañías eléctricas. Hasta hace relativamente poco tiempo el uso de PLC se había limitado a la monitorización y control de las líneas eléctricas y la transmisión de las lecturas de los contadores, es decir aplicaciones que no requerían un gran ancho de banda para su correcto funcionamiento. Durante finales de los años noventa los avances tecnológicos realizados permitieron alcanzar velocidades de transmisión del orden de los Megabits, razón por la cual se planteó la posibilidad

¹ Conjunto de estándares en el bucle de abonado sobre hilo de cobre, la x hace referencia a cualquiera de las variaciones DSL: V,R,H, etc.

de utilizar la red eléctrica como solución de acceso. Además, los diversos avances en cuanto a la capacidad de integración de funciones sobre silicio, facilitaron la solución de cálculos complejos y la implementación de modulaciones que requerían un alto soporte hardware.

En la actualidad, las principales compañías líderes en el desarrollo de tecnología PLC han fabricado chips capaces de alcanzar velocidades hasta 200 Mbps (*Mega bits per second*) sobre líneas de Baja y Media Tensión, rivalizando así con las redes metropolitanas y de acceso. A la vez permite a los operadores de telecomunicaciones extender su oferta de servicios finales incluyendo servicios de voz, video y datos.

Con las velocidades actualmente alcanzadas, PLC puede competir en el segmento de acceso con ventaja tanto en costos como en ancho de banda y contribuir a una verdadera liberación del bucle de abonado.

El despliegue sin necesidad de obra civil sobre las actuales líneas de distribución eléctrica que cubren alrededor del 90 % de la población, convierte a PLC en una alternativa muy competitiva en costo y prestaciones frente a las actuales soluciones banda ancha.

A pesar que PLC es una tecnología prometedora, la transmisión de información sobre la línea eléctrica produce efectos de radiación electromagnética que ha impedido la implantación oportuna de la tecnología como solución de acceso, pues opera sobre el rango de Alta Frecuencia (HF^2 - *High Frequency*) causando perturbación a diversos servicios ya establecidos sobre esta banda. Para evitar interferencias, los sistemas PLC deben reducir su potencia de operación, afectando en parte la capacidad de la transmisión sobre el tendido eléctrico, haciéndolos más sensibles a las perturbaciones del ambiente. Para contrarrestar los problemas de radiación de los sistemas PLC, las empresas líderes en fabricación de los equipos han contribuido al estudio de modulaciones como: Multiplexación por división de Frecuencias Ortogonales (*OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y Desplazamiento de Frecuencia Mínimo Gaussiano (*GMSK - Gaussian Minimum Shift keying*) que permiten garantizar capacidades más altas con el uso adicional de mecanismos correctores de errores, asegurando la posibilidad de realización de un amplio abanico de servicios en las redes PLC.

² HF: Banda de frecuencia de 3 a 30 Mhz utilizada ampliamente para difusión de bandas de radio aficionados.

Aunque en muchos países de Europa, Estados Unidos y Japón se han realizado pruebas y se han implantado redes con base a esta tecnología, no existe un estándar definido que permita asegurar la operación de la tecnología. No obstante, existen diversas organizaciones interesadas en el crecimiento de la tecnología, como es el caso del Instituto Europeo de Estándares en Telecomunicaciones (*ETSI - European Telecommunication Standards Institute*) o el PLCforum que trabajan por la especificación de los valores de operación límites de PLC.

El desarrollo de esta monografía permitirá establecer un análisis sobre la implantación y la operación de la tecnología PLC en el área de acceso, teniendo en cuenta la estructura de la red de distribución eléctrica. Adicionalmente se analizarán las diferentes topologías utilizadas por los sistemas PLC con soluciones que permiten conectividad a la Red de Área Extensa (*WAN - Wide Area Network*) mediante tecnologías como fibra óptica y el uso de sistemas inalámbricos. Otro factor importante será el estudio de las interferencias causadas por la operación de los sistemas PLC a otros sistemas de telecomunicaciones que operan en el rango de frecuencias utilizado por los sistemas de comunicación por línea eléctrica y el comportamiento del canal de transmisión y sus efectos de ruido. Seguidamente se analizarán las principales modulaciones utilizadas por la tecnología en especial las utilizadas por algunas empresas líderes en fabricación de sistemas PLC. Finalmente se establecerán las características de los servicios que pueden ser soportados por la tecnología y se presentará un análisis de costo sobre la implantación de una red genérica. La estructura de la monografía puede resumirse en:

Capítulo 1: Generalidades de las soluciones de acceso. Describe la importancia de las redes de acceso en una red de telecomunicaciones, enunciando las principales características de las redes de acceso convencionales y las técnicas de construcción de nuevas redes de acceso. También se analizan los aspectos básicos de la tecnología PLC como solución de acceso mostrando sus orígenes y la estructura eléctrica utilizada.

Capítulo 2: Tecnología de acceso PLC. Se presentan las diferentes topologías de la estructura PLC, como también los elementos esenciales de la red en el área de acceso y la conexión al backbone de la red (Internet).

Capítulo 3: Características del canal de transmisión PLC. En este capítulo se describe el modelo y las características del canal, el ruido, la capacidad y las consideraciones electromagnéticas de los sistemas PLC que causan interferencia a otros sistemas de telecomunicaciones, como también los estándares y organismos que controlan las interferencias.

Capítulo 4: Esquemas de modulación empleados por los principales proveedores de equipos PLC. Se presentan dos de las modulaciones utilizadas para los equipos PLC, como son la modulación OFDM y GMSK con su diagrama de operación.

Capítulo 5: Diseño de una red genérica y sus costos de implantación. Como la principal ventaja de PLC es la reducción de costos, se analiza la función de costos a partir de un modelo genérico de red.

Capítulo 6: Servicios demandados sobre una red PLC. En este capítulo se presentan los posibles servicios que pueden ser implementados en redes PLC y sus características de operación.

Capítulo 7: Conclusiones y Trabajos Futuros.

1. GENERALIDAD DE LAS SOLUCIONES DE ACCESO

1.1 Importancia del Área de Acceso en un sistema de telecomunicaciones

En un sistema de telecomunicaciones, las soluciones de última milla se convierten en un factor relevante para la prestación de servicios a los usuarios finales, de modo tal que los proveedores puedan atraer a sus clientes potenciales ofreciendo un abanico de servicios de calidad, que logre satisfacer las necesidades del cliente. Estas soluciones de última milla implican la inversión en planificación y elaboración de redes de acceso de gran importancia para los proveedores por sus altos costos y por la posibilidad de realizar accesos directos a usuarios finales. La inversión requerida en soluciones de acceso asciende al 50 % de la implementación total de la infraestructura de una red de telecomunicaciones [1]. Sin embargo el número de usuarios individuales conectados a una red de acceso es limitado, comparado con los usuarios conectados a una red de transporte. Por consiguiente, la rentabilidad económica de las redes de acceso es significativamente más baja que las redes WAN.

En el caso de los llamados grandes clientes (clientes comerciales, gubernamentales o industriales), las redes de acceso conectan un número más alto de suscriptores que se concentran dentro de un edificio o una región pequeña (Por ejemplo: Campus). Los grandes clientes normalmente hacen uso de un número variado de servicios de telecomunicaciones y por lo tanto requieren la implementación de un tipo particular de solución de acceso que satisfaga los tipos de servicios requeridos, aumentando los costos para los proveedores de servicios.

Por otro lado, los suscriptores individuales (Por ejemplo: usuarios privados) demandan pocos servicios de telecomunicaciones, es decir que la elaboración de redes de acceso para usuarios individuales también es económicamente menos eficiente. A pesar de esto, el acceso directo a los suscriptores aumenta las oportunidades para que los proveedores de red ofrezcan un número más alto de servicios variados, atrayendo a los clientes individuales a suscribirse a un proveedor particular, y así aumentar el uso de sus redes. De esta manera, el acceso a los suscriptores individuales se convierte en un factor importante para inversión en redes de acceso. (Figura 1.1).

A pesar que en muchos países el acceso a los usuarios finales continúa en poder de las empresas monopolistas, se ha buscado la manera de ofrecer redes de acceso

propias y evitar el alquiler de otras redes. Además, los nuevos servicios de telecomunicaciones demandan una mayor capacidad de transmisión tanto en las redes de transporte como de acceso, de manera que existe una permanente necesidad de ampliación de la infraestructura de acceso.

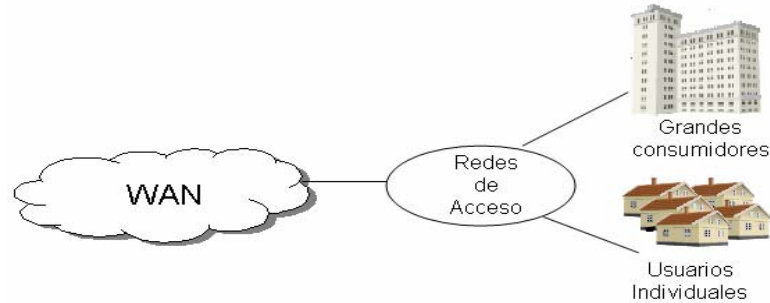


Figura 1.1. Estructura general de las redes de telecomunicaciones

Existen dos posibilidades para la expansión de las redes de acceso [1]:

- Construcción de nuevas redes.
- Uso de infraestructura existente.

Con lo enunciado anteriormente, la mejor manera de implementar una tecnología moderna de telecomunicaciones es invertir en la construcción de nuevas redes de acceso, que permita proveer servicios más atractivos. Esto trae consigo, el aumento de los costos de implantación; razón por la cual muchos proveedores de servicios prefieren el uso de la infraestructura existente, de modo tal que los costos de implantación del servicio sean más bajos. Sin embargo la renovación de la infraestructura existente permitirá ofrecer servicios de telecomunicaciones de mejor calidad y más llamativos para los usuarios finales.

1.2 Técnicas para la construcción de nuevas Redes de Acceso.

La construcción de las redes de acceso puede ser realizada con las siguientes técnicas [2]:

- Utilización de redes cableadas o redes ópticas.
- Sistemas de acceso inalámbrico.
- Sistemas satelitales

La utilización de las redes ópticas en la actualidad ofrece la capacidad de manejar altas velocidades en comparación con otros sistemas de telecomunicaciones, de

esta manera el uso de sistemas ópticos en soluciones de redes de transporte (WAN), permite la reducción significativa de sus costos de operación e implantación. Análogamente, el uso de sistemas ópticos en redes de acceso, favorece la capacidad de transmisión eficiente para la prestación de novedosos servicios. Sin embargo resulta un tanto costoso implementar redes ópticas o redes cableadas como soluciones de acceso debido a las grandes distancias entre el núcleo de la red y los usuarios finales, a gastos de implementación en redes urbanas, y a problemas legales o costos adicionales de infraestructura y obra civil. Para evitar la implantación de redes sobre cable o sistemas ópticos, actualmente se viene haciendo uso de sistemas inalámbricos, en los cuales se puede distinguir dos clases [3]:

- Sistemas móviles inalámbricos.
- Sistemas inalámbricos mixtos.

Algunos sistemas móviles inalámbricos son: Telecomunicaciones Digitales Mejoradas Inalámbricas (*DECT - Digital Enhanced Cordless Telecommunications*), Sistema Global para Comunicaciones Móviles / Servicio General de Radio Empaquetado (*GSM/GPRS³ - Global System for Mobile-Communications / General Packet Radio Service*) y Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (*UMTS - Universal Mobile Telecommunications System*). Estas redes móviles proveen un gran número de celdas para cubrir un área de comunicación extensa, garantizando una conexión permanente para usuarios móviles en el área de cobertura (red celular, Figura 1.2). Para que estas redes puedan operar, se asigna un rango de frecuencia para cada celda, permitiendo la comunicación entre Terminales Móviles (*MTs - Mobile Terminals*) y Estaciones Base (*BSs - Base Stations*). Para evitar interferencias entre celdas vecinas se hace uso de frecuencias diferentes o códigos para UMTS permitiendo alcanzar velocidades por encima de los 2 Mbps. Las BSs son las encargadas de controlar la comunicación entre los MTs.

³ GSM/GPRS: Servicio estándar mejorado para GSM.

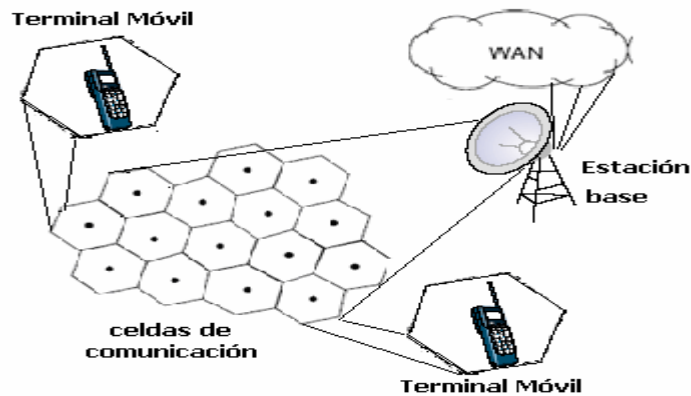


Figura 1.2. Estructura de redes móviles inalámbricas [4]

Los sistemas inalámbricos fijos conocidos también como WLL (*Wireless Local Loop*) son más adecuados para aplicaciones en el área de acceso y además proveen estaciones base que conectan un número de usuarios situados en áreas relativamente pequeñas (Figura 1.3) [3]. Opuesto a los sistemas inalámbricos móviles, los usuarios WLL hacen uso de antenas ubicadas en postes altos, en edificios o en casas. De esta manera, los sistemas WLL proporcionan caminos de propagación constante entre la estación base y los usuarios, obteniendo un mejor comportamiento de Relación Señal a Ruido (*SNR -Signal Noise Ratio*) que los sistemas móviles. Las velocidades alcanzadas son más altas que los sistemas móviles, por encima de 10 Mbps en el tramo downlink (de la estación base al usuario) y por encima de 256 Kbps (*Kilo bits per second - Kilo bits por segundo*) en uplink (del usuario a la estación base). Sin embargo, las velocidades alcanzadas en diferentes sistemas WLL siguen aumentando.

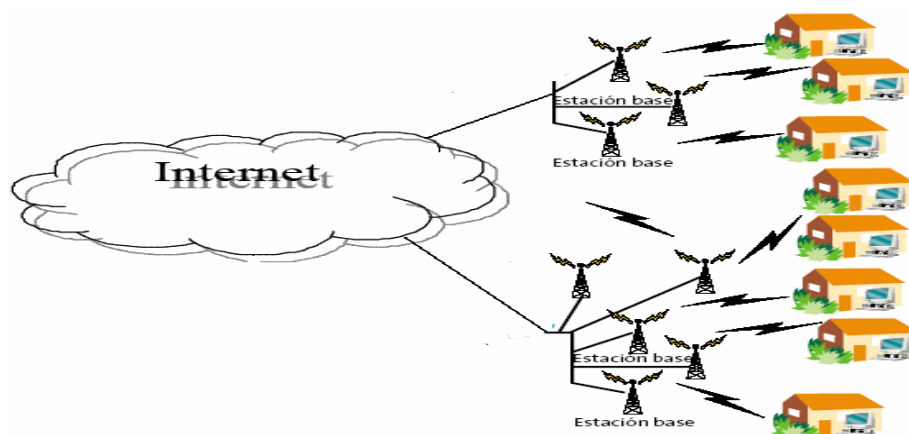


Figura 1.3. Estructura de una red inalámbrica

Los sistemas WLL están equipados con una antena que permite establecer conexiones entre la estación base y la estación receptora. Una estación cliente

generalmente puede tener como área de cobertura una casa o edificio, con un número limitado de usuarios conectados. La conexión entre una estación cliente y sus usuarios puede ser realizada mediante el uso de una infraestructura de comunicación alámbrica o mediante una red inalámbrica casera.

Hoy en día, las redes inalámbricas caseras se realizan mediante Redes de Área Local Inalámbrica (*WLANs - Wireless Local Area Networks*). Una WLAN opera usualmente entre edificios y cubre un área relativamente pequeña, asegurando velocidades de hasta 200 Mbps. Los sistemas WLAN se usan para cubrir ubicaciones dentro de locales comerciales o casas, utilizando una o más antenas y permitiendo el uso de diferentes dispositivos de comunicación en el área de cobertura, sin usar conexiones alámbricas.

La tercera posibilidad para la realización de las redes de acceso son los sistemas satelitales, que son hoy en día los más usados para comunicaciones de larga distancia a nivel mundial. Los satélites de Órbita Baja (*LEO - Low Earth Orbit*) y de Órbita Media (*MEO - Medium Earth Orbit*) fueron desarrollados para su aplicación en el área de acceso de las comunicaciones [4].

Además sistemas satelitales tales como el sistema Iridium permiten extender los sistemas celulares existentes (es decir que las estaciones bases son reemplazadas por satélites). Sin embargo, los sistemas de acceso satelital actualmente no son económicos, por esta razón se han cancelado proyectos satelitales como Iridium [4].

1.3 Uso de la infraestructura existente en el área de acceso

Con el uso de la infraestructura existente se puede evitar la construcción de nuevas redes de acceso que pueden llegar a ser costosas. Dentro de las redes alambreadas que se utilizan para conectar a los usuarios a las redes de transporte se tienen [2]:

- Redes telefónicas clásicas (métodos de transmisión xDSL).
- Redes de TV por cable (CATV).
- Redes eléctricas.

En la actualidad, las redes telefónicas clásicas están compuestas por sistemas DSL (*Digital Subscriber Line*) que permiten altas velocidades en el área de acceso. ADSL es una variante de la tecnología DSL, mas aplicada en las redes de acceso [4].

La técnica ADSL puede superar los 8 Mbps en el enlace downlink y los 60 Kbps en el enlace uplink en condiciones optimas (longitud, características de las líneas de transmisión, etc.).

Los usuarios que usan los sistemas de acceso DSL necesitan de un equipo apropiado (módems ADSL) para conectarse a un nodo de la central de conmutación a través de una red en estrella, que permite a cada usuario ADSL usar altas velocidades. Los nodos de la central de conmutación están generalmente conectados a la red de transporte (WAN) mediante tecnologías ópticas de alta velocidad.

El servicio de telecomunicaciones que más usa la tecnología DSL es el acceso a Internet por banda ancha. Sin embargo, es posible proveer servicio clásico de telefonía y transmisión de señales de video mediante DSL (Por ejemplo: Televisión (TV - TeleVision) por demanda y por difusión, video interactivo, etc.). El nodo central actúa como un concentrador que se conoce como Multiplexor de Acceso DSL (DSLAM), conectando un usuario final DSL al backbone⁴ de la red de comunicaciones. Sin embargo, en algunos casos existe la necesidad de reconstruir parcialmente las líneas de los usuarios, si las características de la red física no cumplen los requerimientos para la realización del acceso DSL. La velocidad máxima en los sistemas DSL depende de la longitud de las líneas de los usuarios y sus características de transmisión [5].

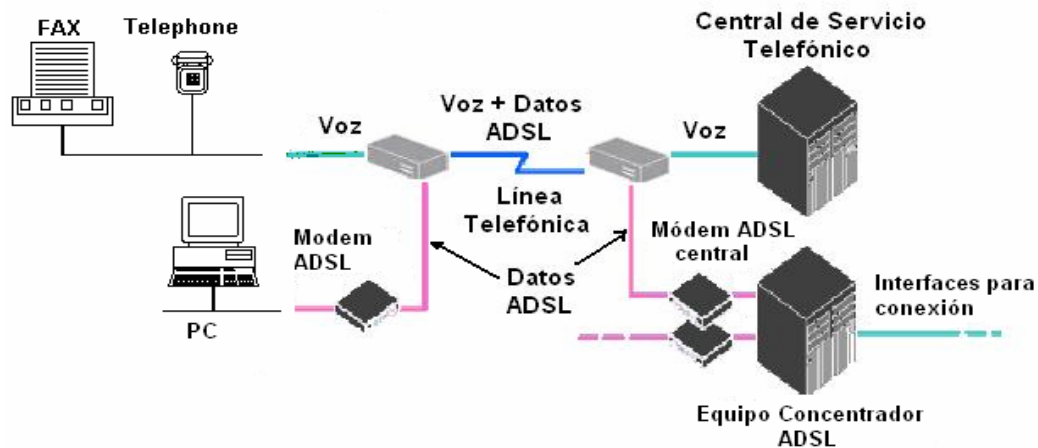


Figura 1.4. Estructura de una red de acceso DSL

Las redes de TV por cable no sólo se diseñaron para difusión de programas de TV a los hogares, sino también para la implementación de otros servicios de

⁴ Backbone: Es la red principal, la red núcleo de cualquier Red de Telecomunicaciones.

comunicaciones. Además las velocidades alcanzadas por el cableado utilizado, permite la transmisión de múltiples canales con buena calidad. Por lo tanto pueden ser consideradas como alternativas de solución de redes de acceso. Las velocidades alcanzadas están por encima de 50 Mbps en el enlace downlink y 5 Mbps en el enlace uplink [5]. Sin embargo, en promedio hay alrededor de 600 usuarios conectados a la red de acceso de televisión por cable, que comparten la capacidad del medio de transmisión. (Figura 1.5).

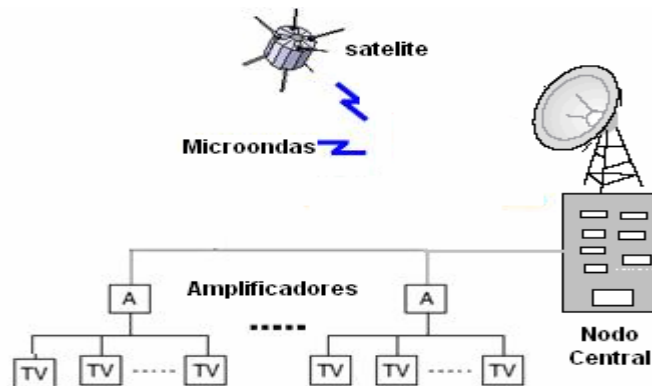


Figura 1.5. Estructura de una red de acceso de televisión por cable

Los usuarios de la red de acceso de televisión por cable están conectados a un nodo central, similar a las redes de acceso DSL. La red de cable original solo suministra servicios de difusión de TV unidireccional. Para usar dicha infraestructura, e integrarle datos es necesario modificar algunos elementos de la red, y adicionar un equipo en las premisas del usuario: el cable modem. Los cable módems, se necesitan tanto en el extremo de usuario como en el nodo central. Sin embargo, en las redes existen amplificadores que operan solamente en el enlace downlink, ya que el propósito original de las redes de televisión por cable es transmitir señales de TV desde una antena central a los usuarios. No obstante, estos amplificadores deben ser modificados para que puedan operar en ambas direcciones y permitan la transmisión de datos bidireccionales, necesarios para la realización de redes de acceso.

Estos servicios generalmente hacen uso del cableado estructurado utilizado en las redes telefónicas que comúnmente pertenecen a compañías monopolistas; es decir que existe una gran desventaja para que los nuevos proveedores de red puedan usarlas para ofrecer servicios como ADSL. El mismo caso ocurre en las redes de televisión por cable, en la cual se necesita modificar algunos componentes para que sea una red bidireccional, involucrando costos.

De acuerdo a estas razones, el uso de los sistemas de comunicación por red eléctrica se convierte en una solución razonable y una eficiente alternativa económica. Para lograr su implantación, la tecnología PLC deberá ser capaz de ofrecer un abanico de diversos servicios de telecomunicaciones con un grado de calidad adecuado para que sea capaz de competir con otras tecnologías de acceso.

1.4 Acceso mediante Power Line Communication (PLC)

1.4.1 Orígenes de PLC

La idea de utilizar el cable eléctrico como medio de transmisión de datos no es nueva, aunque inicialmente su uso se limitaba a la monitorización y control de líneas eléctricas y a la transmisión de datos a baja velocidad de las medidas procedentes de las lecturas de los contadores.

Posteriormente las compañías eléctricas empezaron a utilizar sus propias redes eléctricas para la transmisión interna de datos, hasta llegar a una serie de pruebas realizadas durante los años 90 en distintos países europeos que no alcanzaron los resultados esperados [6]. Sin embargo, desde que los avances tecnológicos hacia el final de la pasada década permitieron alcanzar velocidades de transmisión del orden de los Mbps, se empezó a considerar la tecnología PLC como solución de acceso alternativa a las redes de telecomunicaciones tradicionales.

A partir de entonces el mundo PLC centra su atención en el tramo de baja tensión de la red eléctrica (el equivalente a la "última milla" o bucle de abonado en las redes telefónicas) por un motivo claro: las redes de acceso son el componente más costoso de las redes de telecomunicaciones, estimándose que tanto las inversiones como los gastos operativos en red de acceso suponen más del 50% de los totales asociados a la red. Por consiguiente, la transformación de las redes eléctricas de baja tensión en redes de acceso para prestar servicios de telecomunicaciones, abre nuevas oportunidades de negocio y permite el despliegue, sin necesidad de obra civil, de las actuales líneas de distribución eléctrica (con una cobertura de la población superior al 90 %) convirtiendo a PLC en una alternativa muy competitiva en costos y prestaciones frente a las actuales soluciones de banda ancha.

1.4.2 Perspectivas de desarrollo

Los factores que propiciarán el despegue definitivo de la tecnología PLC son los siguientes [7]:

- Disponibilidad de una altísima capacidad de integración de funciones en silicio con los avances en las técnicas de Muy Alta Escala de Integración (*VLSI - Very Large Scale Integration*). Desde mediados de los ochenta se empezaron a popularizar las técnicas submicrónicas de fabricación de chips, que puso a disposición de los diseñadores enormes posibilidades de integración de funciones. Tareas que debían hacerse anteriormente mediante software, tienen ahora la posibilidad de ser integradas en silicio rápidamente, mejorando la velocidad de ejecución.
- La utilización de técnicas de modulación OFDM en banda ancha. La elevada cantidad y la elevada complejidad de los cálculos matemáticos necesarios para este tipo de modulación son ahora posibles por la integración de funciones complejas mediante el uso del silicio. Además la utilización de OFDM como tecnología de modulación proporciona una mejor adaptación de la señal a las condiciones del medio y una mayor robustez frente a fuentes externas de interferencia que pudieran influir sobre la señal utilizada.
- Estandarización de los protocolos de comunicación en torno al modelo de Sistema de Interconexión Abierto (*OSI - Open System Interconnection* -), con la pila de Protocolo de Control de Transmisión / Protocolo de Internet (*TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) y 802.3 (Ethernet⁵) como estándares “de facto” e independiente del medio físico sobre el que se realice la transmisión. Únicamente está determinado por el medio físico, es decir por el Control de Acceso al Medio o capa MAC (*Medium Access Control*). Por encima de la capa MAC, ya no existen protocolos propietarios de fabricantes que tantos recelos despertaba en las empresas que compraban tecnología. Esta estandarización, que ha sido llevada a cabo desde principio de la década de los noventa, ha estado conducida por el motor imparable de la expansión de Internet.

⁵ Ethernet: red de área local en la cual es posible conectar dispositivos de adquisición de datos.

- El soporte de la Unión Europea y de la administración de EEUU⁶. En Abril de 2005, la Unión Europea publicó en su Boletín Oficial, una Recomendación de la Comunidad sobre comunicaciones electrónicas de banda ancha en redes eléctricas, que animaba a todos los miembros de la industria PLC, a unir esfuerzos para que dicha tecnología se convierta en una alternativa real a las tecnologías de banda ancha actuales [8]. Por su parte, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC - *Federal Communications Commissions*), el órgano regulador de los EEUU, realizó un anuncio oficial el 13 de Febrero de 2004, en el que manifestaba su apoyo a los despliegues de la tecnología PLC (que en EEUU se conoce como BPL (*Broad band Power Line* - Banda ancha a través de la red eléctrica)).
- Como resultado de la mencionada expansión de Internet, la proliferación de nuevos servicios sobre IP, como Voz sobre IP (*VoIP - Voice over IP*), Video bajo demanda (*VoD - Video on Demmand*) y Difusión de Señal de TV sobre IP, pueden considerarse como una realidad, abriendo un amplio abanico de oportunidades para la generación de nuevos ingresos.

El resultado de la confluencia de estos factores ha determinado que la tecnología PLC haya adquirido una creciente madurez y pueda ser considerada como una de las posibilidades de mayor proyección en las técnicas de Banda Ancha. Esto, unido a la mayor ubicuidad de las redes eléctricas y al hecho de que ya se encuentran desplegadas, hacen de PLC una alternativa real al actual bucle de abonado, además de una alternativa real para las redes de distribución y transporte como medio de comunicación, por los avances realizados por la tecnología PLC en Media Tensión (10 - 50 Kilovoltios).

Prueba de la madurez y posibilidades de PLC es el interés que en él ha demostrado la industria, y la creación de grupos de trabajo y foros que como el PLCforum apoyan y fomentan el desarrollo y la normalización de esta tecnología.

⁶ EEUU (Estados Unidos): Dado que ambas palabras están en plural entonces ambas iniciales se ponen dobles: EEUU. Es una regla gramatical del español.

1.4.3 Estándares y Grupos de Apoyo PLC

Las comunicaciones a través de las redes eléctricas se especifican en el estándar Europeo CENELEC EN 50065, que ofrece un espectro de frecuencia de 9 a 140 KHz (*Kilo Hertz* - Abreviación de Kilo Hertz) para comunicaciones por la red eléctrica (Figura 1.6 y Tabla 1.1) [9]. La norma del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC - *Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*) difiere significativamente de los estándares americano y japonés, que especifican un rango de frecuencia sobre 500 KHz para aplicaciones de servicios PLC.

La norma CENELEC hace posibles velocidades de datos hasta varios miles de bits por segundo, que se utilizan generalmente para funciones de medición (gestión de carga en una red eléctrica, lectura remota de contador, etc.), transmisión de datos con muy bajas velocidades y la obtención de unos cuantos canales de transmisión para conexiones de voz [1]. Sin embargo, para aplicaciones en redes de telecomunicaciones modernas, los sistemas PLC deben ofrecer velocidades de datos mucho más altas (más allá de 2 Mbps) para competir con otras tecnologías de telecomunicaciones especialmente en el área de acceso.

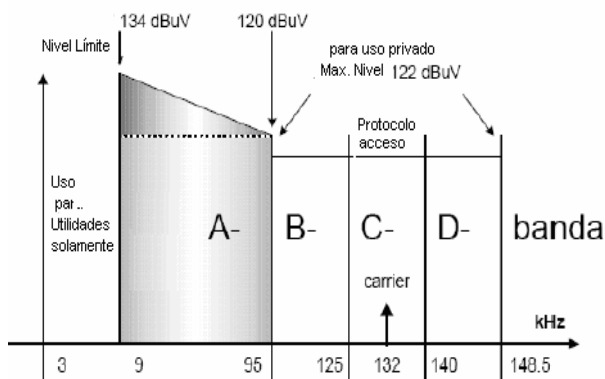


Figura 1.6. Rango de frecuencias y niveles límites para PLC Banda Angosta, según el estándar EN 50065 [9]

Banda	Rango de Frecuencia (Khz)	Uso
A	9-95	Utilidades empresas eléctricas
B	95-125	Casas y Edificios
C	125-140	Casas y Edificios
D	140-148.5	Uso Privado

Tabla 1.1. Rango de frecuencias y su área de aplicación

Para lograr velocidades más altas, los sistemas de transmisión PLC deben operar en un espectro de frecuencias más amplio (hasta 30 Mhz (*Mega Hertz* - Abreviación de Mega Hertz)). Sin embargo, no hay estándares PLC que especifiquen la operación de estos sistemas fuera de las bandas de frecuencia definidas por la norma CENELEC. Actualmente, existen varios organismos que intentan cubrir el campo para la estandarización de las redes PLC de banda ancha, como son: el PLCforum, la Asociación Powerline Universal (UPA - *Universal Powerline Association*), la Alianza de Conveniencia PLC (PUA - *PLC Utilities Alliance*), la Alianza para

Conexión en Casa (*HPA - Home Plug Alliance*) y la Alianza de Investigación Europea Abierta para PLC (*OPERA - Open PLC European Research Alliance*).

El PLCforum [10] es una organización internacional que representa los intereses de fabricantes, compañías eléctricas y desarrolladores implicados en la tecnología PLC. Su ámbito de trabajo es mayoritariamente europeo, y posiciona a PLC como una tecnología efectiva de acceso. Fue creado en Interlaken (Suiza) a principios del año 2000, por la unión del International PowerLine Telecommunications Forum y el German PowerLine Telecommunications Forum. Desde su creación, el número de miembros e invitados ha incrementado hasta sobrepasar los sesenta.

La UPA [11] es una asociación internacional sin ánimo de lucro que trabaja para consensuar estándares globales y normativas regulatorias para el mercado PLC. La UPA está formada por un grupo de compañías líderes en la tecnología PLC, unidas por el objetivo de desarrollar productos certificados que sean compatibles con las especificaciones acordadas para situarlos en el mercado en el menor tiempo posible, a la vez que se garanticen altas prestaciones y se maximice el uso del espectro de acceso con las aplicaciones para transmisión de señales audiovisuales y datos sobre PLC en el entorno residencial, de manera que salgan beneficiados todas las partes que forman la cadena de valor de la tecnología PLC.

La UPA incluye entre sus miembros a una representación muy destacada de las empresas más importantes a nivel mundial en la industria PLC como Ambient Corporation, Ascom, Corinex Communications, DS2, Itochu, Itevo, Sumitomo y Toyocom.

El objetivo PUA es conseguir un alto nivel de cooperación entre las compañías eléctricas para promover e influenciar el desarrollo de la industria PLC en Europa. La misión de la PUA es crear un marco regulatorio y de estandarización que soporte el desarrollo de la industria PLC y que establezca la tecnología PLC como una de las políticas prioritarias para el despliegue de Redes de Banda Ancha en la Unión Europea. Fue fundada en Enero de 2002 por Iberdrola, Enel, EDF, EnBW y Endesa a las que luego se añadieron EdP, Unión FENOSA y EEF-FEW.

La PUA está trabajando en base a tres Grupos de Trabajo [7]:

- El Grupo de Trabajo de Estandarización y Regularización, encargado del desarrollo de un marco regulatorio.

- El Grupo de Trabajo para el Conocimiento y la Promoción, encargado de promocionar la tecnología PLC en la Unión Europea y en América del Norte.
- El Grupo de Trabajo para Estándares Abiertos, encargado de desarrollar un estándar abierto para la interoperabilidad de los sistemas PLC de diversos fabricantes.

La HPA es una asociación de industrias relacionadas con PLC. Los miembros del grupo aportan la capacidad y financiación necesaria para el desarrollo de esta tecnología. En junio del 2001 liberó la especificación HomePlug V1.0 [12], que permite velocidades de hasta 14 Mbps y está orientada sobre todo al Home Networking y la domótica, permitiendo la conectividad de todo tipo de aparatos domésticos (incluyendo PCs).

Pese a la madurez tecnológica alcanzada por PLC, aún queda trabajo por hacer en el campo de la normalización. Hasta la fecha sólo se ha regulado sobre el uso del espectro de frecuencias y las especificaciones de Calidad de Servicio (QoS -*Quality of Service*) para los equipos terminales de usuarios (CPEs⁷ - *Customer Premise Equipment*).

Los estándares que regulan este uso son [7]:

- EN50065-1 del CENELEC, que establece el uso del espectro para Banda Angosta.
- TS 101 867 del ETSI que aplica para el uso de Banda Ancha. Es este último el que regula sobre la utilización de la red eléctrica para la transmisión digital de datos a altas velocidades (Figura 1.7).
- TR 102 049 del ETSI que establece las calidades de servicio que deben implementar los equipos PLC instalados en el domicilio de abonado (CPEs).

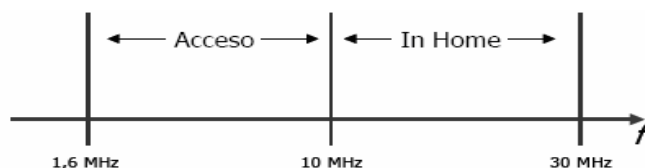


Figura 1.7. Distribución de Frecuencias ETSI TS 101 867 [7]

⁷ CPE: Equipo utilizado por los usuarios para transmisión de datos sobre línea eléctrica.

Sin embargo, tal como se ha mencionado anteriormente, organizaciones como la FCC apoyan desde hace bastante tiempo, el uso de PLC y la define como la opción de Banda Ancha más difundida en Estados Unidos. Además, también la Comisión Europea hizo pública una recomendación oficial animando a los diferentes actores de la industria PLC a unir esfuerzos para que la tecnología PLC sea un éxito [8].

La curva de evolución en costos y prestaciones de PLC, como ha ocurrido con la del resto de los equipos de red, se estima que continúe atendiendo a la evolución presente en los últimos años disminuyendo sus costos y aumentando las prestaciones en cuanto a la capacidad de operación.

En la actualidad la tecnología que consigue las mayores prestaciones tanto en Ancho de Banda como en fiabilidad, está basada en los diseños y chips de DS2. DS2 es una compañía española, instalada en Valencia, dedicada al desarrollo y diseño de chipsets⁸ de PLC. Esta empresa es actualmente el líder tecnológico en PLC, siendo sus desarrollos los que mayor Ancho de Banda han alcanzado (hasta 200 Mbps en equipos comerciales) [13].

En cuanto a la fabricación de equipos, Toyocom se sitúa como el fabricante mundial más avanzado del sector, proporcionando equipos PLC con una gran fiabilidad y amplias prestaciones. Toyocom fabrica tanto equipos para los tramos de media tensión como para los tramos de baja tensión, incluyendo los módems de abonado. Tecocom es el licenciataria exclusivo de Toyocom en España, Portugal y Latinoamérica [7].

1.4.4 Uso de la red eléctrica para transmisión de datos

Como ya se ha mencionado, PLC utiliza las redes de distribución de electricidad para la transmisión de datos y para transferencia de servicios de telecomunicaciones. La idea principal de PLC es la reducción de costos y gastos en la realización de nuevas redes de telecomunicaciones.

Las redes de alto y medio voltaje pueden ser usadas para conectar una distancia más larga que permita construir una red de comunicación adicional. Las redes de bajo voltaje están disponibles a nivel mundial en un gran número de hogares y

⁸ Chipsets: Juegos de Chip que conecta entre la unidad de procesamiento central (CPU) al sistema del computador personal.

puede ser usada para la implementación de redes de acceso PLC, convirtiéndose en una solución adicional en las así llamadas soluciones de última milla. PLC también puede ser usada en edificios o en casas, haciendo uso de las instalaciones eléctricas internas.

La aplicación de las redes eléctricas en las telecomunicaciones ha sido conocida desde comienzos del siglo 20. El primer Sistema Portador de Frecuencias (CFS - *Carrier Frequency System*) había estado operando en redes de alto voltaje, capaces de alcanzar distancias sobre los 500 kms (*Kilometers* - Kilómetros) usando señales de transmisión eléctricas de 10 W (*Watts* - Vatios) [12]. Tales sistemas han sido usados en utilidades de comunicación en redes eléctricas internas y realización de tareas de control y medidas remotas. También, se han llevado a cabo comunicaciones a través de las redes de medio y bajo voltaje como los sistemas de Señalización de Onda Portadora (*RCS - Ripple Carrier Signaling*) desarrollados para tareas de gestión de carga en los sistemas eléctricos.

Las redes eléctricas internas generalmente se usan en servicios de automatización, mientras que las aplicaciones de los sistemas PLC-Home hacen posible la gestión de numerosos dispositivos eléctricos dentro de un edificio o una casa, desde una posición central de control, sin la instalación de una red extra de comunicación. El típico PLC basado en sistemas de automatización de edificios es usado para observaciones de seguridad, supervisión de calentamiento de dispositivos, control de luces, entre otras tareas.

La energía eléctrica llega a los usuarios en forma de corriente alterna de baja frecuencia (50 ó 60 Hz⁹ (*Hertz*)). PLC utiliza portadoras de alta frecuencia (la banda utilizable cubre desde 1 hasta 30 MHz [7]) para transportar los datos. La técnica es similar a la que se usa en ADSL, sólo que para ADSL la señal de baja frecuencia es la banda utilizada para la voz, entre 300 y 3600 Hz. En cuanto a las técnicas para transmitir los datos las más utilizadas son OFDM y GMSK. Estas modulaciones son más inmunes a las interferencias presentes en las redes eléctricas y aportan el mayor nivel de rendimiento y eficiencia espectral.

⁹ Hz: Unidad de medida de frecuencia.

1.4.5 Estructura eléctrica utilizada para PLC

Las redes eléctricas, desde la generación hasta el abonado, pueden dividirse conceptualmente en varios tramos (Figura 1.8) [7]:

- Un primer tramo de Media Tensión (entre 15 y 50 Kilovoltios) que abarca desde la central generadora de energía hasta el primer transformador elevador.
- Un tramo de Transporte o de Alta Tensión (entre 220 y 400 Kilovoltios) que conduce la energía hasta la subestación de transporte. Conectan las estaciones de potencia con grandes regiones o grandes clientes. Alcanzan normalmente distancias muy grandes, permitiendo intercambio de electricidad dentro de un continente. Conduce la energía hasta la subestación de transporte
- Tramo de Media Tensión (de 66 a 132 Kilovoltios) entre la subestación de transporte y la subestación de distribución. Los tramos de media tensión abastecen grandes áreas, ciudades e industria o clientes comerciales. Las distancias alcanzadas son significativamente más cortas que en las redes de alto voltaje. Las redes de medio voltaje son implementadas sobre redes eléctricas aéreas y subterráneas
- Otro último tramo de Media Tensión (entre 28 y 50 Kilovoltios) desde la subestación de distribución hasta el centro de distribución.
- Y por último la red de Baja Tensión (entre 220 y 380 Voltios, para EEUU y Colombia 110 Voltios) que distribuye la energía dentro de los centros urbanos para uso doméstico, comercial e industrial. Abastecen cada uno de los usuarios finales como clientes individuales o como grandes clientes. Su longitud esta por encima de unos 100 mts (*Meters - Metros*). En las áreas urbanas, las redes de bajo voltaje se implementan mediante cables subterráneos, mientras que en las áreas rurales existen normalmente redes aéreas.

Las instalaciones eléctricas caseras pertenecen al nivel de la red de baja tensión. Sin embargo, las instalaciones internas son normalmente propiedad de los usuarios. Por otro lado, el resto de la red de baja tensión (outdoor) corresponde a los servicios del suministro eléctrico.

La red de suministro de baja tensión conecta directamente a los clientes finales de un gran número de hogares a nivel mundial. Por consiguiente, la aplicación de la tecnología PLC en las redes de baja tensión parece tener una mayor perspectiva con respecto al número de usuarios conectados.

Por otro lado, las redes de baja tensión cubren los últimos 100 mts entre los clientes y el transformador y ofrece una solución alternativa usando la tecnología PLC para la realización de la llamada última milla en el área de acceso de telecomunicaciones.

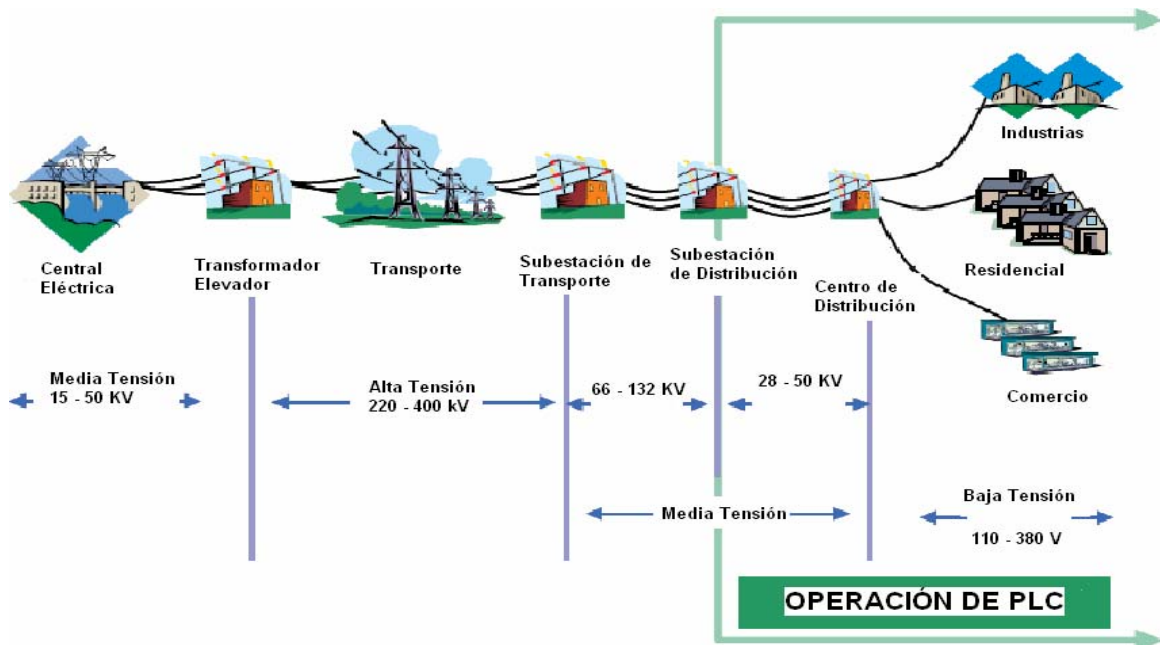


Figura 1.8. Red Eléctrica y PLC

En resumen, la red de acceso PLC se despliega utilizando el tendido eléctrico de baja tensión y cubre desde el transformador existente en el centro de distribución hasta el enchufe eléctrico en la casa del usuario.

1.4.6 PLC Banda Angosta

Las redes PLC de banda angosta operan dentro del rango de frecuencias especificado por la norma CENELEC (Figura 1.6). Este rango de frecuencias está dividido en tres bandas: A, para ser usadas por utilidades de control por parte de las empresas eléctricas, y la B y C, que se destinan para uso privado principalmente usadas para la realización de automatización de edificios y casas [9].

- La banda A (9 a 95 khz), asignada para empresas de servicios eléctricos en utilidades como lectura automática de contadores, en la cual no existe la necesidad de utilizar un protocolo de acceso al medio cuando se opera sobre esta banda.
- Las bandas B, C, D son reservadas para aplicaciones de usuario final. La banda B (95 a 125 khz) no requiere el uso de protocolos de acceso al medio para el establecimiento de las comunicaciones. Por lo tanto es posible que dos sistemas transmitan simultáneamente sobre la banda, aunque en consecuencia es posible encontrar colisiones. Esta banda está diseñada para usarse en aplicaciones tales como intercomunicadores.
- La banda C (125 a 140 khz) requiere de un protocolo de acceso al medio debido a la probabilidad alta de colisiones. En esta banda es posible la comunicación entre computadoras en un edificio o áreas reducidas.
- La banda D (140 a 148.5 khz) tiene características similares a la banda A y no requiere protocolo de acceso y por ende es factible la colisión de mensajes.

Los sistemas PLC de banda angosta aplican tanto los esquemas de modulación banda ancha como los de banda angosta. En principio las redes PLC de banda angosta se desarrollaron haciendo uso de la modulación por Desplazamiento de Amplitud (*ASK - Amplitude Shift Keying*), pero no es muy fuerte frente a disturbios o perturbaciones del medio y, por consiguiente, no es adecuada para aplicaciones en redes PLC. Por otro lado, la Modulación por Detección de Fase Binaria (*BPSK - Binary Phase Shift keying*) es un esquema robusto y, por consiguiente, más adecuado para aplicaciones PLC. Sin embargo, la detección de fase, necesaria para la realización de BPSK, puede ser muy compleja. Los sistemas actuales de Banda Angosta PLC aplican Modulación por Cambio de Frecuencia (*FSK - Frequency Shift Keying*), Modulación por cambio de fase en cuadratura (*QPSK - Quadrature Phase Shift Keying*), *OQPSK*¹⁰ (*Offset QPSK*), y se espera que próximamente hagan uso de BPSK en futuros sistemas de comunicaciones, aunque podrían ser reemplazados por modulaciones para banda ancha [9].

Los esquemas de modulación de banda ancha son también usados en sistemas de banda angosta PLC. Las ventajas de la modulación de banda ancha son el

¹⁰ OQPSK: Variación de QPSK.

comportamiento adecuado frente a condiciones de ruido y los efectos de atenuación selectiva que existen en las redes PLC. Uno de los principales esquemas de transmisión muy usado en los sistemas de banda angosta PLC es OFDM [14].

Un área importante para la aplicación de PLC banda angosta es la automatización de edificios y casas. Los sistemas de automatización basados en PLC se realizan sin la instalación adicional de redes de comunicación, permitiendo la reducción de costos. Los sistemas de automatización realizados con PLC pueden ser aplicados en diferentes tareas dentro de un edificio como son:

- Control de dispositivos que están conectados a una instalación eléctrica interna, como la iluminación, calefacción, aire acondicionado, ascensores, etc.
- Control centralizado de varios sistemas de edificios, como técnicas de manejo de ventanas (oscurecimiento) y control de puertas.
- Tareas de seguridad; vigilancia, interconexión de sensores, etc.

Los sistemas de automatización basados en PLC no son sólo usados en grandes edificios sino también muy a menudo en casas, para la ejecución de tareas de automatización similares (Casa automática o inteligente como lo muestra la Figura 1.9).

Como se especifica en el estándar CENELEC, las empresas eléctricas pueden usar la banda A para llevar a cabo servicios de electricidad. De esta forma, una empresa eléctrica puede usar PLC para realizar comunicaciones internas entre sus centros de control y diferentes dispositivos, control de funciones de medición remotas, sin construir una red de telecomunicaciones extra o adquirir recursos de red a un proveedor de red. Simultáneamente, PLC puede ser usado para lectura remota de los contadores de los clientes, permitiendo ahorrar costos ocasionados por la lectura manual de contadores [14]. Finalmente, las empresas pueden hacer uso de PLC para cálculos de precios dinámicos (Por ejemplo: dependiendo del día, costo de energía total ofrecida), así como para la vigilancia y control de consumo y producción de energía. En este último caso, específicamente, las empresas han estado intentando integrar un número mayor de pequeñas plantas energéticas (Por ejemplo: pequeñas estaciones de energía hidroeléctrica, plantas embobinadoras).

Sin embargo, las pequeñas plantas no son completamente confiables y su producción de energía varía dependiendo de las condiciones climáticas presentes. Por consiguiente, las regiones que son abastecidas por pequeñas plantas deben ser también abastecidas por otras fuentes. Para este propósito, las empresas necesitan

de una comunicación permanente entre sus organizaciones, que puede igualmente ser realizada por PLC.

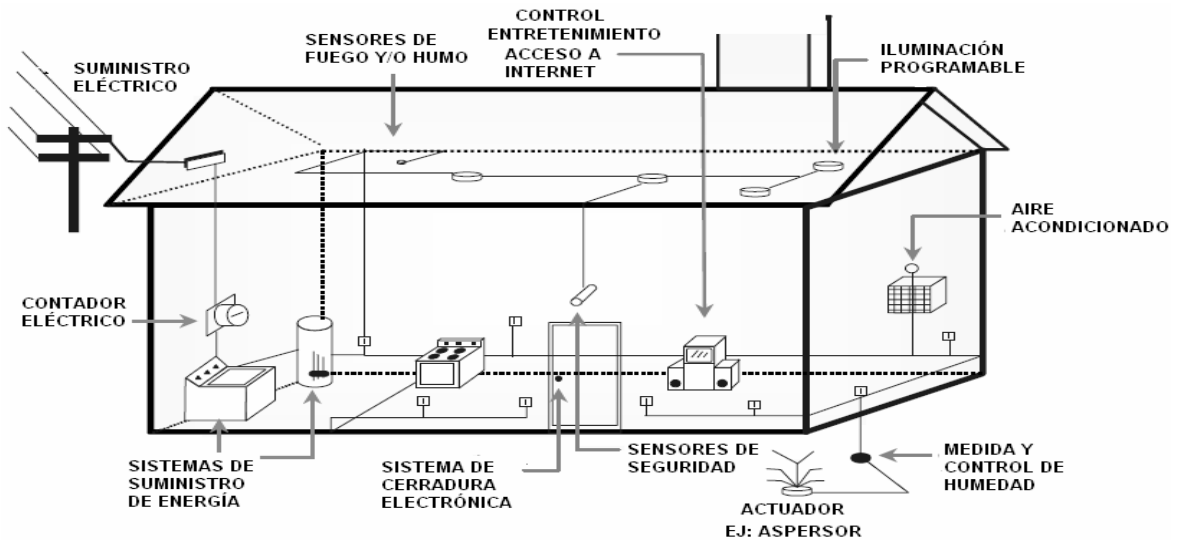


Figura 1.9. Estructura de un sistema de automatización usando PLC Banda Angosta [15]

La automatización de edificios es una aplicación indoor o interna típica de los sistemas PLC Banda Angosta mientras que los servicios relacionados con la energía se presentan para aplicaciones outdoor o externas. Un ejemplo muy interesante de aplicación de un sistema de automatización basado en PLC en el área outdoor es el caso de automatización de alumbrado de un campo de aviación basado en PLC, usado para conmutación y monitoreo de las luces del aeropuerto [16]. La longitud de los campos de aviación y de las redes de comunicaciones necesarias en un aeropuerto son extensas (varios kilómetros). Así, PLC Banda Angosta puede ser aplicada para ahorrar costos en la construcción de una red de comunicación compleja y permitir la prestación de servicios de automatización críticos, garantizando requerimientos de seguridad como el control de luz y el desplazamiento de los aviones en el aeropuerto.

1.4.7 PLC Banda Ancha

Los sistemas PLC Banda Ancha ofrecen velocidades de datos más altas (por encima de 2 Mbps) que los sistemas PLC de Banda Angosta. Mientras que las redes PLC Banda Angosta pueden transmitir sólo un número pequeño de canales de voz a muy bajas velocidades, las redes de Banda Ancha PLC ofrecen la implementación de servicios de telecomunicaciones más sofisticados, conexiones de voz múltiples, transmisión de datos a alta velocidad, transferencia de señales de video, y

también servicios de Banda Angosta; por consiguiente, los sistemas Banda Ancha PLC se consideran una tecnología calificada para ofrecer servicios de telecomunicaciones.

La implementación de servicios de telecomunicaciones Banda Ancha sobre redes eléctricas ofrece una gran oportunidad para reducir el costo efectivo de las redes de telecomunicaciones ya que evita la instalación de nuevos cables. Sin embargo, las redes eléctricas no están diseñadas para la transferencia de información y hay algunos factores limitantes en la aplicación de la tecnología PLC Banda Ancha que afectan las distancias alcanzadas y las velocidades obtenidas.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta para la aplicación de PLC Banda Ancha es su Compatibilidad Electromagnética (*EMC - Electromagnetic Compatibility*) debido a que una red PLC actúa como una antena, convirtiéndose en una fuente de ruido para otros sistemas de comunicaciones que trabajan en el mismo rango de frecuencias (1-30 Mhz [7]), (Por ejemplo: varios sistemas de radio [17]). Debido a esto, los sistemas banda ancha PLC deben operar con una señal de potencia limitada, disminuyendo su desempeño (velocidades, distancias).

Los sistemas banda ancha PLC actuales ofrecen velocidades mas allá de 2 Mbps en el área outdoor, que incluye redes de medio y bajo voltaje y hasta 12 Mbps en el área indoor. Algunos fabricantes han desarrollado prototipos de productos que ofrecen velocidades hasta de 200 Mbps.

Debido a la importancia del acceso a las telecomunicaciones, el desarrollo actual de la tecnología Banda Ancha PLC está principalmente dirigido hacia aplicaciones en redes de acceso incluyendo el área indoor, en especial para la conexión de Redes de Area Local (*LANs - Local Area Networks -*) entre edificios o campus y la conexión de antenas y estaciones bases de sistemas de comunicaciones celulares a su backbone, haciendo uso de las redes de bajo voltaje. En contraste con los sistemas Banda Angosta PLC, no se han especificado estándares que se apliquen a las redes de Banda Ancha PLC.

2. TECNOLOGÍA DE ACCESO PLC.

2.1 Estructura de las redes de acceso PLC

Como se expuso en el capítulo anterior, las redes de acceso PLC hacen uso de las redes eléctricas de baja tensión para transmisión de señales de información, facilitando la creación de soluciones de última milla. Las redes de baja tensión están conformadas físicamente por un transformador y un número de cables de potencia que permiten a los usuarios finales estar conectados a la red a través de contadores eléctricos. Esta red de baja tensión se conecta a las redes de medio y alto voltaje a través de un transformador, donde usualmente es ubicada una estación maestra o BS, que permite la conexión de las redes de acceso PLC al backbone de las redes (WAN) (Figura 2.1).

La estación base maestra convierte la señal proveniente del backbone de la red a una señal adecuada para su transmisión a través de la red de bajo voltaje. La información en dirección de enlace descendente (proveniente del backbone) es transmitida a todas las subsecciones de la red y es recibida por todos los usuarios en la red. En la dirección de enlace ascendente, la información enviada por un usuario es transmitida no solamente a la estación base, sino también a todos los usuarios en la red. Esto significa que el medio de transmisión PLC se comporta como una estructura en bus, a pesar del hecho que la red de baja tensión tenga una topología en árbol [2].

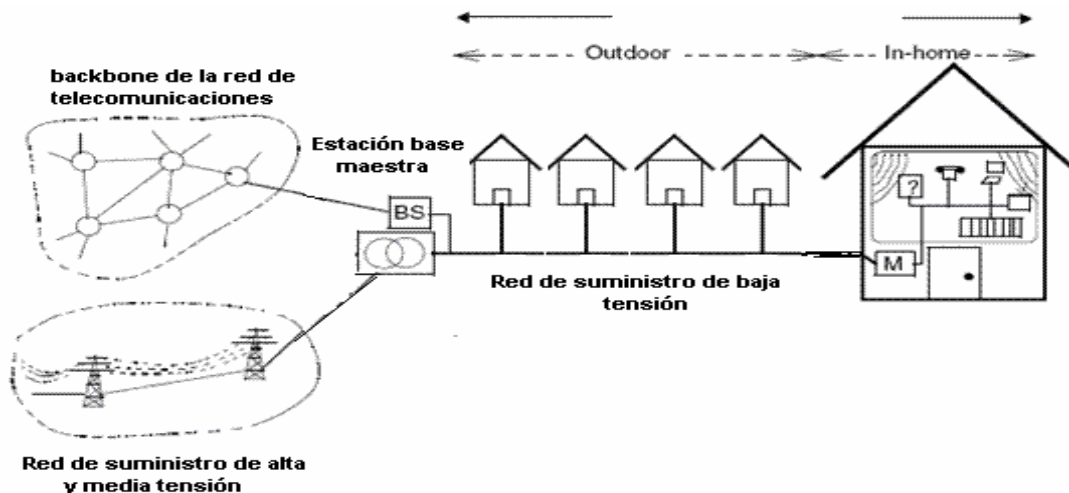


Figura 2.1. Estructura de una red de acceso PLC [18]

Los abonados PLC están conectados a la red a través de un módem PLC que puede ser colocado en el contador eléctrico o conectado a cualquier enchufe en la red

eléctrica interna. Además, existe la posibilidad de estar conectados a la WAN a través de instalaciones eléctricas usando módems PLC o usando otra tecnología de comunicaciones (Por ejemplo: DSL, WLAN). Los módems PLC convierten la señal recibida de la red PLC en un protocolo estándar de comunicación que puede ser procesado por los sistemas de comunicación convencionales.

Para hacer uso de PLC como solución de acceso existen diferentes formatos de arquitecturas entre los cuales se destacan los *sistemas punto a punto*, o los *sistemas híbridos* [19]. En los *sistemas punto a punto* las conexiones de acceso hacen uso de las líneas eléctricas de bajo voltaje para transmisión de información y se conocen como *redes in-home*. Los sistemas híbridos, por su parte, permiten conectar los dispositivos de comunicación de los usuarios mediante sistemas inalámbricos conectados a la red PLC.

2.2 Redes PLC in-home

Los sistemas PLC In-Home (redes internas PLC) usan la infraestructura eléctrica interna como medio de transmisión. Esto hace posible la implementación de redes locales PLC en las casas o edificios, permitiendo la conexión de dispositivos típicos como teléfonos, computadores, impresoras, dispositivos de video, entre otros. De la misma manera, los sectores empresariales pueden dotar sus oficinas con sistemas LAN PLC evitando la instalación de cableado y por ende reduciendo sus costos.

Hoy en día, los servicios automáticos se hacen más y más populares no sólo por su aplicación en los sectores industriales, comerciales y dentro de grandes construcciones, sino también por su aplicación en entornos privados [20]. Los servicios de sistemas de automatización como la vigilancia, control de temperatura, control de iluminación automática deben utilizar un gran número de dispositivos como sensores, cámaras, electromotores, luces entre muchos otros elementos. De acuerdo a esto, la tecnología PLC in-home se presenta como una solución razonable para la implementación de estos servicios en lugares donde no existe una infraestructura de comunicación interna apropiada.

Básicamente, la estructura de una red PLC in-home, de la misma manera que las soluciones de acceso mediante redes de bajo voltaje, utiliza una estación base para controlar la red PLC y probablemente permitir la conexión con el área externa como se puede observar en la Figura 2.2. La estación base puede ser colocada junto al contador eléctrico, o en cualquier otro lugar apropiado de la red

PLC In-Home. Todos los dispositivos de una red PLC in-home están conectados a través de los módems PLC, de forma análoga como los abonados de una red de acceso PLC. Los módems están conectados directamente a los enchufes de suministro de potencia, generalmente ubicados en las paredes, permitiendo la conexión de diferentes dispositivos de comunicación en cualquier enchufe disponible en la red.

Una red PLC In-Home puede existir como una red independiente que cubre sólo una casa o un edificio en particular, además de permitir el control remoto de varias funciones automáticas (Por ejemplo: Seguridad, gestión de energía) y la utilización de diferentes servicios de telecomunicaciones mediante la conexión a la WAN.

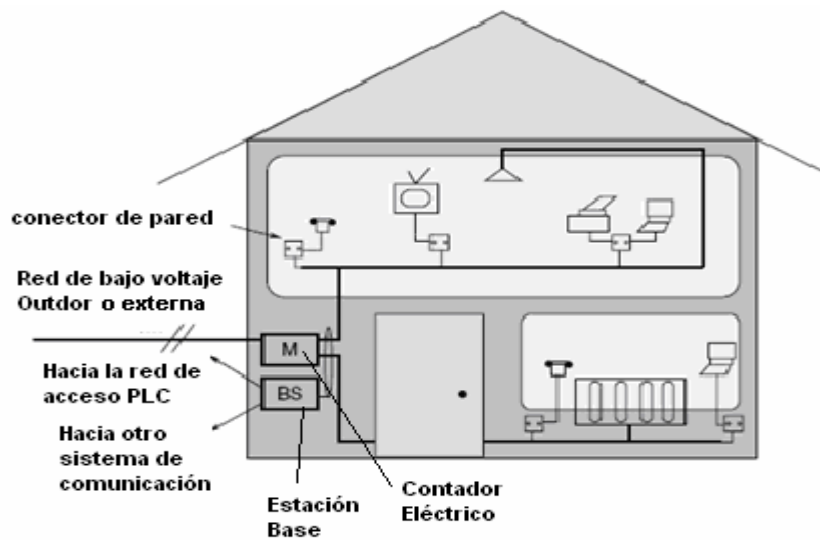


Figura 2.2. Estructura de una red PLC In-Home [21]

Las redes PLC in-home pueden estar conectadas no sólo a una solución de acceso PLC sino también a una red de acceso convencional que utiliza otro tipo de tecnología (Por ejemplo: xDSL). En el primer caso, si la red de acceso es operada por una empresa eléctrica, se puede realizar tanto el control como la medida de los servicios eléctricos además de los servicios de telecomunicaciones con PLC; (Por ejemplo: la gestión de la energía o la lectura remota de instrumentos de medición eléctrica, ahorrando el costo de lecturas manuales). En segundo lugar, si la red PLC in-home se conecta mediante una solución de acceso diferente ofrecida por otros operadores de telecomunicaciones permitirá beneficiarse de los costos de infraestructura adicional que implica la implantación de la red interna de comunicaciones.

Por otra parte, los sistemas de acceso WLAN están disponibles en el mercado como solución de acceso a precios favorables, alcanzando velocidades por encima de los 20 Mbps, facilitando la creación de diseños híbridos para conexión de dispositivos inalámbricos mediante el uso de módems inalámbricos conectados a un punto de la red PLC in-home.

2.3 Redes Híbridas PLC

Los sistemas híbridos usan la combinación de líneas eléctricas y transmisión inalámbrica. Por ejemplo, un sistema híbrido puede inyectar una señal PLC dentro de una línea de eléctrica de baja tensión usando módems inalámbricos que recogen la señal proveniente de los dispositivos inalámbricos del usuario y permiten la comunicación hacia la red de acceso PLC.

2.4 Elementos de la red PLC

Para la transmisión de los diferentes tipos de señales de comunicación (servicios de telecomunicaciones, automatización y control) a través de un entorno PLC, es necesario convertir la señal a una forma adecuada para su transmisión sobre la línea eléctrica, asegurando la integridad de la información. Para este propósito las redes PLC incluyen elementos específicos para lograr estos objetivos de conversión y transmisión sobre este medio, entre los cuales se encuentran dos dispositivos que se encuentran presentes en toda la red de acceso PLC como lo es el módem y la estación base maestra PLC.

2.4.1 Modem PLC - CPE

Un módem PLC o CPE [22] conecta los equipos de comunicación estándar, usados por los abonados, al medio de transmisión de la red eléctrica. El módem del lado del usuario puede estar conformado por diferentes interfaces estándar para conexión de diferentes dispositivos de comunicación (Por ejemplo: Ethernet y USB (Universal Serial Bus) para transmisión de datos y también interfaces para telefonía). Por otro lado, el módem PLC se conecta a la red eléctrica usando un método de acople específico que permite la inyección de señales a la línea eléctrica y la recepción adecuada de estas señales. El acople debe asegurar una separación eléctrica adecuada y actuar como un filtro pasa altos que divide la señal de comunicación (por encima de 9 Khz para banda angosta, y 1.6 Mhz para

banda ancha) de la señal eléctrica (50 o 60 Hz), además debe existir tantos acopladores como usuarios estén conectados a la red PLC [19]. La Figura 2.3 muestra un esquema de un acoplador para módem PLC.

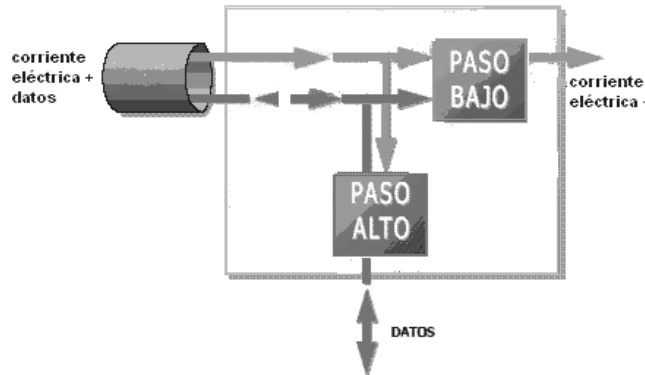


Figura 2.3. Acoplador Eléctrico [7]

El módem PLC implementa todas las funciones del nivel físico incluyendo la modulación y codificación. También implementa el segundo nivel de comunicaciones (Nivel de enlace de datos) incluyendo los subniveles MAC y Control Lógico de Enlace (*LLC - Logical Link Control*) de acuerdo al modelo de referencia OSI.

2.4.2 Estación Base Maestra PLC - Head End

Una estación base maestra PLC o Head-End conecta un sistema de acceso PLC al backbone de su red, es decir, realiza la conexión entre el backbone de comunicaciones y el medio de transmisión: la línea eléctrica. El Head End es el equipo que inyecta la señal proveniente del backbone de datos a la red de Baja Tensión. La configuración del Head End varía dependiendo de si el backbone de la red de datos utiliza la red de baja tensión o si se utiliza la red de media tensión como backbone. En el primer caso, el Head End dispondrá de una interfaz Ethernet para conectarse al switch o Router al Backbone o múltiples interfaces de red como xDSL, Jerarquía Digital Síncrona (*SDH - Synchronous Digital Hierarchy*) entre otras para conexión con redes de alta velocidad o WLL para interconexión inalámbrica [7]. En el segundo caso, incorporará una tarjeta PLC a media tensión que le conectará a otro equipo PLC de media tensión.

De esta manera, una estación base puede ser usada como elemento de conexión con los núcleos de las redes haciendo uso de varias tecnologías de comunicación.

2.4.3 Repetidor o Equipo intermedio (*IE - Intermediate Equipment*)

En algunos casos, las distancias entre los usuarios PLC ubicados en una red de baja tensión y entre los usuarios individuales y la estación base es demasiado extensa para lograr una comunicación sin pérdida de información. Para evitar este problema y para poder alcanzar distancias mayores mediante el uso de esta tecnología, se emplea la técnica del repetidor. Los repetidores dividen la red de acceso PLC en varios segmentos de red. Los segmentos de red están separados mediante el uso de varias frecuencias o slots de tiempo diferentes. En el segundo caso, cada segmento de red puede ser transmitido usando un slot diferente. En el caso de la segmentación de red mediante el uso de frecuencias, el repetidor recibe la señal de transmisión en la frecuencia f_1 , la amplifica y la inyecta en la red a una frecuencia f_2 [18]. En la dirección opuesta de transmisión, la conversión es inversa, es decir se inyecta la señal con frecuencia f_2 a una frecuencia f_1 . Dependiendo de los métodos de modulación y transmisión aplicados, la función del repetidor puede incluir también demodulación y modulación de la señal transmitida incluyendo procesamiento de la señal a un nivel de red más alto. Sin embargo, un repetidor no modifica los contenidos de la información transmitida.

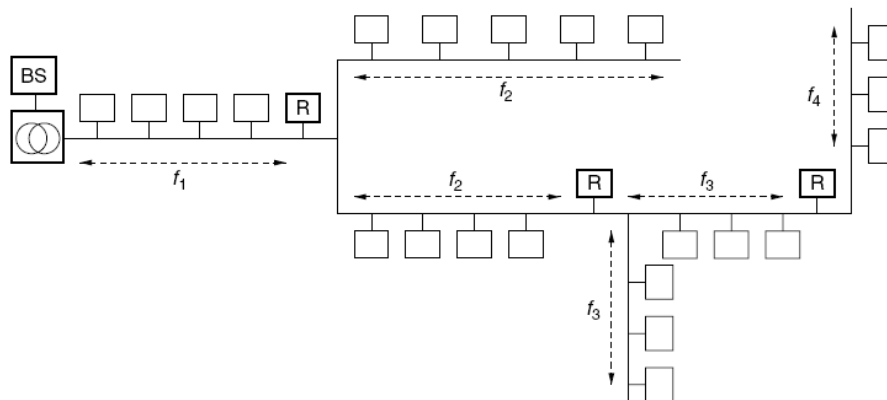


Figura 2.4. Red PLC con repetidores (R) [21].

La Figura 2.4 muestra el funcionamiento típico de los repetidores de una forma similar al funcionamiento de un repetidor usado en microondas. En un primer segmento de red, entre una estación base colocada en el transformador y el primer repetidor, la señal es transmitida dentro del espectro de frecuencia f_1 . Otro rango de frecuencia (f_2) se aplica en el segundo segmento de red. Independiente de la topología de red física, la señal es transmitida por ambas ramas. Teóricamente, el rango de frecuencias f_1 puede ser usado nuevamente dentro del tercer segmento de red. Sin embargo, si existe interferencia con las señales del primer segmento de red, se puede aplicar un tercer rango de frecuencias f_3 para el tercer segmento.

El espectro de frecuencias está limitado a aproximadamente 30 Mhz, razón por la cual si se aumenta el uso de frecuencias diferentes en los segmentos de red, se verá disminuido el Ancho de Banda efectivo del canal, lo que implicaría reducción de la capacidad de la red. La aplicación de los repetidores puede extender las distancias alcanzadas por la implementación de la tecnología PLC. Sin embargo, la utilización de repetidores incrementa los costos de la red, visto en costos de instalación y equipos (repetidores). Por consiguiente, el número de los repetidores dentro de una red de acceso PLC debe ser tan bajo como sea posible.

2.4.4 Gateway PLC

Existen 2 métodos para la conexión de los usuarios PLC a través de los enchufes de pared a una red de acceso PLC:

- Conexión directa
- Conexión indirecta a través de una gateway

En el primer caso, los módems PLC se conectan directamente a la red de Baja Tensión, es decir conexión directa con la estación base PLC (conectada antes del transformador - Figura 2.5). La señal de comunicaciones se transmite a través del contador eléctrico, es decir que no se presenta división entre el área interna (in-home) y la externa. Sin embargo, las características de las redes de suministro eléctrico internas y externas son diferentes, y la falta de división entre las áreas causa problemas adicionales con respecto a las características del canal de transmisión PLC y problemas de compatibilidad electromagnética. Por consiguiente, la conexión entre los enchufes y la red de acceso PLC se realiza adecuadamente usando un intermediario como gateway (enchufe - gateway - red PLC).

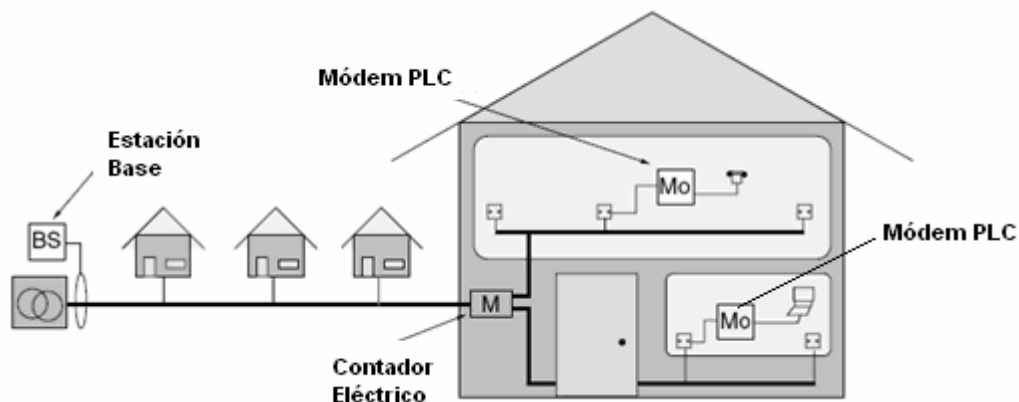


Figura 2.5. Conexión directa a los usuarios PLC [21]

Una pasarela es usada para dividir una red de acceso PLC en una red PLC In-Home, además de convertir la señal transmitida a las frecuencias especificadas para su uso en el área de acceso in-Home. La gateway es usualmente ubicada cerca al contador eléctrico de la casa (Figura 2.6). Asimismo, una gateway PLC puede proporcionar funciones adicionales que aseguren una división de las áreas de acceso In-Home del nivel lógico de red. De esta manera, los módems PLC conectados en una red In-Home pueden comunicarse internamente sin pasar flujo de información hacia el área de acceso. En este caso, una gateway PLC opera como una estación base local que controla una red PLC In-Home coordinando la comunicación entre los módems PLC internos y entre los dispositivos internos y una red de acceso PLC.

Generalmente, una gateway puede ser colocada en cualquier parte de una red de acceso PLC realizando tanto funciones de regeneración de señales (Repetidor), como la separación del nivel lógico de red.

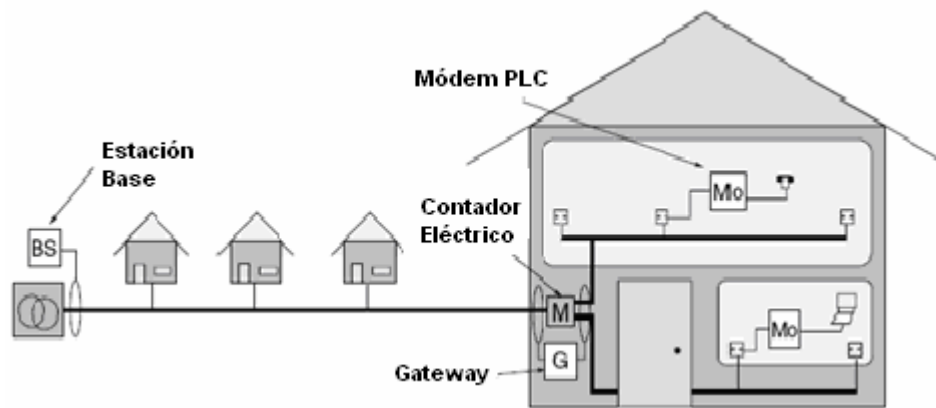


Figura 2.6. Conexión de usuario a través de una gateway [21].

De esta forma, una red PLC puede ser dividida en varias subredes que usan el mismo medio de transmisión físico (la misma red de bajo voltaje), pero existen separadamente como un tipo de red virtual (Figura 2.7). Ambas gateways (G) operan como repetidores PLC convirtiendo la señal de transmisión a las frecuencias f_1 y f_2 (o a slots de tiempo t_1 y t_2), así como a f_2 y f_3 (o t_2 y t_3). Adicionalmente, las gateways controlan las subredes II y III, es decir que la comunicación interna dentro de una subred es llevada a cabo por una sola gateway responsable y no afecta el resto de la red de acceso PLC, similar a las redes In-Home que usan una gateway. La comunicación entre un miembro de una subred y la estación base es posible sólo a través de la gateway responsable. Sin embargo, la red puede estar organizada de tal manera que la estación base controle un número de usuarios como en la subred I.

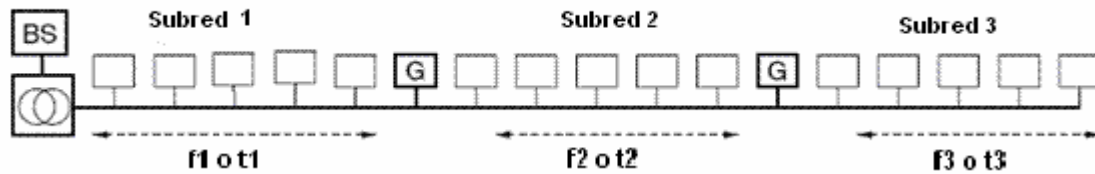


Figura 2.7. Gateways en una red de acceso PLC

Las gateways están conectadas a la red de la misma forma que los repetidores y realizan funciones similares a estos, por lo tanto el aumento del número de gateways dentro de una red de acceso PLC reduce la capacidad de la red y eleva los costos de implantación. A pesar de esto, la separación en segmentos de red por parte de las gateways mejora la eficiencia de la red.

2.4.5 Equipo de Transformación o TE (*Transformer Equipment*)

El TE es el dispositivo PLC instalado en las subestaciones transformadoras de Media y Baja Tensión (Figura 2.8). Es el encargado de inyectar la señal que llega desde la red de distribución PLC (cables eléctricos de medio voltaje, fibra óptica, etc) sobre la red de acceso (cables eléctricos de bajo voltaje). Los actuales TEs tienen una configuración modular con varias tarjetas [22]:

- Tarjetas Bajo Voltaje (*LV - Low Voltaje*), la cual inyecta la señal PLC que llega desde las redes de distribución PLC sobre los cables eléctricos de bajo voltaje.
- Tarjetas Medio Voltaje (*MV - Medium Voltaje*), la cual permite la interconexión de las subestaciones de media y baja tensión a través de interfaces convencionales RJ-45 o GB Ethernet, la cual permite el uso de la fibra óptica existente u otro tipo de tecnología para redes de distribución PLC.

Las tarjetas instaladas serán diferentes dependiendo del rol del equipo específico en la red.

2.4.6 Unidades de Acoplamiento

Las unidades de acoplamiento son accesorios necesarios para inyectar y adaptar la señal de telecomunicaciones desde los equipos PLC a las líneas eléctricas de media tensión o baja tensión.

Existen dos tipos de unidades de acoplamiento [22]:

- Acoplamiento Capacitivo: inyecta la señal por contacto directo con las líneas eléctricas (Por ejemplo: acoplamiento directo y penetrante).
- Acoplamiento Inductivo: inyecta la señal por inducción (Por ejemplo: acoplamiento por ferrita).

La solución de acoplamiento a ser implementada es escogida basada en la calidad de la señal y la facilidad de instalación de las características específicas de las redes eléctricas de cada nodo de red y de la utilidad particular.

Las soluciones de acoplamiento han evolucionado significativamente mejorando los tiempos de instalación, desempeño de procedimientos, y seguridad

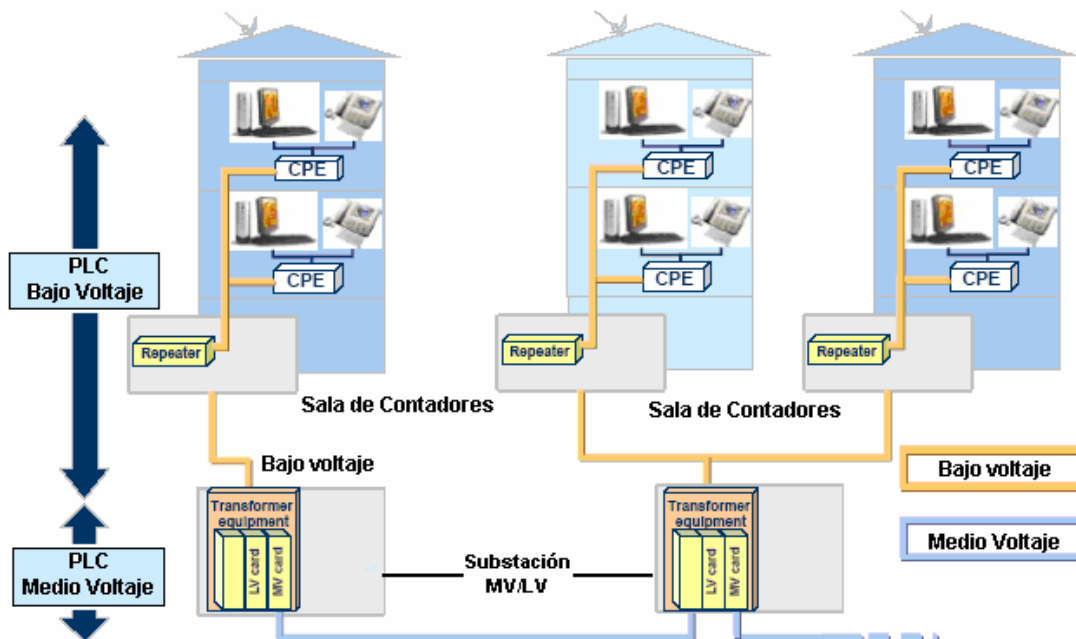


Figura 2.8. Equipo PLC en el área de Acceso y Distribución [22]

2.5 Conexión al núcleo de la red

Las redes de acceso PLC están conectadas al núcleo de la red a través de redes de distribución de telecomunicaciones. En general, una red de distribución permite conectar una estación base PLC con una oficina de conmutación local operada por un proveedor de red. Así, para que la red PLC pueda estar conectada a la red WAN necesita una solución de distribución que permita acceder al backbone de la red, y además, si se desea asegurar una inversión más baja garantizando competitividad con otras redes, la red de distribución deberá ser implementada usando las líneas de media tensión.

2.5.1 Topologías para las redes de distribución PLC

Una solución razonable para la conexión de múltiples redes de acceso PLC, ubicadas dentro de un área pequeña, es la construcción de una red de distribución común a la que se conecta un número de redes PLC. Las redes de distribución pueden ser implementadas usando diferentes topologías de red, independientes de la tecnología de comunicaciones aplicada (bus, estrella, anillo). La topología de red seleccionada debe garantizar un costo razonable y además una solución confiable (incluyendo redundancia en el caso de fallas). Todo esto depende principalmente de la localización tanto de las redes de acceso PLC en un área adecuada como la disposición de la oficina de conmutación local (proveedor de servicios).

La topología de red en bus es una de las soluciones posibles que puede ser implementada a bajos costos en lugares adecuados. Sin embargo, el factor de costo no es el único criterio de decisión sobre la topología de la red de distribución. Un criterio importante es la confiabilidad de la red en el caso de las fallas del enlace. Por lo tanto, si un enlace entre dos redes de acceso PLC deja de funcionar en una topología en bus, las demás redes de acceso conectadas al enlace sufren desconexión de la red WAN. Por consiguiente, la topología de red en malla puede ser considerada para la aplicación en las redes de distribución PLC. Otra solución posible es una red con topología en estrella que conecta a cada red de acceso PLC separadamente (Figura 2.9).

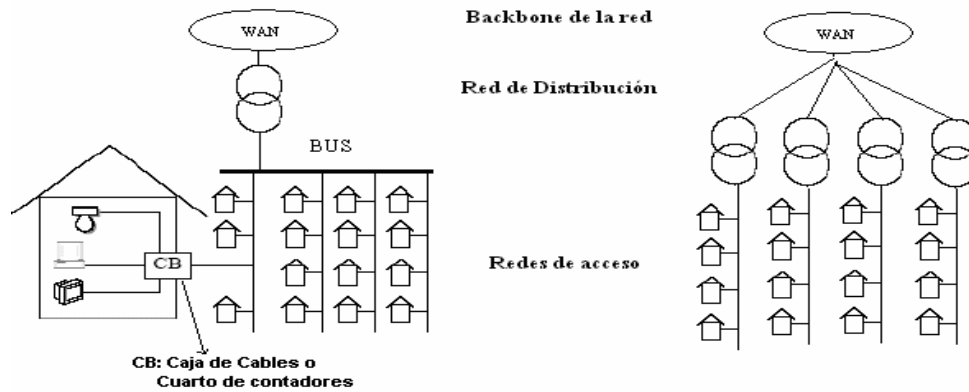


Figura 2.9. Red de distribución en bus y en estrella

La topología de red en estrella es adecuada para la aplicación de la tecnología DSL en las redes de distribución PLC. Sin embargo, la falla de un enlace en la estrella desconecta una red de acceso PLC sin la posibilidad de una conexión alternativa para esta red. De esta manera, la aplicación de la topología de red en anillo se considera como la solución más razonable para lograr la confiabilidad de la red (Figura 2.10).

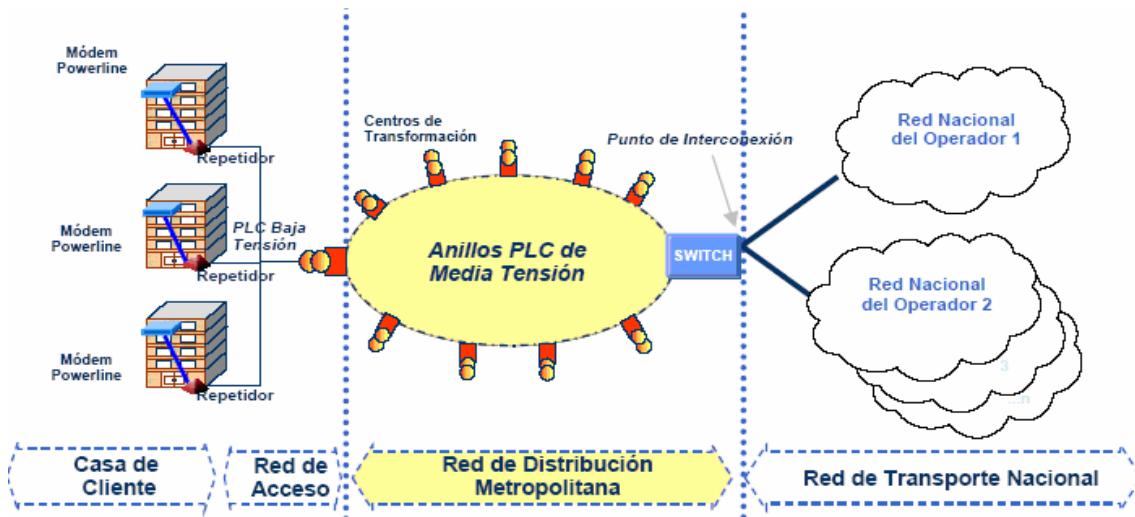


Figura 2.10. Topología en anillo para redes PLC [22][23]

En el caso de falla de un solo enlace entre los nodos del anillo, existe una posibilidad para la transmisión por caminos alternativos (Figura 2.10). Desde luego, la reorganización de los caminos de transmisión entre las redes de acceso PLC y el backbone debe ser realizado automáticamente en intervalos de tiempo corto (máximo varios segundos). De esta manera, la tecnología de transmisión aplicada en el backbone de las redes debe soportar la implementación de una estructura de red en anillo. (Por ejemplo: Bus Dual de Cola Distribuida (DQDB -Distributed

Queue Dual Bus), Interfaz de Datos Distribuida por Fibra (*FDDI - Fiber Distributed Data Interface*) [22]).

Finalmente la topología de una red de distribución PLC puede también ser una combinación de cualquiera de las tres estructuras básicas de red presentadas anteriormente. Sin embargo, la elección de una topología de red depende de varios factores, como pueden serlo:

- Tecnologías de comunicaciones usadas que dan pie al uso de una topología de red específica,
- Disponibilidad de un medio de transmisión dentro del área de aplicación,
- Posibilidad de la realización de redes de distribución confiables
- Distribución y Estructura geográfica de las redes de acceso PLC y de la oficina de conmutación local.

2.5.2 Redes de Media Tensión PLC

Similar a los sistemas de acceso PLC que usan las redes eléctricas de baja tensión como un medio de transmisión, las redes eléctricas de media tensión también pueden ser usadas para la comunicación de redes PLC. Generalmente, la organización de las redes de media tensión PLC no es diferente de las redes de baja tensión. De esta manera, las redes de media tensión PLC incluyen los mismos elementos de red (Figura 2.11) [24]:

- *Extractores o módem PLC* de media tensión, que conectan a los usuarios finales con el medio de transmisión de media tensión. Suministra una interfaz entre las líneas eléctricas de media tensión y los vecindarios dentro del área de servicio. Se localizan usualmente en cada transformador de distribución de bajo voltaje alimentando un grupo de casas.
- *Concentrador/injector o estación base*, que conecta una red de media tensión PLC al backbone. Los inyectores están ligados al backbone de Internet mediante líneas de fibra T1¹¹ y mediante interfaces de alimentación a las líneas de media tensión.
- *Repetidores y gateways*.

¹¹ T1: Sistema americano con tasa de transmisión de 1.544 Mbps.

- *Acopladores Inductivos*: son usados para conectar módem PLC a las líneas de media tensión. Un acoplador inductivo transfiere la señal de comunicación sobre la línea eléctrica mediante inducción, si estar directamente conectado a la línea. El reto principal es como entregar la señal desde la línea de media tensión a la línea de baja tensión que llega a las casas, debido a las barreras potenciales como son los transformadores.
- *Enrutador*: es un dispositivo que actúa como una interfaz entre dos redes y suministra funciones de gestión de red.

Una red eléctrica de media tensión normalmente abastece a varias redes de baja tensión. Por consiguiente, una red de media tensión PLC puede ser usada como una red de distribución que conecta un número de redes de acceso PLC al backbone (Figura 2.11). En este caso, varias redes de acceso PLC se conectan a la red de distribución PLC de media tensión con una topología de red similar a la red de distribución en anillo (Figura 2.12).

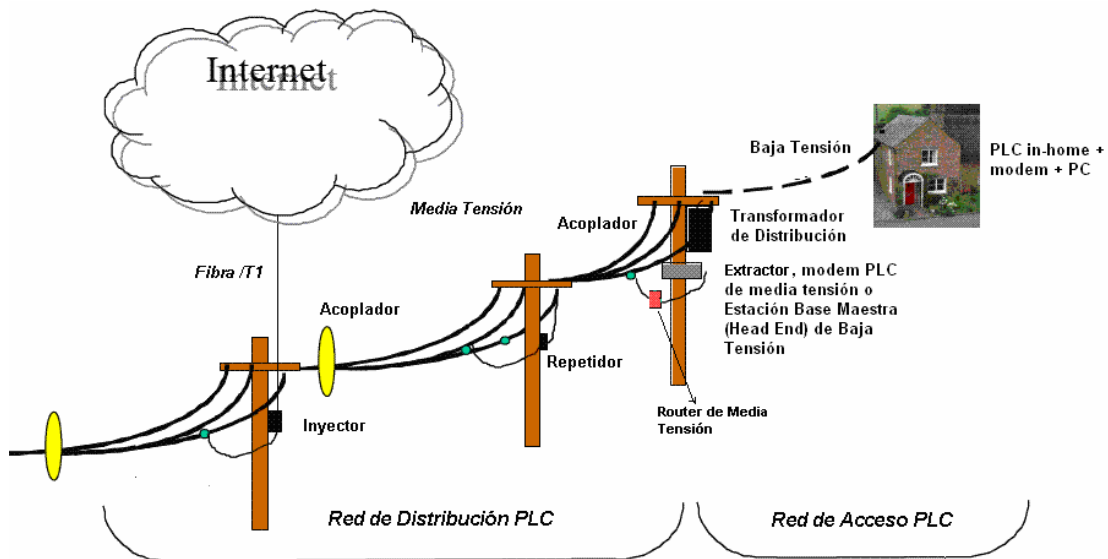


Figura 2.11. Red de Acceso y Distribución PLC [24]

Aunque las condiciones de transmisión en las redes de media tensión son mejores que las redes de baja tensión, se espera que las velocidades de datos alcanzadas en una red de media tensión PLC no sean demasiado altas comparadas con las redes de acceso PLC para evitar cuellos de botella.

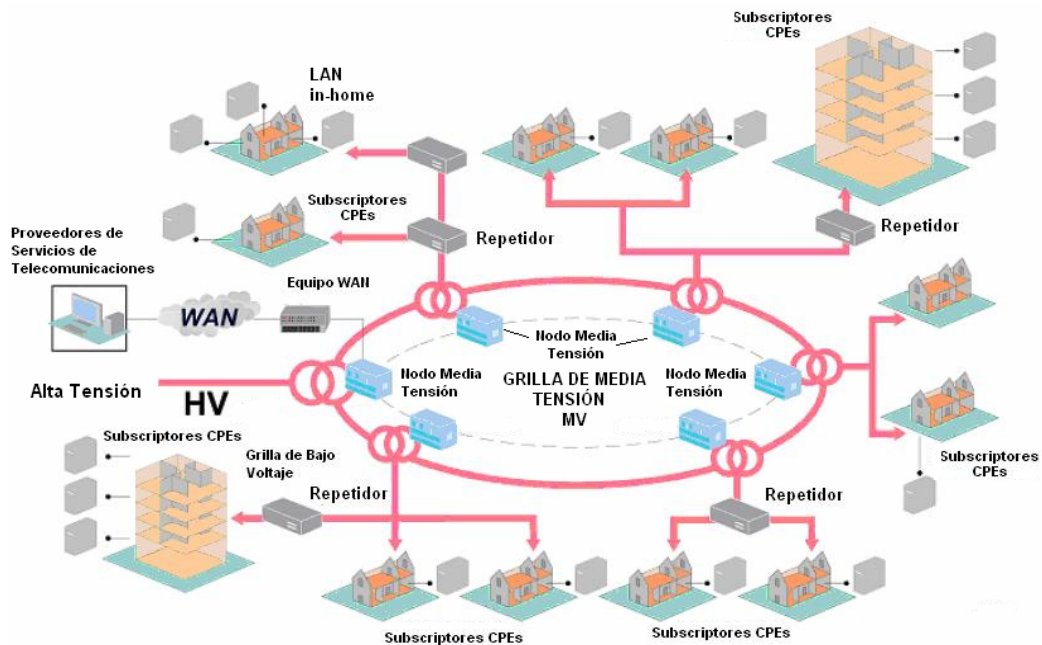


Figura 2.12. Estructura de la red de comunicación de un sector residencial usando una red PLC de Media Tensión [25]

Por otro lado, las redes PLC de media tensión ofrecen la oportunidad para la realización de redes de comunicación sin la necesidad de instalar nuevas soluciones cableadas en un área amplia de cobertura. Así, una red eléctrica de media tensión puede ser usada para la conexión de múltiples LANs dentro de un campus en una red de datos común, o como la conexión de diferentes edificios o casas en un sector residencial, como se muestra en la Figura 2.12.

Otro ejemplo de aplicación haciendo uso de la red PLC de Media Tensión es la conexión de antenas para varios sistemas de radio. De esta forma, una antena usada para un sistema móvil inalámbrico puede estar conectada a su estación base a través de una red eléctrica de medio voltaje.

2.5.3 Tecnologías híbridas de comunicación para redes de distribución PLC

La solución más económica para la conexión entre una red de acceso PLC y el backbone de red es el uso de los sistemas de comunicación que ya están disponibles en el área de aplicación.

Durante la última década, muchas empresas eléctricas implementaron redes de comunicación ópticas a lo largo de sus líneas de suministro, las cuales también aseguran la conexión al backbone. En este caso, la red de acceso PLC está

compuesta de una parte óptica y una PLC, la cual permite una solución híbrida similar a las redes Híbrido Fibra y Coaxial (*HFC- Hibryd Fiber Coaxial*), en la cual una red de distribución óptica conecta redes de acceso de TV por cable a una red WAN. De esta forma las soluciones de acceso PLC usando redes de bajo voltaje, se presenta como una solución interesante.

Para la conexión al core de la red existen las siguientes posibilidades:

- El uso de nuevas redes existentes ópticas o de cable.
- Uso de redes inalámbricas de distribución, como WLL, o aplicaciones de tecnología satelital.
- Aplicación de la tecnología PLC en las redes de media tensión.

La tecnología de telecomunicaciones aplicada a las redes de distribución PLC debe garantizar la transmisión de todos los servicios ofrecidos en las redes de acceso PLC. Además, el backbone de las redes PLC no debería ser cuello de botella en la estructura de comunicaciones entre los usuarios PLC y el backbone de la red. Por consiguiente, una tecnología de backbone aplicada obliga a proporcionar suficiente capacidad de transmisión (velocidad de los datos) y la obtención de garantías de calidad de servicio.

De acuerdo a los tipos de conexión que pueden existir en el core, las posibles estructuras de la red de distribución dependiendo del tipo de tecnología utilizada pueden ser [24]:

2.5.3.1 Estructura No.1: Aplicación de la tecnología PLC en redes de media tensión

En esta arquitectura, el inyector y el extractor comparten una banda de frecuencia común (F1) sobre las líneas de media tensión, diferente de la banda de frecuencia (F2) usada sobre líneas de baja tensión y empleada por los dispositivos de los subscriptores PLC in-home (Figura 2.13). Con el propósito de minimizar la rivalidad por el canal, la técnica de Acceso Múltiple por Detección de Portadora (*CSMA - Carrier Sense Multiple Access*) es usada con Evasión de colisiones (*CA - Collision Avoidance*). Este tipo de sistema está diseñado para aceptar algo de interferencia co-canal entre las células PLC cuasi-independientes sin el uso de filtros aislados sobre la línea eléctrica, debido a que todos los dispositivos operan en la misma banda de frecuencia.

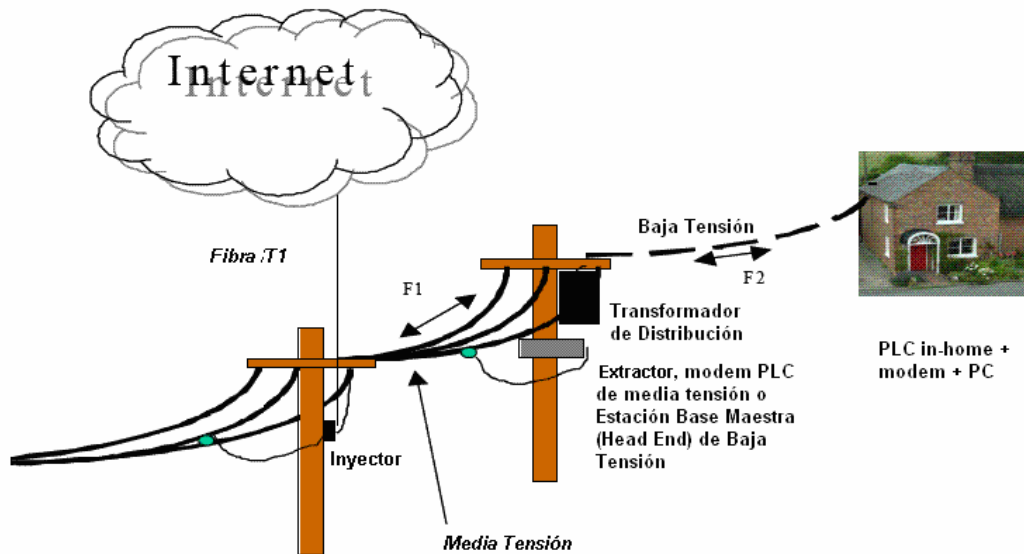


Figura 2.13. Conexión al core mediante PLC [19][24]

2.5.3.2 Estructura No. 2: Red de distribución WiFi¹² (*Wireless Fidelity*), red de acceso PLC

Además de utilizar un dispositivo que usa las líneas de baja tensión, esta arquitectura extrae la señal PLC desde la línea eléctrica de media tensión y la convierte en una señal WiFi usando el estándar IEEE 80.2.11b, para las interfaces inalámbricas utilizadas por diferentes dispositivos del usuario (Figura 2.14).

Esta arquitectura usa diferentes bandas de radio frecuencia para separar el envío de señales de información PLC en el enlace ascendente (desde el usuario) y las señales en dirección de enlace descendente (al usuario). Para abarcar largas distancias entre un inyector y el extractor PLC, se emplean repetidores. Igual que los inyectores, los repetidores PLC transmiten y reciben en diferentes frecuencias. En esta arquitectura los repetidores pueden suministrar las capacidades de un extractor cuando se equipan con transceivers¹³.

¹² WiFi: Tecnología inalámbrica

¹³ Transceiver: Equipo Transmisor - Receptor

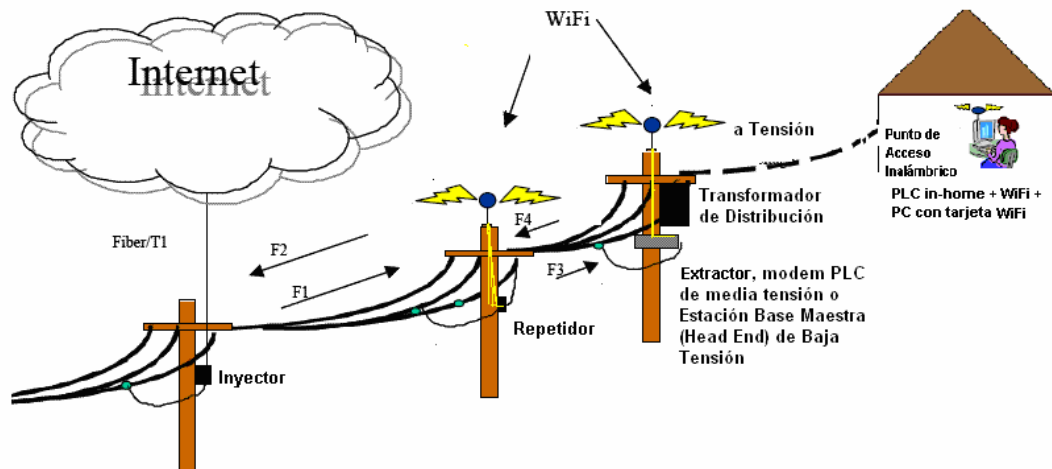


Figura 2.14. Red híbrida PLC-WiFi [19][24]

2.5.4 Gestión de las redes PLC

Un control eficiente de las redes de acceso PLC debe ser hecho desde uno o muy pocos centros de gestión, proporcionando una solución económicamente razonable. Sin embargo, las redes de acceso PLC pertenecientes a un proveedor de servicios de red puede distribuir los puntos de gestión geográficamente según su conveniencia.

La gestión de una red de acceso PLC incluye la configuración y reconfiguración de todos sus elementos (estación base, módems, repetidores y gateways) dependiendo del estado de la red actual. Las funciones de gestión pueden ser controladas localmente por la estación base (o gateways) o por un centro de gestión usando funciones de control remotas. La gestión local se realiza automáticamente sin ninguna acción de gestión personal.

Para lograr una solución de gestión eficiente sería conveniente transferir más funciones de mantenimiento a las estaciones base y gateways ubicadas en las redes de acceso. Sin embargo, la capacidad de gestión de los elementos de la red PLC aumenta el costo de los equipos. Por lo tanto, la división de la funciones de gestión entre los elementos de red y la central de control es una buena tarea de optimización.

De todos modos, la operación básica de una red tiene que estar asegurada por los mismos elementos de red, sin ninguna acción del centro de gestión. Una vez los equipos están instalados en una red de bajo voltaje, la red PLC provee un número

de procedimientos de auto-configuración y auto-control que debería operar sin la ayuda de personal de mantenimiento.

3. CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE TRANSMISIÓN PLC

Un sistema de transmisión en una red de telecomunicaciones debe convertir la información en un flujo de datos adecuado, antes de que sea inyectado al canal de comunicaciones. Como los demás canales de comunicaciones, el medio PLC introduce cierta atenuación y cambio de fase de las señales, debido a que es un medio hostil, diseñado en un principio solamente para distribución de energía.

La comunicación de datos sobre la línea eléctrica tolera la convivencia de la señal de energía con diferentes tipos de señales provocadas por ruidos e interferencias generadas por diversas fuentes. A su vez estas líneas no están sometidas a cargas constantes y controladas, ya que puede existir un número indeterminado de cargas conectadas a la línea, que a su vez pueden ser conectadas y desconectadas en cualquier momento, provocando un cambio en las características del medio y afectando su funcionamiento con el tiempo, a diferencia de lo que sucede en una línea Ethernet, cuyas características se mantienen fijas e invariantes con el tiempo [26].

Consecuentemente la transmisión de datos sobre este canal “variable” es lo que ha retrasado la viabilidad de la tecnología Powerline y ha hecho que muchas compañías abandonaran su estudio.

3.1 Modelo del Canal.

Debido a la inestabilidad del canal y a los dispositivos que continuamente son conectados a la línea de distribución eléctrica, las características de impedancia varían constantemente. Además el canal de transmisión puede ser considerado como un canal de múltiples rutas debido a las reflexiones generadas por las discontinuidades de la impedancia, ocasionados por fallas en los acoples, como también por el desvanecimiento de la señal en frecuencia. La impedancia del canal está principalmente influenciada por la impedancia característica de los cables, la topología de la red y la naturaleza de la carga eléctrica conectada, además la impedancia del canal está variando continuamente con la frecuencia. El análisis estadístico de algunas medidas obtenidas han mostrado que sobre casi todo el espectro, el valor de la impedancia varía entre 100 y 150 Ω , por debajo de los 2 Mhz [27].

La atenuación es otra característica del medio por el que viaja la señal que limita su correcta transmisión, así pues un medio con escasa atenuación va a permitir que la señal viaje fácilmente permitiendo que el receptor y el emisor establezcan un buen canal de comunicación, sin que la señal se debilite excesivamente; por su parte si la atenuación es elevada, la señal va a debilitarse rápidamente, lo que va a provocar que no se cree un buen canal de comunicación entre el emisor y el receptor.

El medio de transmisión en una línea eléctrica tiene una atenuación variable, de tal forma que dependiendo de la frecuencia con la que estemos modulando la portadora para llevar datos, la línea se comportará como un buen o mal medio de transmisión. De acuerdo a las características del canal por la relación de dependencia de la atenuación en la impedancia característica, además de la falta de acople de las cargas conectadas a la línea eléctrica, se presenta el fenómeno de *fading* o desvanecimiento selectivo en frecuencia, cuyo efecto se puede observar en la Figura 3.1.

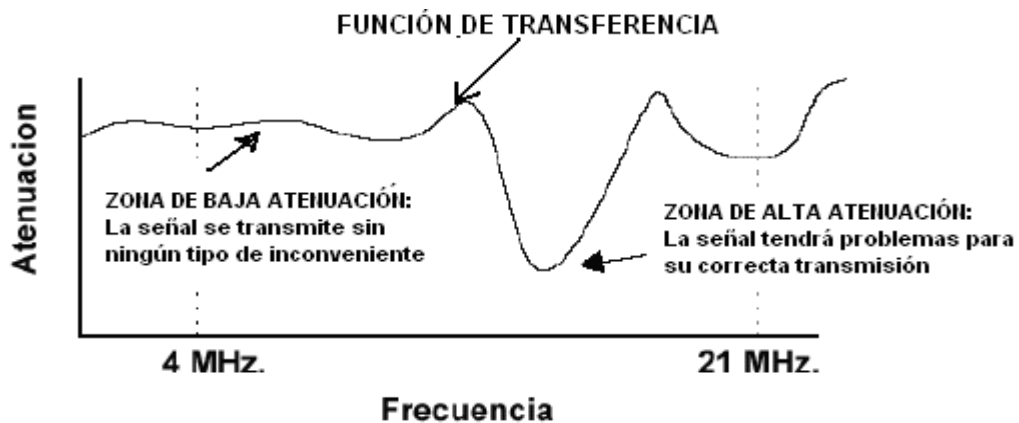


Figura 3.1. Función de transferencia para una línea eléctrica que alimenta algún circuito en un área Indoor [27]

El resultado del desvanecimiento y la falta de acople de las cargas afecta de forma directa la ruta de transmisión de la señal y por ende el canal de comunicaciones se convierte en un escenario multiruta o escenario que presenta múltiples reflexiones (ecos de señal).

La propagación de la señal en un medio de múltiples rutas puede ser estudiada por un ejemplo simple analizado en la Figura 3.2 [28].

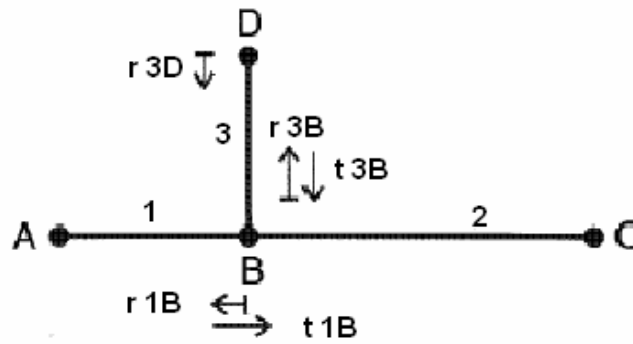


Figura 3.2. Propagación de señal multiruta [28]

La figura anterior asume un enlace que tiene sólo una rama y está compuesto por los segmentos (1-2-3) con longitud l_1 , l_2 , l_3 y las impedancias características Z_{L1} , Z_{L2} , y Z_{L3} . Con el fin de simplificar las consideraciones, A y C se asumen acopladas, lo cual significa que $Z_A = Z_B$ y que $Z_C = Z_{L2}$. Los puntos de reflexión restantes son B y D, con factores de reflexión denotados por r_{1B} , r_{3D} , r_{3B} (Ecuaciones 3.1, 3.2, y 3.3), y los factores de transmisión denotados por t_{1B} y t_{3B} (Ecuaciones 3.4 y 3.5) [29].

$$r_{1B} = \frac{(Z_{L2} \parallel Z_{L3}) - Z_{L1}}{(Z_{L2} \parallel Z_{L3}) + Z_{L1}} \quad \text{Ecuación 3.1} \quad r_{3D} = \frac{Z_D - Z_{L1}}{Z_D + Z_{L1}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$r_{3B} = \frac{(Z_{L2} \parallel Z_{L1}) - Z_{L3}}{(Z_{L2} \parallel Z_{L1}) + Z_{L3}} \quad \text{Ecuación 3.3} \quad t_{1B} = 1 - |r_{1B}| \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$t_{3B} = 1 - |r_{3B}| \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Con estas suposiciones, un número infinito de rutas de propagación son posibles en principio, debido a múltiples reflexiones, como por ejemplo de $A \rightarrow B \rightarrow C$, de $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow C$, $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$, y así sucesivamente. Cada ruta i tiene un factor de carga g_i que representa el producto de los factores de reflexión y transmisión a lo largo de la ruta. Todos los factores de reflexión y transmisión son menores o iguales a uno (Ecuación 3.6), esto debido al hecho que la transmisión ocurre solamente en el acoplamiento, donde la carga de dos o más cables en conexión paralela da un resultado de impedancia más bajo que la impedancia característica del cable de alimentación [28].

$$|g_i| \leq 1 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

La mayoría de transiciones y reflexiones ocurren a lo largo de la ruta con factor de carga g_i más pequeño. Adicionalmente, las rutas más largas exhiben atenuaciones más altas y por ende contribuyen menos a la señal recibida en el punto de recepción.

Debido a estos factores, se puede aproximar un número infinito de rutas por sólo N rutas dominantes, y asegurar N tan pequeño como sea posible.

La señal de propagación en redes más complicadas con una cantidad de ramificaciones mayor puede ser dividida en rutas de forma similar a lo explicado anteriormente [29].

El retardo introducido por una ruta τ_i está dado por la ecuación 3.7, y puede ser calculado de acuerdo a la constante dieléctrica ϵ_r , el material aislante c_o , la velocidad de la luz v_p , y las longitudes d_i de los cables.

$$\tau_i = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c_o} = \frac{d_i}{v_p} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Las pérdidas de los cables causan una atenuación $A(f, d)$ que incrementa con la longitud y la frecuencia. Las componentes de señal de las rutas individuales se combinan por superposición de tal forma que la respuesta en frecuencia de la ruta A→C puede ser expresada como:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Factor de Carga}} \cdot \underbrace{A(f, d_i)}_{\text{Atenuación}} \cdot \underbrace{e^{-j2\pi f \tau_i}}_{\text{Retardo}} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

3.2 Características del canal de Transmisión PLC

Las características de una línea de transmisión se determinan por sus propiedades dieléctricas (como la conductancia de los cables y la constante dieléctrica del aislante), y sus propiedades físicas (como el diámetro del cable y los espacios del conductor). Estas propiedades, a su vez, determinan las constantes dieléctricas primarias como son la resistencia en serie (R), la inductancia en serie (L), la capacitancia de derivación (C), y la conductancia de derivación (G). La resistencia y la inductancia ocurren a lo largo de la línea y constituyen la impedancia serie, mientras que entre los dos conductores se presentan la capacitancia y la

conductancia que corresponden a la admitancia en paralelo. Las constantes primarias se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la línea, y por lo tanto se les llama comúnmente parámetros distribuidos. Para simplificar el análisis, los parámetros distribuidos se agrupan por una longitud unitaria dada para formar un modelo artificial de la línea. Por ejemplo la resistencia en serie generalmente se da en ohms por milla o km [9].

El circuito equivalente eléctrico para una línea de transmisión, de dos cables, metálica, indicando el lugar relativo de los distintos parámetros agrupados es mostrado en la Figura 3.3, donde la conductancia entre los dos cables se muestra en forma recíproca y se indica como una resistencia de derivación dispersa (R_s).

Las constantes secundarias de la línea de transmisión se determinan a partir de las cuatros constantes primarias. Las constantes secundarias son la Impedancia Característica y la Constante de Propagación.

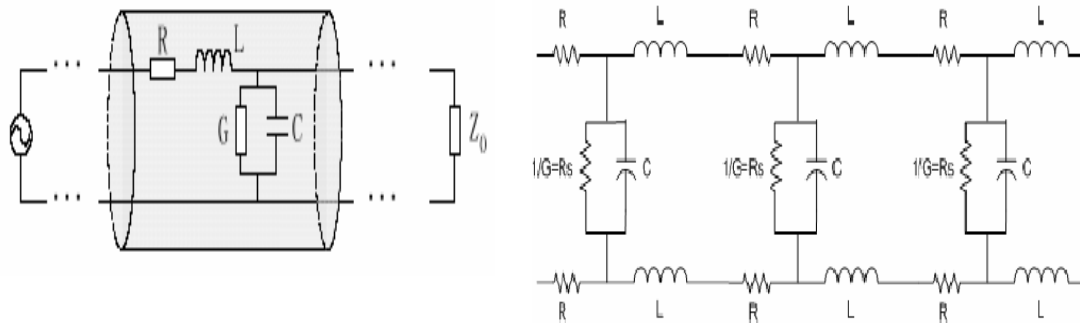


Figura 3.3. Circuito equivalente eléctrico de una línea de transmisión [9].

La Impedancia Característica es un factor que determina si existe o no máxima transferencia de potencia, desde la fuente a la carga, y se logra si la línea de transmisión termina en una carga puramente resistiva del mismo valor, que evita la reflexión de la energía hacia la fuente.

La impedancia característica (Z_0) de una línea de transmisión, es una cantidad compleja que se expresa en ohms (Ω), que idealmente es independiente de la longitud de la línea, y que no puede medirse con exactitud. La impedancia característica (o muchas veces llamada, resistencia de descarga), se define como la impedancia que se ve desde una línea infinitamente larga que termina en una carga totalmente resistiva, igual a la Impedancia Característica de la línea.

Una línea de transmisión almacena energía en su inductancia y capacitancia distribuida. Si la línea es infinitamente larga, puede almacenar energía

indefinidamente, es decir que está entrando energía a la línea que no se regresa, por lo tanto la línea actúa como un resistor que disipa toda la energía.

Matemáticamente la Impedancia Característica se expresa según la Ecuación 3.9:

$$Z_o = Z_L = \frac{E_s}{I_s} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

La Constante de Propagación, se utiliza para expresar la atenuación (o pérdida de la señal) y el desplazamiento de fase por unidad de longitud de la línea de transmisión. A medida que se propaga una onda a lo largo de una línea de transmisión, su amplitud se reduce con la distancia recorrida. La constante de propagación se utiliza para determinar la reducción de voltaje o corriente con la distancia, conforme una onda electromagnética se propaga a lo largo de la línea. Para una línea infinitamente larga, toda la potencia incidente se disipa en la resistencia del cable, conforme la onda se propague a través de la línea, de esta manera la línea se puede considerar como finita si la carga al final de la línea está acoplada, es decir que no se refleja ni se regresa energía hacia la fuente de la señal.

La constante de propagación se puede expresar matemáticamente como:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Donde γ es la Constante de Propagación, α es el Coeficiente de Atenuación (dB/Km), β es el Coeficiente de Desplazamiento de fase (rad/Km).

La constante de propagación es una constante definida por:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Debido a que la propagación de señales sobre líneas de potencia introduce atenuación que incrementa con la longitud y la frecuencia de la línea, la Impedancia característica y la Constante de Propagación pueden expresarse de la siguiente manera [28].

$$Z_o = Z_L = \frac{E_s}{I_s} = \sqrt{\frac{R(f) + j\omega L(f)}{G(f) + j\omega C(f)}} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$\gamma = \alpha(f) + j\beta(f) \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$\gamma(f) = \sqrt{(R(f) + j\omega L(f))(G(f) + j\omega C(f))} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Simplificando $\gamma(f)$ se obtiene:

$$\gamma(f) = \left(\frac{1}{2} \frac{R(f)}{ZL} + \frac{1}{2} G(f)ZL \right) + j\omega\sqrt{LC} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

De acuerdo a la teoría de líneas de transmisión la descripción del voltaje y de corriente a lo largo de una línea puede ser presentada de la siguiente manera (Figura 3.4):

$$U(x) = U_2 \cosh(\gamma \cdot x) + I_2 Z_L \sinh(\gamma \cdot x) \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$I(x) = I_2 \cosh(\gamma \cdot x) + \frac{U_2}{Z_L} \sinh(\gamma \cdot x) \quad \text{Ecuación 3.17}$$

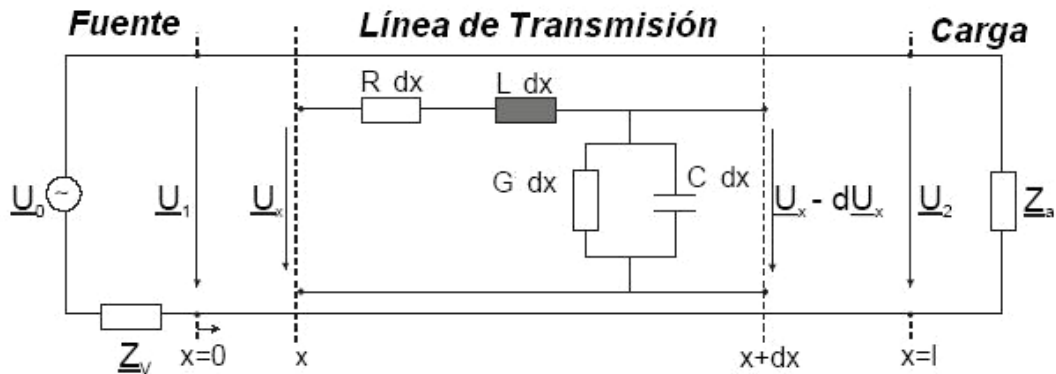


Figura 3.4. Propagación de la señal sobre una línea de transmisión [29]

Considerando el acople de una línea de transmisión, equivalente para estimar solamente la propagación de la onda desde la fuente al destino, la función de transferencia de una línea con longitud L puede ser formulada como [29]:

$$H(f) = \frac{U(x=1)}{U(x=0)} = e^{-\gamma(f)*L} = e^{-\alpha(f)*L} * e^{-\beta(f)*L} \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Los parámetros de cable C y L puede ser estimados mediante dimensiones geométricas y algunas propiedades del material, como lo indica la Figura 3.5, donde a es la separación entre los conductores y r es el radio del cable.

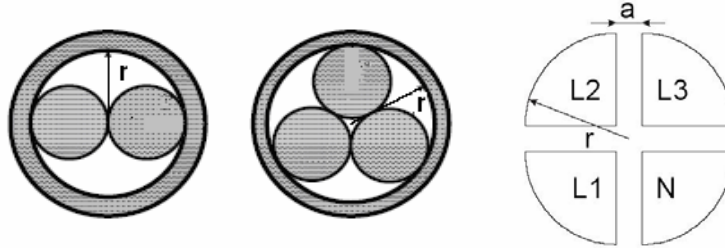


Figura 3.5. Sección transversal de un cable para línea eléctrica típica de 2, 3 y 4 conductores [29]

La inductancia y la capacitancia por unidad de longitud pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{r}{a} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{a}{r} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Considerando el rango de frecuencias sobre el que opera PLC, la resistencia por unidad de longitud R es dominada por el efecto skin o efecto pelicular y de esta manera es proporcional a \sqrt{f} [29].

$$R = \sqrt{\frac{\pi \mu_0}{kr^2} f} \rightarrow R \approx \sqrt{f} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

La conductancia por unidad de longitud G está principalmente influenciada por el factor de disipación del material dieléctrico (usualmente PVC¹⁴ (*Policlورو de Vinilo*)) y por lo tanto proporcional a f . Con un conductor circular de radio r , la conductancia por unidad de longitud es [29]:

$$G = 2\pi C \tan \delta \rightarrow G \approx f \quad \text{Ecuación 3.22}$$

¹⁴ PVC: Un tipo de plástico usado como material dieléctrico

Con la geometría típica y las propiedades del material, se tiene que $R(f) \ll \omega L(f)$ y $G(f) \ll \omega C(f)$ en el rango de la frecuencia de interés. Por lo tanto, los cables pueden tener un valor estimado de la impedancia característica Z_L expresado como [28]:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Para obtener la expresión de la parte real de la constante de propagación como una función directa de la frecuencia, se sustituye en la ecuación 3.15, la ecuación 3.21 donde μ_0 y k representan la constante de permeabilidad y la conductividad; respectivamente, la ecuación 3.22; y r el radio del cable.

$$\alpha(f) = \text{Re}(\gamma) = \frac{1}{2} \frac{1}{Z_L} \sqrt{\frac{\pi \mu_0}{k r^2}} f + \frac{Z_L}{2} f \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Como resultado de la sumatoria de los parámetros de cable (expresados como k_1 , k_2) y la parte imaginaria de la Constante de Propagación (expresada como k_3) se tiene:

$$\begin{aligned} \alpha(f) &= \text{Re}(\gamma) = k_1 \sqrt{f} + k_2 * f \\ \beta(f) &= \text{Im}(\gamma) = k_3 * f \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Basado en las derivaciones comenzando desde las suposiciones físicas y de acuerdo a diferentes investigaciones sobre las medidas de la respuesta en frecuencia de la parte real de la constante de propagación, las pérdidas en los cables o el factor de atenuación puede describirse mediante la siguiente ecuación [29]:

$$a(f) = a_0 + a_1 \cdot f^k \quad \text{Ecuación 3.26}$$

La cual es capaz de caracterizar la atenuación de los enlaces sobre líneas eléctricas típicos con solamente tres parámetros, que pueden ser derivados de las funciones de transferencia, y teniendo en cuenta que si la pérdida de propagación calculada arriba representa la pérdida del medio por unidad de longitud, entonces la atenuación sobre un medio está en función de la longitud d . Con (3.18) y (3.26), y de acuerdo a una selección de los parámetros a_0 , a_1 y k , la atenuación de un cable eléctrico (Power Line) puede ser caracterizado por [29]:

$$A(f, d) = e^{-\alpha(f)} = e^{-(a_0 + a_1 * f^K) * d} \quad \text{Ecuación 3.27}$$

Aunque la estructura de la ecuación 3.27 es derivada de efectos físicos, los parámetros a_0, a_1 y k no pueden ser fácilmente encontrados de acuerdo a los parámetros de cable (previamente conocidos). A pesar que es imposible obtener todos los cables necesarios y la geometría de los datos para redes reales, esto sin embargo, no limita el valor del modelo en práctica [28].

De acuerdo al análisis presentado en las ecuaciones anteriores, la ecuación 3.28 presenta el modelo del canal de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Factor de Carga}} \cdot \underbrace{e^{-(a_0 + a_1 * f^K) * d_i}}_{\text{Atenuación}} \cdot \underbrace{e^{-j 2 \pi f \tau_i}}_{\text{Retardo}} \quad \text{Ecuación 3.28}$$

Las medidas de las pérdidas de propagación sobre el espectro entero PLC pueden ser encontradas en [30].

3.3 Influencia de las constantes de las líneas eléctricas para sistemas PLC aéreos y subterráneos.

La diferencia entre los sistemas PLC aéreos y subterráneos radica en la dependencia de las constantes de capacitancia e impedancia, además de la distancia de separación entre los hilos conductores y la cantidad de corriente que va a circular por ellos. Para las líneas eléctricas aéreas la distancia entre los hilos conductores es diferente que para las líneas eléctricas subterráneas. Para la líneas aéreas el valor de D es aproximadamente igual a 0.6 mts, mientras que para las líneas subterráneas el valor de D es aproximadamente igual a 6 cm. El valor del diámetro del hilo conductor a , depende directamente de la cantidad de corriente eléctrica que va a circular por este.

El valor de la permitividad eléctrica ϵ toma valores de $(3 \text{ a } 7) \epsilon_0$ para líneas subterráneas y de $\epsilon = \epsilon_0$ para líneas aéreas. Este valor de permitividad es el parámetro más determinante de la velocidad de propagación.

En las líneas eléctricas subterráneas el efecto de proximidad es mayor, la resistencia R aumenta y por lo tanto hay mayor dispersión y distorsión.

3.4 Ruido en Sistemas PLC

Además del comportamiento del canal ante la variación de la frecuencia y los problemas de acoplamiento, se suman otros factores relevantes que afectan la transmisión adecuada de información sobre las líneas eléctricas, como lo son la atenuación de la señal debido a las pérdidas de los cables, al fenómeno de propagación de la señal por múltiples rutas, y un elemento importante que es la superposición de ruido a la señal transmitida, por parte del canal de comunicación.

En otros canales de comunicación diferente a powerline, la densidad de potencia espectral se mantiene constante sobre todo el espectro de transmisión. Esto no ocurre en las líneas eléctricas de comunicación, ya que no fueron diseñadas para este propósito y el medio se altera continuamente por diferentes fenómenos de ruido.

En estudios realizados sobre sistemas PLC, se ha logrado definir que el ambiente de ruido puede ser considerado como la sumatoria de cinco (5) tipos de ruido, que se distinguen según su origen, su tiempo de duración, la ocupación e intensidad del espectro, y su representación de la ocupación del espectro (Figura 3.6).

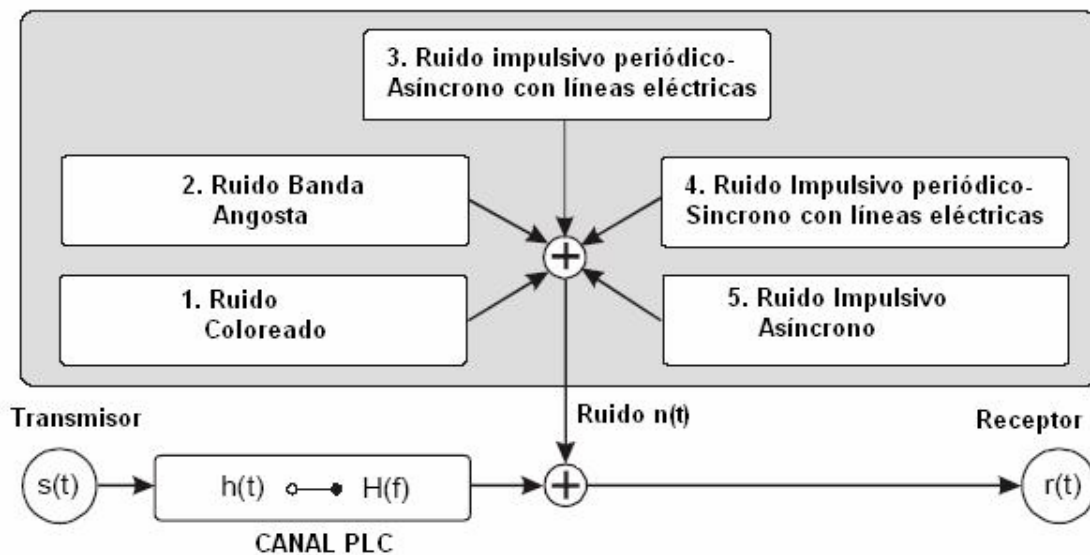


Figura 3.6. Clasificación de Ruido en ambientes powerline [31]

Los cinco (5) tipos de ruido pueden ser clasificados como:

- *Tipo 1: Ruido de Trasfondo Coloreado (Colored Background Noise).* Este tipo de ruido es causado por la suma de numerosas fuentes de ruido de baja intensidad, cuya variación es lenta en comparación con períodos

largos de tiempo (en términos de minutos u horas) [31]. Su PSD (*Power Spectral Density* - Densidad Espectral de Potencia) disminuye con el aumento de la frecuencia, con un promedio de 35 dB/decada en el rango de bajas frecuencias hasta 10 khz, y a una tasa baja en el rango de altas frecuencias y contrario al ruido blanco, el cual es un ruido aleatorio con una densidad espectral continua e independiente de la frecuencia [32].

- *Tipo 2: Ruido de portadoras de baja frecuencia (Narrowband Noise).* Es un ruido limitado a una porción pequeña de la banda de frecuencia. La causa de su significado es la penetración de estaciones de difusión de onda corta en el medio de transmisión. El nivel varía generalmente dependiendo del día: bajo en el día y alto en las noches debido a la reflexión en la atmósfera [32].
- *Tipo 3: Ruido Impulsivo Periódico, asíncrono con la frecuencia del suministro eléctrico.* La mayoría de tiempo, este tipo de ruido es causado por el suministro conmutado de potencia. Los pulsos en la mayoría de los casos tienen una tasa de repetición entre 50 Khz a 200 Khz, el cual resulta en un espectro de líneas discretas con un espaciado de frecuencia de acuerdo a la tasa de repetición [31].
- *Tipo 4: Ruido Impulsivo Periódico, síncrono con la frecuencia del suministro eléctrico.* Los impulsos están sincronizados con la frecuencia principal del suministro eléctrico (armónicos), con una tasa de repetición de 50 o 100 hz. Este tipo de ruido es causado por las operaciones del suministro eléctrico de forma sincrónica con el ciclo de las redes eléctricas. Son de corta duración (algunos microsegundos) [31].
- *Tipo 5: Ruido impulsivo asíncrono.* Con duración desde los microsegundos hasta los milisegundos con tiempos de llegada aleatorio. Estos impulsos son generados por los transientes conmutados en las redes. Se considera como el peor de los ruidos en el medio powerline, debido a su magnitud la cual puede fácilmente alcanzar decibeles por encima de los otros tipos de ruido. La densidad de potencia espectral de ruido de este tipo de ruido puede alcanzar valores de más de 50 dB por encima del ruido de trasfondo [31].

La Figura 3.7 muestra el comportamiento de la densidad de potencia espectral de cada uno de los tipos de ruido en un ambiente Powerline.

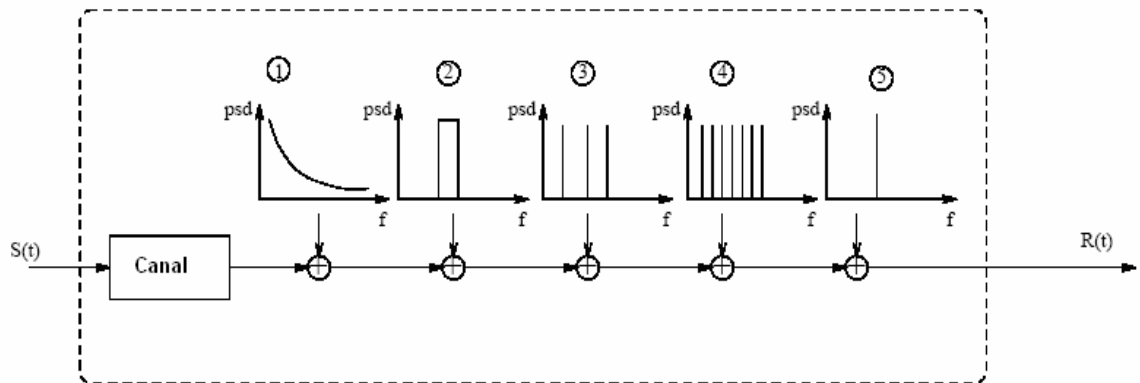


Figura 3.7. Ambiente de Ruido Aditivo en líneas Powerline [32]

De acuerdo las medidas obtenidas a través de diferentes investigaciones realizadas en el área, es posible clasificar los tipos de ruido de acuerdo a dos categorías importantes [31]:

- Ruido de Trasfondo Generalizado (Background Noise): donde están reunidos los tipos de ruido 1, 2 y 3 debido a que usualmente permanecen estacionarios por largos períodos de tiempo (segundos a minutos, incluso hasta horas).
- Ruido Impulsivo: donde están reunidos los tipos de ruido 4 y 5 y ocurren en intervalos de microsegundos a milisegundos. Se considera la causa principal de despliegue de errores en altas frecuencias, porque sus amplitudes son relativamente altas.

El ruido de trasfondo comprende el ruido coloreado, el ruido de portadoras de baja frecuencia y el ruido impulsivo periódico con tasas de repetición más altas que la frecuencia de la red eléctrica.

De acuerdo a la Figura 3.8, se observa que el ingreso de ruido al canal, producido por estaciones de difusión se hace bastante obvio y afecta ciertas bandas de frecuencia, entre las cuales se tiene desde 5.95 a 6.95 Mhz, 7.2 a 7.5Mhz, 9.4 a 10.1Mhz y de 11.8 a 12.1 Mhz. El ingreso de las estaciones de difusión usualmente tiene más altas amplitudes en horas de la noche, cuando las condiciones de propagación para radio de onda corta son buenas. Durante el día, este tipo de ruido es usualmente mucho más bajo [31].

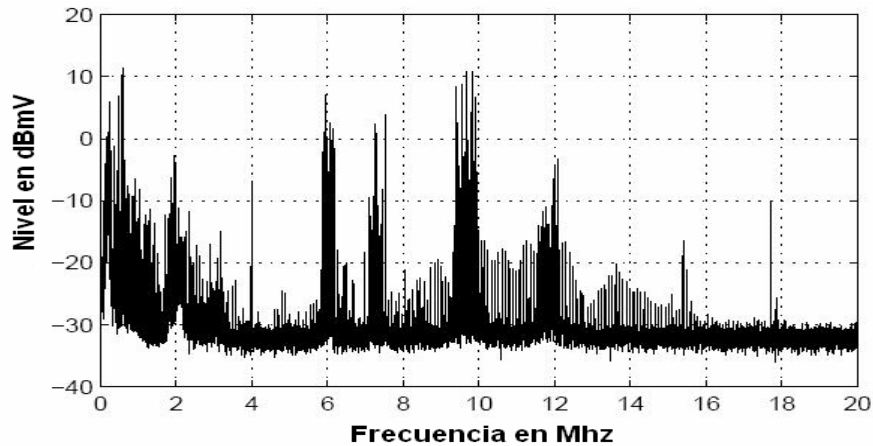


Figura 3.8. Medidas del análisis espectral del ruido de transfondo

En el rango por debajo de 2 Mhz y sus alrededores se puede observar el ruido coloreado, el cual está por encima de la cuantización del ruido blanco. Entre los 10 y los 15 Mhz se pueden detectar líneas igualmente espaciadas, con amplitudes que varían. Un análisis más detallado de esas líneas revela un espaciamiento de 100 khz, correspondiente al ruido impulsivo periódico con una repetición de 10 microsegundos (μ s) el cual puede ser detectado en el dominio del tiempo.

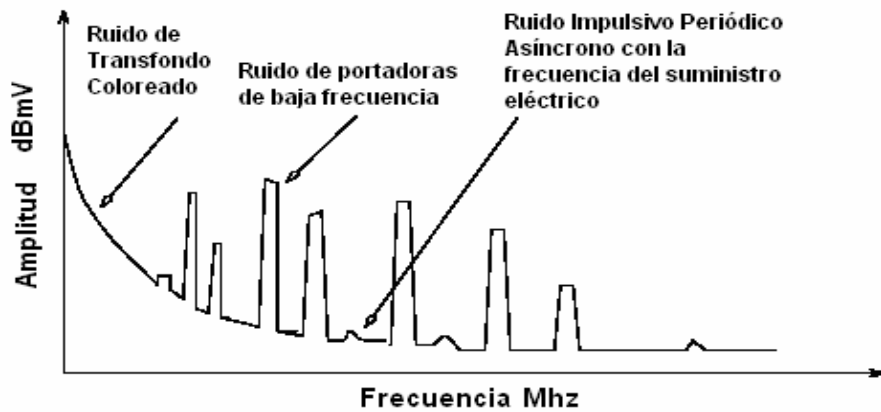


Figura 3.9. Modelo de densidad espectral para el ruido para el ruido de transfondo general [32]

A través de las diferentes investigaciones y medidas de ruido en ambientes residenciales e industriales, es posible encontrar aproximaciones para el ruido de trasfondo generalizado cuya densidad de potencia espectral del ruido de trasfondo puede ser descrita por la ecuación (3.29) y (3.30) para ambientes residenciales e industriales respectivamente; [27]:

$$N_{BN}(f) = -35 + 35 \cdot e^{-\left(\frac{f(\text{MHZ})}{3.6}\right)}, \text{ para ambientes residenciales} \quad \text{Ecuación 3.29}$$

$$N_{BN}(f) = -33 + 40 \cdot e^{-\left(\frac{f(\text{MHZ})}{8.6}\right)}, \text{ para ambientes industriales} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

Mientras que el ruido de trasfondo es estacionario durante segundos, minutos u horas, el ruido impulsivo causa variación del comportamiento del canal powerline en un rango de tiempo corto. Este ruido generalmente es causado por transientes conmutados.

Los eventos impulsivos asíncronos típicos son causados por transientes de conmutación en cualquier parte de la red powerline. Los eventos tienen formas frecuentes, similares a sinusoides amortiguadas o sinusoides revestidos amortiguadas (o sobrelapadas) [31]. En la Figura 3.10 se muestra en el dominio del tiempo dos señales impulso. El impulso 1 que tiene una forma de un borde agudo en aumento seguido por la oscilación amortiguada. Su duración completa está alrededor de los 50 μs . El impulso 2 no muestra una estructura tan clara. Su amplitud está alrededor de 0.1 V y su completa duración está alrededor de 90 μs con una finalización abrupta.

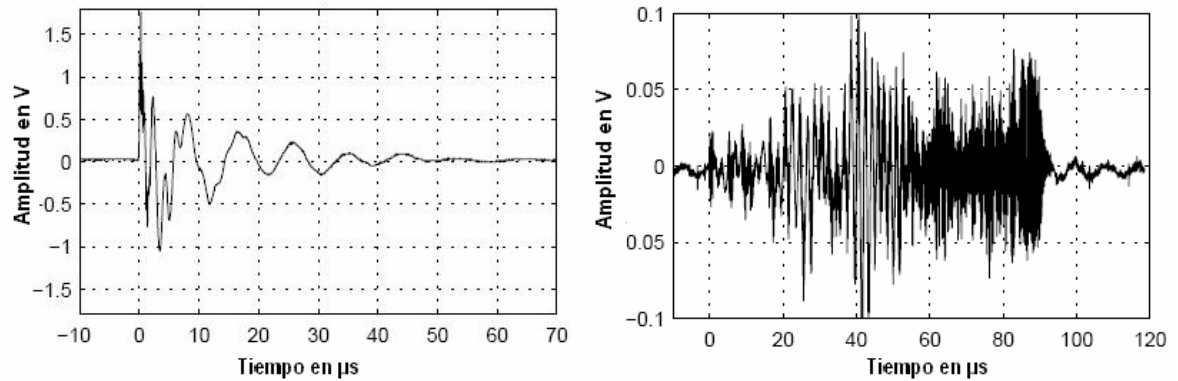


Figura 3.10. Señal en el dominio del tiempo de dos eventos impulsivos [31]

Debido al alto impacto del ruido impulsivo sobre la transmisión de datos, se hace necesario un modelo que permita obtener de forma estadística la probabilidad del ancho del impulso, su amplitud y su intervalo entre llegadas. Para lograr esto una aproximación al modelo de impulsos se obtiene mediante un tren de pulsos generalizados $imp(t)$ con una unidad de amplitud y de ancho. El tren de impulsos $n_{imp}(t)$ con ancho de pulso t_w , amplitud de pulso A y tiempo entre llegadas t_{arr} puede ser descrito como [31]:

$$n_{\text{Imp}}(t) = \sum_i A_i \text{imp} \left(\frac{t - t_{\text{arr},i}}{t_{w,i}} \right) \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Los parámetros A_i , t_w , y t_{arr} son variables aleatorias, cuyas propiedades estadísticas pueden ser investigadas por análisis de medidas. Los impulsos medidos han mostrado que el 90 % de sus amplitudes están entre 100 y 200 mV. Solamente menos de 1 % excede una amplitud máxima de 2 V. Las medidas del ancho de impulso t_w han demostrado que sólo el 1% de los impulsos medidos han excedido un ancho de 500 μ s y sólo 0.2% de ellos exceden 1 ms. Finalmente, los intervalos de llegada que separan dos impulsos sucesivos están por debajo de 200 ms por más del 90 % de los impulsos registrados. Otra medida más detallada muestra que alrededor de 30 % de los pulsos detectados tienen un tiempo entre llegadas de 10 o 20 ms, el cual representa el ruido impulsivo que es sincrónico con la frecuencia de la red de suministro eléctrico, ruido tipo 3. Los tiempos entre llegadas, situados por debajo de 200 ms, tienen una distribución exponencial [31].

3.5 Capacidad del canal

La capacidad del canal es un factor de gran importancia en un sistema de telecomunicaciones, ya que permite evaluar la calidad de un servicio y la tecnología utilizada de acuerdo a las necesidades del usuario.

La capacidad de un canal de comunicación puede definirse como la tasa límite de datos libre de errores a la que un sistema de telecomunicaciones puede operar sin perder información.

3.5.1 Capacidad del canal Powerline

De acuerdo a diferentes análisis teóricos, la capacidad para un canal de banda limitada, en el que se presenta AWGN (*Additive White Gaussian Noise* - Ruido Blanco Gaussiano Aditivo) puede ser dada por la siguiente expresión [33]:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S_R}{N} \right) \quad \text{Ecuación 3.32}$$

Donde B es el ancho de banda del canal y S_R / N representa la relación señal a ruido en el receptor. De acuerdo a la ecuación anterior, la capacidad del canal puede

expresarse en términos de la función de transferencia del canal ($H(f)$), de la potencia espectral de la señal recibida ($\phi_{RR}(f)$) y de la densidad de potencia espectral de ruido ($\phi_{NN}(f)$), como lo indica la Ecuación 3.33 [33]:

$$C = \int_{f.en.B} \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\phi_{RR}(f)}{\phi_{NN}(f)} \right) df \quad \text{Ecuación 3.33}$$

Donde $\phi_{RR}(f)$ es el resultado de la señal transmitida sometida a los efectos del canal, expresada como:

$$\phi_{RR}(f) = \phi_{TT}(f) |H(f)|^2 \quad \text{Ecuación 3.34}$$

Donde se obtiene que:

$$C = \int_{f.en.B} \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\phi_{TT}(f) |H(f)|^2}{\phi_{NN}(f)} \right) df \quad \text{Ecuación 3.35}$$

Para determinar la capacidad instantánea de un canal, este es separado en N subcanales de banda angosta con desvanecimiento plano $\Delta f = B/N$, donde N también representa el número de muestras medidas de la función de transferencia y de la densidad de potencia espectral de ruido. La capacidad completa del canal puede determinarse mediante la suma de la capacidad de cada uno de los subcanales, y puede ser expresada de acuerdo a la Ecuación 3.36 [33].

$$C \approx \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{\phi_{TT}(vf) |H(vf)|^2}{\phi_{NN}(vf)} \right) df \quad \text{Ecuación 3.36}$$

Donde v significa la función de transferencia medida de acuerdo al número N de muestras tomadas para la función de transferencia y la densidad espectral de ruido

Las muestras de la densidad de potencia espectral de la señal transmitida $\phi_{TT}(vf)$ se determinan usando el algoritmo “water-pouring”. Este algoritmo permite determinar la distribución de la potencia de transmisión óptima de cada uno de los subcanales [34].

Dada la potencia de transmisión promedio total P, la densidad de potencia espectral óptima puede ser escrita como [34]:

$$\phi_{TT, \text{óptima}} = \begin{cases} L - \frac{\phi_{NN}(f)}{|H(f)|^2}, \dots \{f \cdot \varepsilon \cdot B\} \\ 0 \dots \text{otra.caso} \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.37}$$

Donde P es:

$$P = \int_B \phi_{TT, \text{óptima}}(f) df \quad \text{Ecuación 3.38}$$

B es la región de integración donde $\phi_{TT, \text{óptima}}(f)$ es positiva, y L es un parámetro que depende implícitamente de la potencia máxima especificada por [34]:

$$L = \frac{1}{B} \left\{ P + \int_B \frac{\phi_{NN}(f)}{|H(f)|^2} df \right\} \quad \text{Ecuación 3.39}$$

La Ecuación 3.40 utilizando la optimización dada por la ecuación anterior quedaría representada como:

$$C_{\text{óptima}} = \frac{1}{2} \int_B \log_2 \left(\frac{L|H(f)|^2}{\phi_{NN}(f)} \right) df \quad \text{Ecuación 3.40}$$

Que representa la expresión para la capacidad total óptima del canal.

3.5.2 Capacidades de un Canal de acceso PLC Indoor

Para determinar la capacidad de un canal PLC Indoor en un sistema de baja tensión es necesario conocer o especificar una medida de la función de transferencia del canal y una medida de la Densidad de Potencia Espectral del ruido sobre el canal PLC. De acuerdo a funciones de transferencia obtenidas a partir de pruebas de laboratorio [33] (realizadas entre dos enchufes, utilizando un analizador de red para medir la función de transferencia y un analizador de espectro para medir la densidad de potencia espectral) las funciones de transferencia medidas mostraron grandes diferencias en el promedio y la selectividad de la atenuación en frecuencia.

La Figura 3.11, muestra tres ejemplos de medidas obtenidas a partir de las funciones de transferencia PLC, que se clasifican en las categorías: *bueno*, *promedio*, y *por debajo del promedio*.

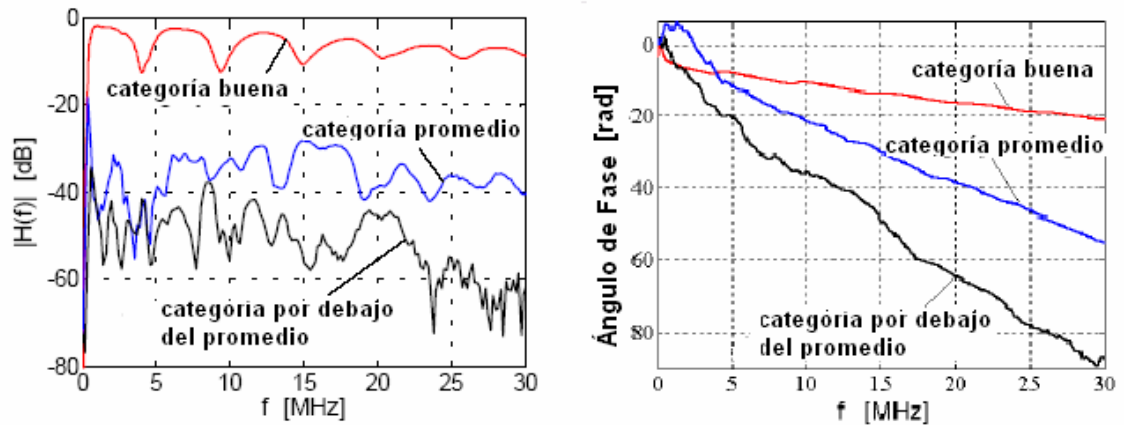


Figura 3.11. Funciones de Transferencia de tres canales PLC (Espectro de amplitud y ángulo de fase) [33]

Con el incremento de la distancia entre los dos enchufes medidos, la atenuación a frecuencias más altas incrementa más que la atenuación a frecuencias bajas. Pero la atenuación no sólo depende de la distancia entre los enchufes usados sino también del suministro de esos enchufes [33].

La Figura 3.12 muestra un suministro eléctrico típico de una casa en Alemania, el cual suministra corriente a través de tres (3) conductores (L1, L2, L3) y un conductor neutral (que no se muestra en la Figura).

En la prueba, un enchufe normal se conecta a uno de los conductores de fase y el otro al conductor neutral formando el circuito por donde se transmite la señal PLC para obtener las medidas correspondientes.

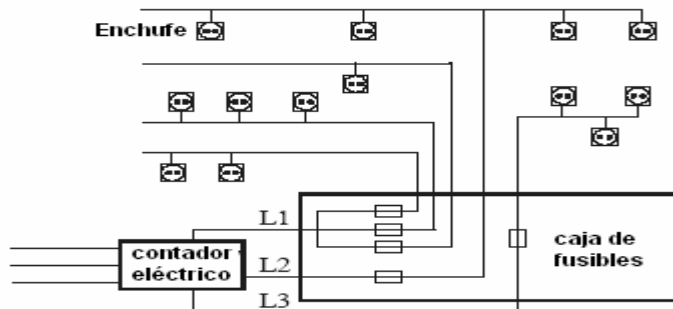


Figura 3.12. Suministro de potencia de un apartamento o casa [33].

Utilizando una distancia constante entre los enchufes, se encuentra la más baja atenuación si los enchufes se alimentan por el mismo conductor de fase y además el circuito se encuentra protegido por el mismo fusible. Si se utilizan diferentes fusibles las pérdidas se incrementan. Si los enchufes se alimentan por diferentes conductores de fase la atenuación es más alta. Adicionalmente, la atenuación selectiva en frecuencia depende del ambiente, que está determinado por los dispositivos que están conectados a la línea y por los enchufes que no están utilizados (abiertos) y que se encuentran cerca al par de enchufes de prueba [33].

Este es un resultado de las reflexiones generadas por enchufes abiertos y la falta de acoplamiento de las cargas conectadas y que son dependientes de la frecuencia de la función de transferencia.

La Figura 3.13 muestra la variación del espectro de amplitud de la función de transferencia PLC con respecto al tiempo. De acuerdo a estas medidas la función de transferencia de un canal PLC se puede considerar cuasi-estática, ya que esta varía lentamente con el tiempo si la modificación de la topología no se altera constantemente respecto a la proximidad de los enchufes de prueba (por ejemplo un dispositivo eléctrico conectado en un canal PLC cercano a los puntos de prueba).

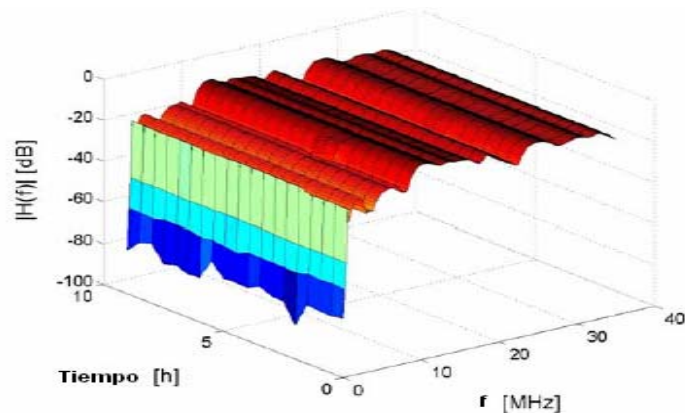


Figura 3.13 Variación del espectro de amplitud de una función de transferencia del canal con respecto al tiempo (8 horas) [33].

En la Figura 3.14 (a y b) se muestran las medidas de ruido de los canales PLC. El uso de dispositivos eléctricos (tal como un taladro, una aspiradora, secadores de pelo, etc.) es uno de los principales motivos de perturbaciones en los canales PLC (Figura 3.14a). Otras razones son las interferencias provocadas por los transmisores de radio (onda media y corta) y estaciones de radio. El diagrama de la Figura 3.14b presenta un espectro de densidad de potencia de ruido típica de un canal PLC.

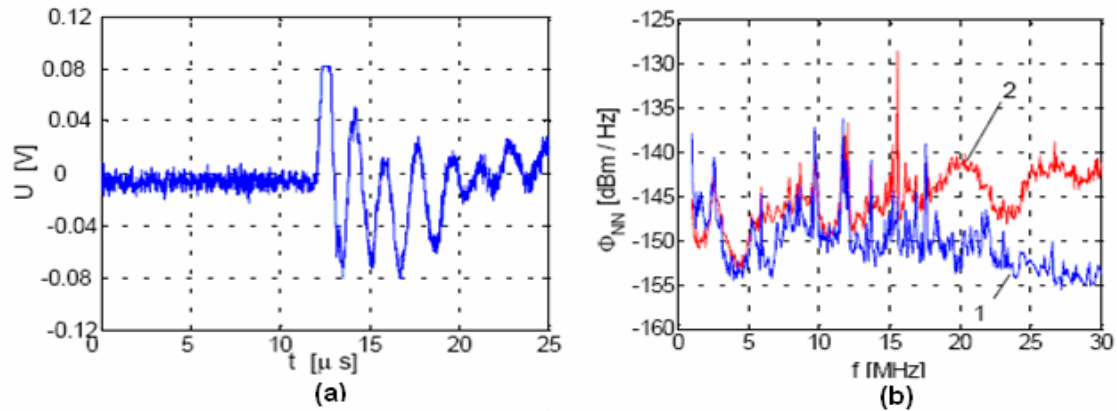


Figura 3.14. Medida en función del tiempo de un taladro eléctrico (a) y medida de la densidad de potencia espectral de ruido de un canal plc con un taladro eléctrico (2) y sin él (1) [33].

3.5.3 Tasas de bit alcanzadas en un ambiente Indoor (interno)

Las tasas de bit alcanzadas de acuerdo al circuito de prueba que hace uso de 2 enchufes usando un conductor de fase y el conductor neutro se muestran a continuación.

La Figura 3.15 muestra las Funciones de Distribución Acumulativas (*CDF - Cumulative Distribution Functions*) de la capacidad instantánea de canal con 430 canales PLC internos asignados a las tres categorías del canal. La potencia total usada es 0.4 V^2 , por ejemplo 8mW a 50 Ω (con densidad de potencia promedio de $1.38 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{Hz}$) [33].

Los canales se aplican en un ambiente de oficina y en dos edificios residenciales diferentes. La clasificación en las tres categorías se realiza para evaluar la atenuación de acuerdo a las funciones de transferencia del canal (Figura 3.11).

La función de transferencia es quisi estática y por lo tanto las características del canal PLC también se mantienen cuasi-estáticas. En una oficina o en un apartamento es posible encontrar las tres categorías de la función de transferencia si se logra que el mismo conductor de fase alimente los dos enchufes [33].

Para la categoría “por debajo del promedio” alrededor del 50% de los canales analizados tienen una capacidad de canal de mínimo 100 Mbits/s. Sólo el 3% obtiene un valor por debajo de 38 Mbits/s. Las capacidades bajas en esta categoría

son originadas por alta atenuación como resultado de las largas distancias o el uso de diferentes conductores de fase [33].

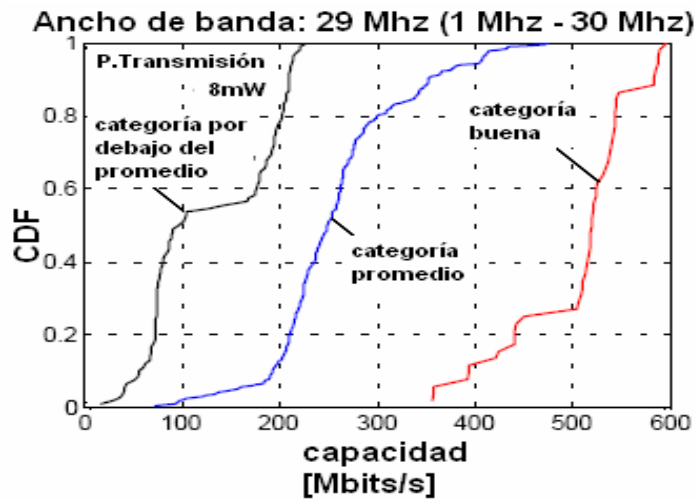


Figura 3.15. Funciones de distribución acumulativas de capacidad de canales PLC. Categoría buena 61 canales, promedio 259 canales y por debajo del promedio 110 canales [33]

La Figura 3.16 muestra una comparación de las capacidades del canal en un apartamento y en una oficina.

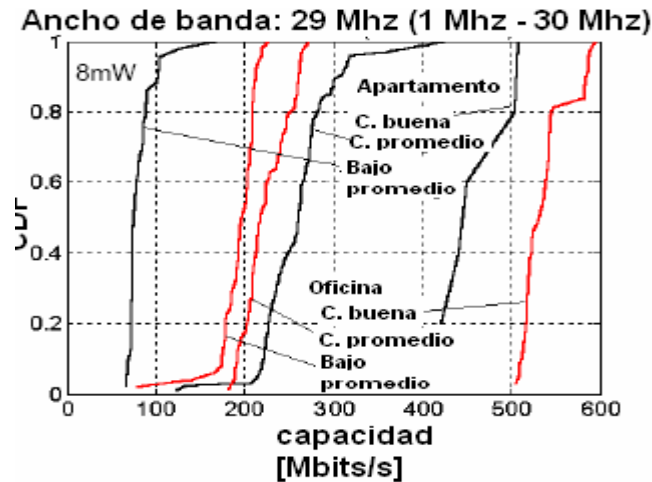


Figura 3.16. Comparación de capacidades de canal de un ambiente en un apartamento (142 canales) y un ambiente de oficina (166 canales) [33]

En el apartamento la mayoría de las densidades de potencia de ruido medidas fueron más altas que en la oficina. Una razón de esto es, que en la oficina cada habitación tiene sus propios fusibles, en contraste al apartamento [33].

En PLC se considera hasta 10 Mhz el ambiente Indoor (interno) y por encima de este valor un ambiente outdoor (externo). Como las medidas se realizaron en el espectro de operación PLC (1-30 Mhz) esto conduce a afirmar que las capacidades presentadas para el ambiente indoor están alrededor de 66 % de las capacidades presentadas por las Figuras 3.15 y 3.16

La Figura 3.17 muestra la variación en el tiempo de la capacidad instantánea de un canal PLC. La capacidad es fuertemente influenciada por el ruido.

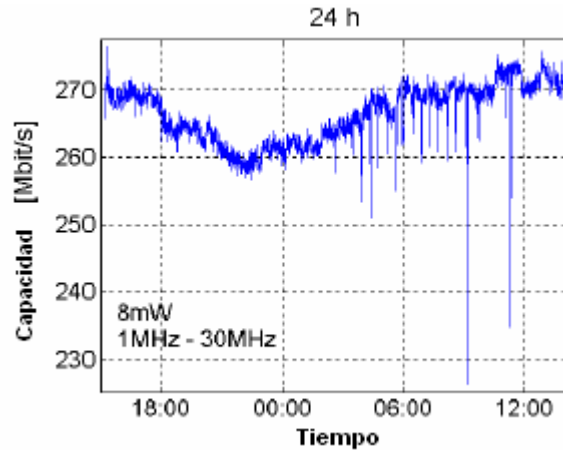


Figura 3.17. Variación de la capacidad de un canal PLC en el tiempo

3.5.4 Tasa de datos alcanzable

En esta sección se presentan las tasas de datos alcanzadas para diferentes modulaciones con una probabilidad de error de bit por debajo de 10^{-4} . La potencia de transmisión utilizada es $0.4V^2$ o 8mW a 50 Ω , el ancho de banda de 29 Mhz, y la densidad de potencia constante de $1.38 \cdot 10^{-8} V^2/Hz$ asumida [33].

Los alfabetos de símbolos considerados son los siguientes: 2PSK, 4PSK, 8PSK, 16 QAM¹⁵ (*Quadrature Amplitude Modulation*) y 64 QAM¹⁶. Para cada subcanal se calcula la relación señal a ruido y la probabilidad de error. Si la probabilidad de error está por debajo de 10^{-4} la tasa de datos se incrementa de acuerdo al alfabeto de símbolo considerado [33].

¹⁵ 16 - QAM: Variación Modulación en Amplitud por Cuadratura, donde existen 16 posibles valores de salida.

¹⁶ 64 - QAM: Variación Modulación en Amplitud por Cuadratura, donde existen 64 posibles valores de salida.

La Figura 3.18 muestra la tasa de datos alcanzable para las tres categorías de canales PLC, bajo la suposición que en cada sub-canal se usa el alfabeto de símbolo considerado, que conduce a la tasa de datos máxima con una probabilidad de error de bit por debajo de 10^{-4} . El tipo de modulación utilizada es adaptativa, es decir que conoce previamente el comportamiento del canal [33].

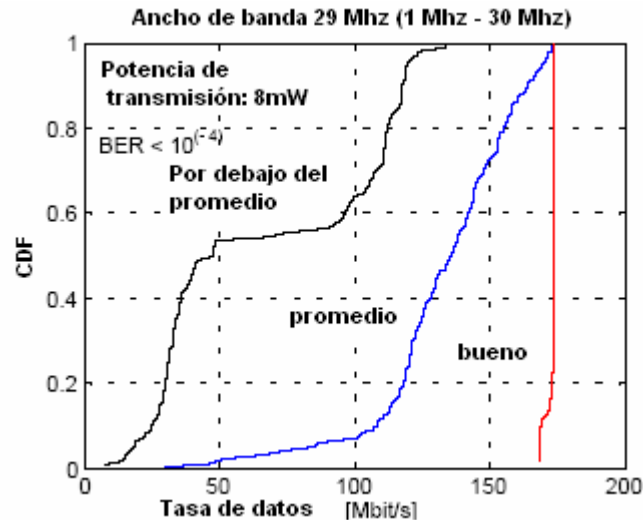


Figura 3.18. Esquema CDF de las tasas de bit alcanzables para modulación adaptativa [33].

Esto conduce a tasas de datos entre 168 y 174 Mbps para la categoría “buena”; y más de 45% de canales PLC logran una tasa de más de 50 Mbps para la categoría “por debajo del promedio”, sólo menos de 3 % están a 15 Mbps.

En la Figura 3.19 se realiza una comparación de las tasas de datos para diferentes alfabetos de símbolos. El mismo alfabeto es aplicado para cada subcanal (el transmisor no necesita conocer el canal).

En este caso no se usa ninguna clasificación de las categorías del canal. Únicamente se consideran 430 canales PLC. El resultado obtenido muestra que para 64 QAM alrededor del 44 % de los canales conducen a tasas de datos más altas que para 16 QAM (con una probabilidad de error de bit de 10^{-4}). Usando 4-QAM para 72 % de los canales la tasa alcanzada está entre 50 y 58 Mbps [33].

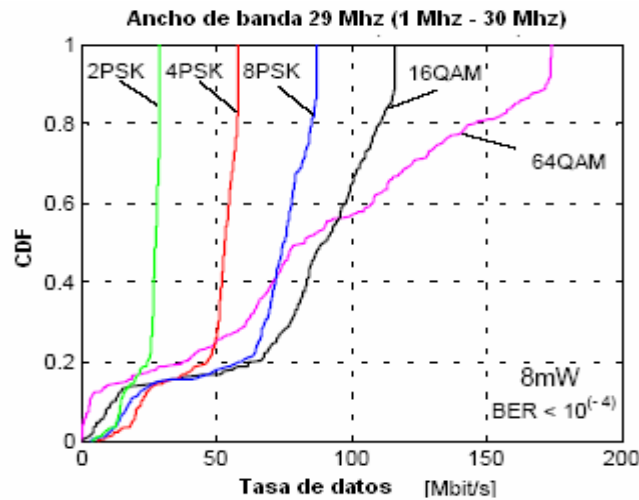


Figura 3.19. Esquema CDF de las tasas de bit alcanzables [33].

3.6 Consideraciones Electromagnéticas

La tecnología PLC usa la red eléctrica para transmitir señales de información. Desde el punto de vista electromagnético, la inyección de la señal de comunicación de datos en los cables eléctricos, produce efectos de radiación de campos electromagnéticos en el medio ambiente, llevando a que los cables eléctricos se comporten como antenas. Este campo electromagnético es visto como una perturbación desde y hacia los demás dispositivos y sistemas de comunicación que hacen uso del espectro radioeléctrico, como lo son los sistemas inalámbricos y en especial los sistemas de Radio de Alta Frecuencia (HF). Para evitar que PLC afecte los sistemas existentes que operan en rangos de frecuencia similares, existen diferentes organismos encargados de controlar las emisiones producidas por las redes de comunicación eléctrica powerline, facilitando la compatibilidad electromagnética entre los sistemas sin alterar la funcionalidad de los mismos. Las medidas sobre las emisiones de los campos, permiten contribuir con los esfuerzos de estandarización para la tecnología PLC que aún no está reglamentada.

3.6.1 Compatibilidad y Susceptibilidad Electromagnética

La EMC es la capacidad de un dispositivo o sistema para operar satisfactoriamente en un ambiente electromagnético sin introducir alteraciones electromagnéticas intolerables, en forma de interferencias, que pueda afectar a algún otro sistema en ese ambiente, incluso hasta el mismo [35]. La compatibilidad significa vivir en armonía con otros.

Desde el punto de vista Electro-Magnético (*EM - Electromagnetic*), la EMC puede expresarse en dos aspectos [36]:

- *Operar satisfactoriamente*, es decir que los equipos sean tolerables con otros. El equipo no es susceptible a las señales electromagnéticas que otros equipos colocan en el ambiente. Este aspecto de EMC es denominado *Susceptibilidad Electromagnética (EMS- Electromagnetic Susceptibility)*.
- *Sin que produzca alteraciones intolerables*, es decir que el equipo no cause molestia a otros equipos. La emisión de señales EM por parte de los equipos no causa problemas de interferencia electromagnética en otros equipos que están presentes. Este comportamiento EM es denominado *Emisión Electromagnética (EME - Electromagnetic Emission)*.

La susceptibilidad electromagnética es un factor inherente a la compatibilidad electromagnética y puede ser analizado como una forma de inmunidad. La susceptibilidad es una característica fundamental de una pieza del equipo que puede encontrar un ambiente electromagnético que afecte desfavorablemente su funcionalidad. La inmunidad, en cierta forma, indica la proporción del ambiente que puede estar contaminado antes de que el equipo sea afectado perjudicialmente.

Por otra parte, se puede definir una Interferencia Electromagnética (*EMI - Electromagnetic Interference*) como la emisión de energía electromagnética que degrada o perjudica la calidad de una señal o el funcionamiento de un sistema [35].

3.6.2 Interferencia Electromagnética

En un principio la EMI surgió como un problema serio en los sistemas de telecomunicaciones (especialmente en sistemas de multidifusión). Hoy en día, este factor ha permitido mejorar los estándares de facto de los diseños de los dispositivos que comúnmente operan en ambientes electromagnéticos, facilitando los estudios pertinentes antes de que estos dispositivos sean producidos a alta escala.

La Comisión Internacional Electrotécnica (*IEC - International Electrotechnical Commission*) de estandarización definió la EMI como “una degradación del funcionamiento de un dispositivo o sistema por una alteración electromagnética”

[37]. Esto significa que el problema de EMC puede básicamente ser modelado en tres partes; como lo ilustrado en la Figura 3.20:

- Una fuente de fenómeno electromagnético, emitiendo energía electromagnética;
- Una víctima susceptible a esa energía EM que no pueda funcionar adecuadamente debido al fenómeno EM; y
- Una ruta entre la fuente y la víctima, llamada *ruta de acople*, la cual permite a la fuente interferir con la víctima.



Figura 3.20. Modelo Básico de un problema electromagnético [35]

En la práctica, una fuente puede simultáneamente perturbar varias partes del equipo y diferentes fuentes pueden también perturbar sólo una simple parte del equipo. Sin embargo, el modelo básico para la investigación de los problemas EMC (Figura 3.20) permite llegar a la conclusión que si uno de esos tres elementos está ausente, el problema de interferencia es resuelto. Por esta razón, si una fuente de perturbación está causando muchos problemas, se hace necesario suprimir esa fuente, y esto se logra, si se bloquea la ruta de acople a la fuente. Sin embargo, muchas de las fuentes de perturbación no pueden ser atenuadas, como por ejemplo, los transmisores de multidifusión, y por lo tanto la solución más óptima es bloquear su ruta de acople modificando las condiciones del dispositivo afectado [35].

Se puede deducir que las tres vías para eliminar las interferencias son [35]:

- Suprimir la emisión de la fuente.
- Hacer el camino de acoplamiento poco efectivo.
- Hacer el receptor menos sensible a las emisiones.

La mejor solución es la primera, aunque no siempre es posible identificar la fuente de perturbación y algunas veces no es posible eliminarlas ya que son señales activas del sistema, como por ejemplo el reloj de un sistema digital. En estos casos

sólo se puede actuar sobre el camino de acoplamiento o haciendo la víctima más inmune.

3.6.3 Clasificación de Alteraciones Electromagnéticas

Existen dos tipos de fuentes de interferencias electromagnéticas, las que se pueden considerar como fuentes de EMIs naturales y fuentes de EMIs que aparecen debido a la acción del hombre. Como fuentes de EMIs naturales se encuentran los relámpagos que pueden llegar a ofrecer descargas de hasta 10 KV (*kilo Volt* - Kilo Voltio) o efectos solares que afectan a la ionosfera. Como fuentes de EMIs debido a la acción del hombre se encuentran [38]:

- Las descargas electrostáticas.
- Sistemas eléctricos y electrónicos.
- Elementos de telecomunicaciones.
- Pulsos electromagnéticos (explosión nuclear, corrientes de 10 kilo Amperios).

Las alteraciones electromagnéticas producidas por un dispositivo eléctrico no son sencillas de describir, especificar o analizar de forma precisa, pero existen algunos métodos generales para clasificarlos mediante principios básicos de algunas de las características de las señales afectadas. Generalmente, su forma, su contenido de frecuencia, su duración, y su modo de transmisión suministran el principio básico para la clasificación de las alteraciones electromagnéticas.

Según el medio de propagación que utilice la perturbación o interferencia electromagnética para perjudicar el funcionamiento de un equipo o la calidad de una señal y de acuerdo al método de acople desde la fuente al receptor, se puede establecer una clasificación de interferencia electromagnética como [35]:

- EMI Guiado o Conducido (corriente eléctrica).
- EMI propagadas por Acoplamiento por inducción (campo magnético),
- EMI propagadas por Acoplamiento capacitivo (campo eléctrico), y
- EMI Radiadas (campo electromagnético).

Las EMIs conducidas se propagan a través de los cables ya sean de alimentación, de señal o tierra, y su contenido frecuencial nunca superará los 30 Mhz.

Las EMIs por acoplamiento se asocian a la discontinuidad causada por la fuente y se localizan cerca del acoplamiento entre la fuente de señal y el medio de transmisión. No son la principal causa de la interferencia PLC [17]. Las EMI propagadas por acoplamiento capacitivo se producen por efecto de campo eléctrico. Su principal fuente son los puntos donde haya grandes variaciones de tensión respecto al tiempo. En cuanto a las EMI propagadas por acoplamiento inductivo se producen por efecto del campo magnético. Su principal fuente son los bucles de intensidad que presentan grandes derivadas respecto al tiempo [35].

Las EMI radiadas se deben a la generación de ondas electromagnéticas. Se consideran radiadas y no acoplados cuando la distancia entre la fuente y la víctima es superior a la mitad de la longitud de onda de la interferencia.

Las rutas de acople frecuentemente usan una combinación compleja de esas categorías haciendo que la ruta sea difícil de identificar aún si la fuente y el receptor son bien conocidos.

Otra forma de categorizar las alteraciones electromagnéticas es mediante el principio básico de tres parámetros: la duración, la tasa de repetición y el ciclo duty [39].

3.6.3.1 EMI Conducidas

Responsable de transportar la señal de energía a lo largo de un hilo. El aspecto es que la interferencia asociada a este tipo de perturbación, decrece rápidamente en dirección perpendicular al hilo, pero lentamente a lo largo de su longitud [17].

Las EMI conducidas pueden aparecer en modo diferencial cuando se propagan sólo por conductores activos del sistema, o en modo común cuando se propagan por los conductores activos y la tierra del sistema (Figura 3.21).

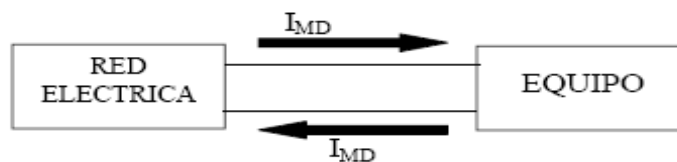


Figura 3.21. EMI en modo diferencial [35]

Las interferencias en modo común (Figura 3.22) se propagan principalmente por acoplamientos capacitivos, por el cual los puntos de interés son aquellos en los voltajes diferenciales dv/dt [35].

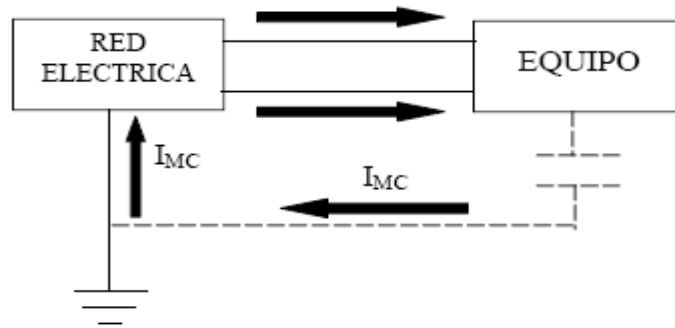


Figura 3.22. EMI en modo común [35]

Una forma correcta de conectar diferentes circuitos a una misma fuente de alimentación, permite reducir las emisiones conducidas evitando que las interferencias producidas por un circuito, afecten a otros circuitos. Esto se logra si los circuitos no comparten los mismos caminos de alimentación, como se puede observar en la Figura 3.23 [35].

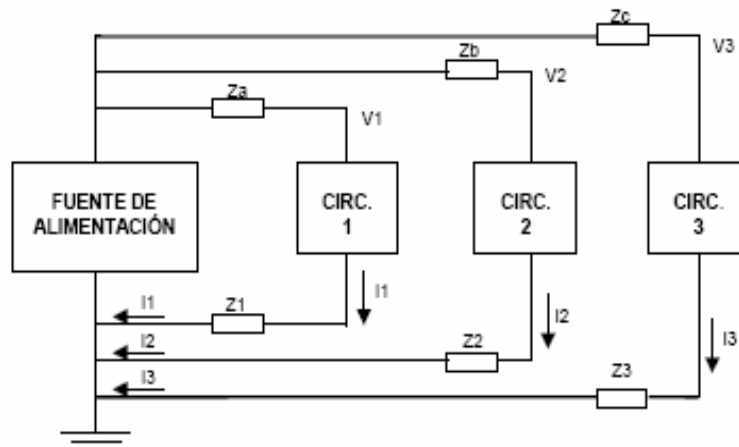


Figura 3.23. Ejemplo de una buena conexión de diferentes circuitos a una línea de alimentación [35]

3.6.3.2 EMI por Acoplamiento Capacitivo.

Este acoplamiento también se denomina *diafonía capacitiva*. El principio teórico se puede resumir de la siguiente manera: “si el campo eléctrico generado por una fuente de tensión aplicada entre dos conductores, atraviesa otro conductor cercano (víctima), se inducirá en él una corriente parásita, la cual podrá provocar a la vez una tensión parásita” [35].

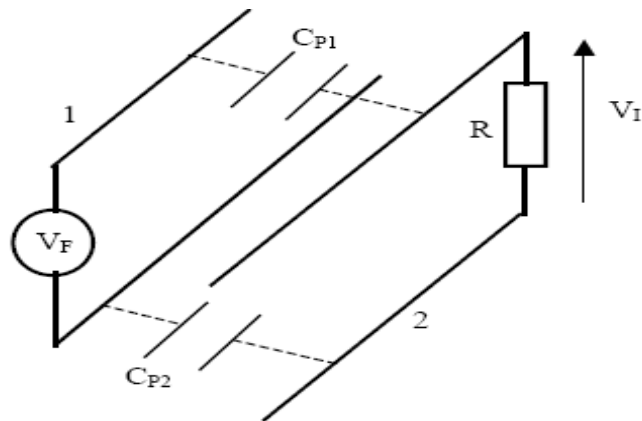


Figura 3.24. Ejemplo de Acoplamiento capacitivo [35]

En la Figura 3.24 se puede observar un ejemplo de acoplamiento capacitivo. Si aplicamos una diferencia de potencial V_F al circuito 1, se inducirá una corriente parásita al circuito 2 que se cerrará a través de la resistencia R y las capacidades parásitas entre los conductores 1 y 2 (C_{P1} y C_{P2}). Aproximadamente el valor de la tensión inducida V_I estará dada por:

$$V_I = R \cdot C \frac{dV_F}{dt} \quad \text{Ecuación 3.41}$$

$$\frac{1}{C_T} \cong \frac{1}{C_{P1}} + \frac{1}{C_{P2}}$$

Se observa que la tensión inducida será mayor:

- Cuando mayor sea la variación respecto al tiempo de V_F , o cuando mayor sea su frecuencia.
- Cuando menor sea la distancia entre el conductor fuente y el conductor víctima.
- Cuando menor sea la longitud de los dos circuitos enfrentados (capacidad de un condensador plano).

La forma de reducir la diafonía capacitiva es utilizar cables apantallados, ya que el campo eléctrico no atraviesa una pantalla conductora.

3.6.3.3 EMI por Acoplamiento Inductivo.

También es denominada diafonía inductiva. Para que se produzca se necesita un hilo conductor que lleve una corriente la cual creará un campo magnético y una

espira o bucle víctima en la que se generará una fuerza electromotriz perturbadora (f.e.m). El principio teórico se describe mediante la ley de Faraday [35].

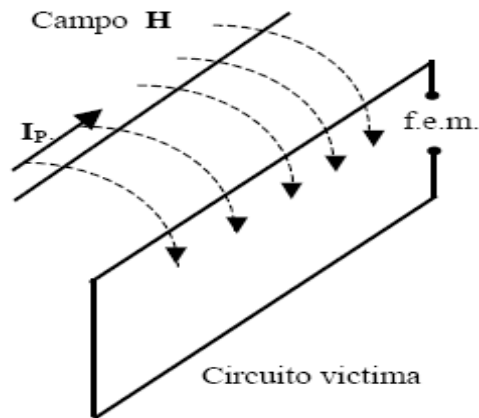


Figura 3.25. Ejemplo de diafonía inductiva [35]

En la Figura 3.25 se presenta un ejemplo de diafonía inductiva. Según la ley de Faraday (Ecuación 3.42), la f.e.m inducida en el bucle de la víctima es proporcional a la variación respecto al tiempo del flujo de campo magnético que lo atraviesa.

$$|E| = \left| \frac{d\phi_B}{dt} \right| \quad \text{Ecuación 3.42}$$

El flujo magnético que atraviesa la espira y en consecuencia la f.e.m será mayor cuando mayor sea:

- El valor de la corriente I_p .
- El área del bucle víctima.
- La distancia entre el cable perturbador y el bucle.

Por otra parte, su derivada temporal será mayor cuando mayor sea la frecuencia de la corriente generadora del campo magnético I_p .

El acoplamiento inductivo puede ser reducido si:

- Se reduce el área del bucle de la víctima y esto se puede conseguir utilizando cable trenzado.

- Colocar tan cerca como sea posible el cable que lleva la corriente perturbadora y el cable de retorno de esa corriente (que va en sentido contrario). De esta manera se anula el campo magnético que se crea.
- Si el cable perturbador es perpendicular al circuito o bucle de la víctima, no habrá flujo que lo atraviese y por tanto no se producirá perturbación.

3.6.3.4 Acoplamiento por Radiación Electromagnética

Los acoplamientos capacitivos e inductivos también se conocen como *campo cercano* y el acoplamiento por radiación electromagnética es conocido como *campo lejano*. La frontera entre los dos campos ocurre cuando la víctima está a una distancia igual o superior a $\lambda/2\pi$, siendo λ la longitud de onda de la perturbación. La diferencia entre los dos campos radica en la distancia y la frecuencia a la que ocurren [35].



Figura 3.26. Ejemplo de acoplamiento radiado [35]

En la Figura 3.26 se refiere a un ejemplo de acoplamiento radiado, ya que en un circuito a altas frecuencias las interconexiones sirven de antenas para emitir energía radiada.

3.6.3.5 Duración, Tasa de Repetición y Ciclo Duty

Las alteraciones electromagnéticas pueden ser clasificadas de acuerdo a los parámetros de duración, tasa de repetición y ciclo duty.

De acuerdo a la duración, las alteraciones pueden ser de larga o corta duración. Los cambios de larga duración usualmente no se incluyen en el dominio de la interferencia electromagnética debido a que estas causan alteraciones en el valor rms del voltaje de la red eléctrica. Los de corta duración oscilan entre unos pocos segundos hasta valores de microsegundos. Las alteraciones electromagnéticas con corta duración pueden ser clasificadas en tres clases [39]:

- *Ruido*, el cual es una alteración más o menos permanente en la curva de voltaje. El ruido tiene un carácter periódico y una tasa de repetición más alta que la frecuencia de la red de electricidad. El ruido es típicamente generado por motores eléctricos, máquinas de soldadura, etc. La amplitud del ruido es en general mucho menor que el máximo pico de amplitud de voltaje de la misma red eléctrica.
- *Impulsos*, los cuales tienen picos positivos y negativos superpuestos sobre el voltaje de la red eléctrica. Los impulsos se caracterizan por tener corta duración, alta amplitud y rápido ascenso y/o tiempos de caída. Los impulsos pueden ser síncronos o asíncronos a la frecuencia de la red eléctrica. Típicamente los dispositivos que producen impulsos son switches, controles de relays y rectificadores.
- *Transientes*, ocurre como un incremento en el voltaje de la línea eléctrica. Generalmente son generados por switches de alta potencia.

Para poder diferenciar las alteraciones producidas por el ruido continuo de los transientes, se establece una relación que involucra el ciclo duty (ecuación 3.43) [39]:

$$\delta = \tau \times f \quad \text{Ecuación 3.43}$$

Donde

- τ : el ancho del pulso medido al 50% de altura
- f : la tasa de repetición del pulso, o número promedio de pulsos por segundo.

Si el ciclo duty de la respuesta del equipo a la perturbación es menor que cierto valor (por ejemplo 10^{-5}) se considera como transiente, de lo contrario se considera una fuente de ruido continuo cuya emisión es más corta que la suministrada por un transiente.

3.6.4 Clasificación de las perturbaciones según su frecuencia

La IEC en su estándar TC 77, ha establecido una clasificación de los fenómenos electromagnéticos en la que presenta los principales fenómenos de perturbación electromagnética (Tabla 3.1 - Figura 3.27) [40].

Dependiendo del entorno se pueden encontrar diferentes tipos de perturbaciones electromagnéticas. Las perturbaciones radiadas de baja o alta frecuencia suelen ser de naturaleza electromagnética causadas por equipos tales como líneas de alta tensión, antenas, aparatos magnéticos, transmisores de radio, radares, etc. Las perturbaciones conducidas tanto de baja como de alta frecuencia, suelen estar producidas por el acoplamiento de grandes cargas como convertidores de potencia, motores eléctricos, bancos de condensadores o circulación de corrientes de fallo por las redes de distribución. Los fenómenos de descarga electrostática, por su parte, se producen por la acumulación de carga estática en personas u objetos con la consecuente posibilidad de descarga cuando se entra en contacto con ellos [41].

Un aspecto importante a tener en cuenta es que la eliminación completa de las perturbaciones electromagnéticas es imposible. Por ello, los equipos se deben adecuar para disminuir al máximo las emisiones que generan, y que pueden afectar al funcionamiento de otros equipos y al mismo tiempo deben reducir las repercusiones que puedan tener esas alteraciones en su propio funcionamiento.

En lo que se refiere a las perturbaciones conducidas de baja frecuencia, las principales perturbaciones son fundamentalmente las siguientes: variaciones de la frecuencia, interrupciones del suministro de corta y de larga duración, huecos de tensión, armónicos e inter-armónicos en tensiones y corrientes, fluctuaciones de tensión rápidas y lentas, flicker de tensión (tensión intermitente) y desequilibrio entre fases en sistemas trifásicos.

Las interrupciones del suministro, los huecos de tensión, las fluctuaciones de tensión, la distorsión armónica y el desequilibrio se generan en el propio sistema y se transmiten de la red a las cargas conectadas, mientras que los armónicos de corriente, el desequilibrio de corrientes y el flicker de tensión se generan en las cargas y se transmiten al resto de la red. Los armónicos han sido históricamente la perturbación más estudiada ya que su existencia se conoce desde los comienzos de la distribución eléctrica. Su estudio y la evolución de las técnicas de medida han sido los generadores del interés en otros aspectos de la calidad de la energía eléctrica hasta llegar a la situación actual [41].

En un entorno industrial las perturbaciones más severas por los efectos económicos que pueden producir son las interrupciones del suministro y los huecos de tensión. En un entorno residencial además de estas perturbaciones hay que añadir el flicker de tensión debido a la sensación de molestia que produce la fluctuación de la luminosidad que lleva asociado en las lámparas y otros dispositivos de iluminación [41].

CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE TRANSMISIÓN PLC

Baja Frecuencia		Alta Frecuencia	
Fenómeno Conducido	Fenómeno Radiado	Fenómeno Conducido	Fenómeno Radiado
Armónicos inter-armónicos	Campos Magnéticos: ➤ Continuos ➤ Transientes	Corrientes o tensiones inducidos acoplados directamente: ➤ Ondas Continuas. ➤ Ondas Moduladas	Campos magnéticos
Señalización de sistemas			Campos Eléctricos
Fluctuaciones de Tensión	Campos Eléctricos	Transientes unidireccionales dirigidos (simples o repetitivos)	Campos Electromagnéticos: ➤ Ondas Continuas. ➤ Ondas Moduladas
Huecos de Voltaje e interrupciones			
Variaciones de la frecuencia de la línea eléctrica			
Voltajes inducidos de baja frecuencia			
Componente de continua en redes alterna			

Tabla 3.1. Perturbaciones Electromagnéticas de acuerdo a IEC TC 77

La Figura 3.27 especifica los tipos de ruido dependiendo del rango de frecuencia donde se presentan.

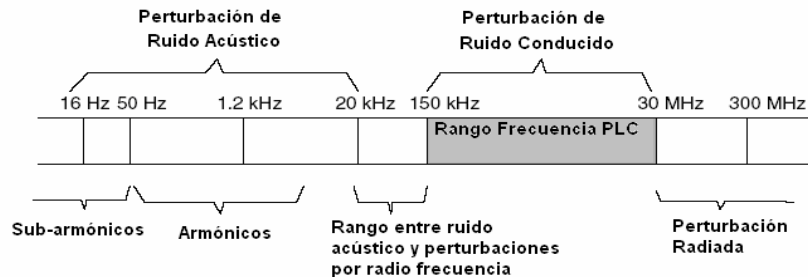


Figura 3.27. Perturbaciones de acuerdo al rango de frecuencia [35]

3.7 Potencial de interferencias ocasionadas por las configuraciones PLC aéreas y subterráneas

En las configuraciones que PLC ofrece como tecnología, las instalaciones de baja y media tensión pueden ser implementadas utilizando líneas eléctricas aéreas o

subterráneas. En un gran porcentaje las instalaciones de las líneas eléctricas hacen uso de configuraciones aéreas, cuya cantidad de hilos elevados es un potencial más grande que puede causar interferencia, en comparación con las líneas subterráneas.

Un hilo de media tensión de cobre o aluminio está a una distancia de aproximadamente 10 m desde el suelo. La señal de comunicaciones es inyectada a los hilos mediante acopladores localizados a intervalos de aproximadamente 100 m. Una vez la señal está sobre la línea de media tensión, no es repetida por cada acoplador sino que pasa a través de varios acopladores antes de ser regenerada (Figura 3.28).

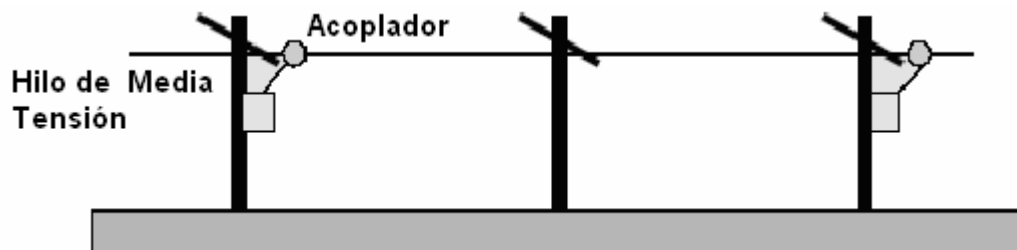


Figura 3.28. Sistema PLC usando redes aéreas de Media Tensión [17]

La señal en los hilos produce diferentes tipos de perturbaciones de acuerdo a la clasificación de las alteraciones electromagnéticas vistas en el apartado 3.6.3 y que puede ser retomado por un modelo de radiación simple presentado en la Figura 3.29.

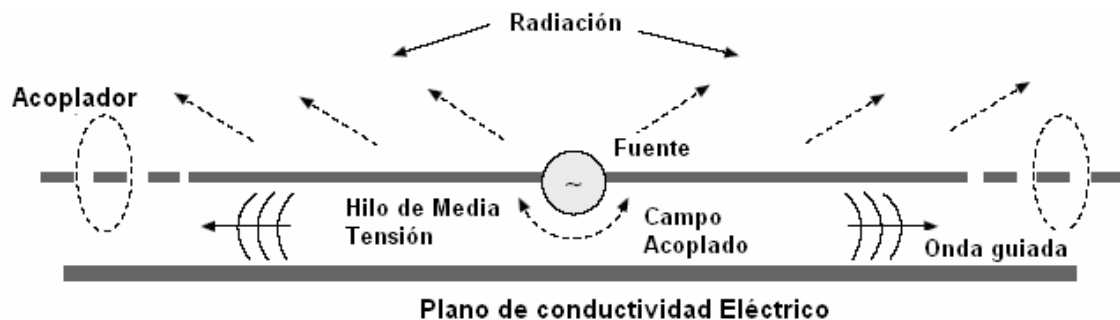


Figura 3.29. Modelo Electromagnético de un sistema PLC [17]

El hilo de Media Tensión se asume tan largo como sea posible, comparado con el espaciamiento entre acopladores. Para la fuente se tiene un tipo de acoplador inductivo, el cual consiste de un anillo de ferrita alrededor del hilo de Media

Tensión, energizado por una bobina [42]. La Fuerza Electro-Motriz (EMF^{17} - *Electromotive Force*) generada por un acoplador es representada en el modelo como un generador de voltaje simple. Los otros acopladores en el sistema (aros punteados), se asumen de tal manera que no tenga efecto sobre la propagación de la señal inyectada. A pesar de esta simplicidad, este modelo da a conocer todos los mecanismos básicos asociados con la propagación de la señal y la radiación de los sistemas PLC. Las consideraciones adicionales, tales como reflexión o atenuación por los acopladores y otras discontinuidades de la línea de Media Tensión, pueden tener consecuencias importantes en la práctica, pero para un entendimiento inicial de la interferencia PLC, el modelo idealizado de la Figura 3.29 es todo lo que se necesita [17].

La fuente genera ondas de corriente que se propagan a la derecha e izquierda a lo largo del hilo. Los campos electromagnéticos que resultan son de tres tipos: guiados, acoplados y radiados. El modo guiado o conducido es el responsable de transportar la señal de energía a lo largo del hilo de Media Tensión. El campo acoplado se asocia a la discontinuidad causada por la fuente y se localiza cerca del acoplamiento entre la fuente y el medio de transmisión. No es considerado como el principal contribuidor de interferencia PLC [17]. En cuanto al campo radiado es el principal contribuyente de la interferencia PLC porque los efectos de radiación decaen de forma lenta inversamente proporcional a la distancia.

En la Figura 3.30 se puede observar el comportamiento del campo guiado el cual decae rápidamente en dirección perpendicular al hilo de Media Tensión.

La rápida caída del modo guiado en dirección perpendicular al hilo de media tensión es claramente visible, en el cual el lóbulo principal del modo de radiación, se agudiza con el incremento de la frecuencia (va desde 0.6 dB por encima del *nivel isotrópico*¹⁸ (dBi) a 2 Mhz hasta 16 dBi a 20 Mhz). La caída lenta en modo guiado (-4 dB/km) a medida que recorre el hilo en dirección paralela se debe a la disipación de la tierra. (Las pérdidas del cable a 20 Mhz es de solamente unas pocas décimas de decibel por km). Finalmente se nota que los efectos de campo cercano persisten a lo largo del hilo, y no justamente en la vecindad inmediata del acoplador.

¹⁷ EMF: Diferencia de potencial entre dos puntos, lo que provoca la corriente eléctrica

¹⁸ Nivel Isotrópico dBi: ganancia de antena teórica de 0 dB usada como medida de referencia.

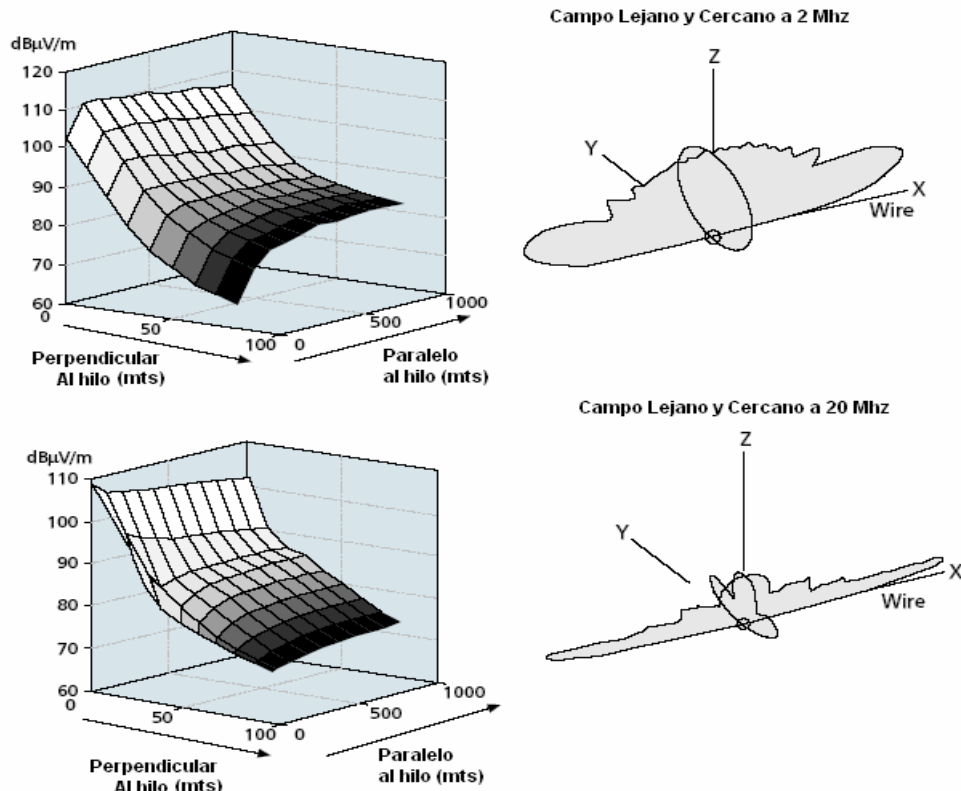


Figura 3.30. Comportamiento de las perturbaciones electromagnéticas guiadas y radiadas [17]

Los campos lejanos pueden ser fundamentalmente dañinos, por las emisiones HF que pueden viajar miles de kilómetros por el “rebote” en la ionosfera, diferente a la transmisión por microondas. También es de notar que la radiación del campo magnético lejano está contenida primordialmente en el lóbulo principal, cuyos efectos en dirección perpendicular al hilo puede ser significativo.

En las líneas subterráneas el concepto de radiación electromagnética no es un factor de riesgo para diferentes sistemas de telecomunicaciones en la banda de operación de PLC, ya que los sistemas están aislados mediante el uso de cables blindados que evita la oxidación de sus materiales y permite conservar las características físicas y de operación del material. El blindaje de sus cables permite que casi toda la energía sea aprovechada útilmente, con un pequeño porcentaje de pérdidas que llevan a un nivel de perturbación poco significativo.

3.8 Configuraciones balanceadas para evitar efectos de radiación electromagnética.

Los efectos de radiación electromagnética que producen los campos lejanos y cercanos pueden ser reducidos aumentando la complejidad de los sistemas PLC. La idea consiste en usar dos hilos de media tensión en vez de uno solo para conducir la información de forma diferencial, como se muestra en la Figura 3.22 (Balance Horizontal). Las corrientes opuestas que viajan a lado y lado del hilo generarán campos que tienen a cancelarse los unos con los otros, y será mayor la cancelación de dichos campos si los hilos se encuentran a una separación menor [17].

La Figura 3.31 muestra los datos de los campos cercanos a 20 Mhz de una configuración balanceada horizontalmente, con una separación horizontal de los hilos a un metro.

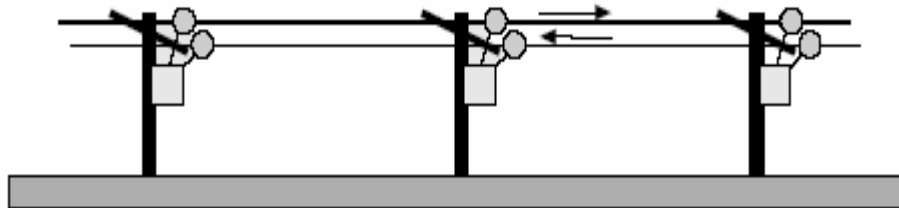


Figura 3.31. Sistema balanceado horizontalmente usando conducción diferencial [17]

De acuerdo a medidas realizadas por los laboratorios AT&T, se obtuvo que el campo lejano a 20 Mhz para sistemas de configuración balanceada horizontalmente es de -14 dBi, que es una reducción que está 30 dB por debajo de las configuraciones no balanceadas (Figura 3.32). (La ganancia negativa indica que la mayoría de la potencia RF disponible es transportada por la línea de transmisión, donde sólo una pequeña fracción es radiada al espacio) [17].

También es posible implementar una *configuración de balance vertical* en la que se conduce la señal por un hilo de Media Tensión más un hilo neutro. Los campos cercanos a 20 Mhz asociados con esta configuración, con un hilo neutro a 3 metros por debajo de la línea de Media Tensión (7 metros por encima del nivel de la calle) se muestran en la Figura 3.32. La supresión de campo comparada con el caso no balanceado es apreciable, especialmente a mayores distancias, pero no es tan bueno como la configuración balanceada horizontalmente, probablemente debido a la separación mayor entre los hilos y el balance imperfecto con respecto a la conexión a tierra [17].

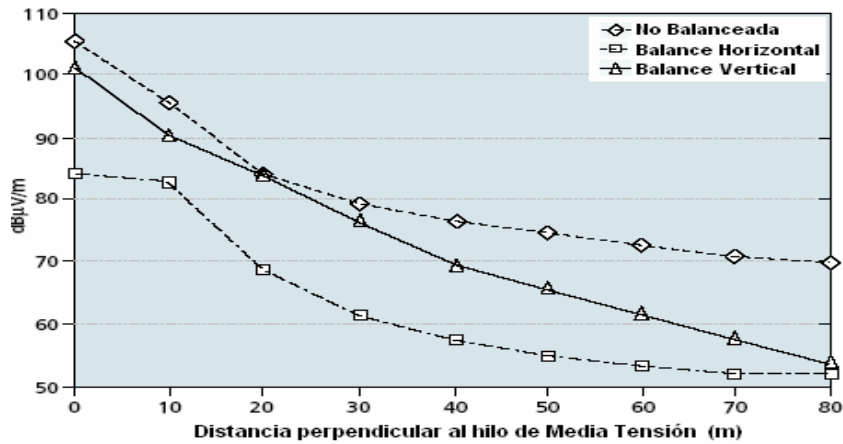


Figura 3.32. Ganancias de configuraciones de líneas de Media Tensión para evitar efectos de radiación [17]

3.9 Interferencias causadas a otros sistemas de telecomunicaciones

El principal inconveniente en el desarrollo e implantación de los sistemas que hacen uso de la línea eléctrica para transmisión de datos (PLC), es la potencial interferencia producida por esta tecnología a otros sistemas de comunicación. De acuerdo a las posibles perturbaciones y al rango de frecuencia en el que opera PLC, los sistemas que pueden ser principalmente afectados son los que hacen uso de la banda de frecuencia HF, ya que es una banda apreciada para las comunicaciones a larga distancia.

Después de múltiples revisiones sobre las posibles alteraciones de PLC en los servicios ofrecidos en la banda HF, la Comisión Federal de Comunicaciones FCC ha publicado un reporte en el que ordena permitir la operación de la Banda Ancha por línea eléctrica sin licenciamiento previo, pero sí bajo restricciones técnicas y administrativas que pretenden proteger los servicios de radio licenciados [43].

La promesa de las comunicaciones powerline Banda Ancha que permite el acceso virtual desde las hogares, continuará sin cumplirse si las emisiones de radio desde esos sistemas causan daño significativo de interferencia a otros usuarios del espectro radioeléctrico.

Los principales servicios que pueden ser afectados se resumen en la Tabla 3.2

CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE TRANSMISIÓN PLC

Clase de Servicio	Servicios	Banda Ocupada (Mhz)
Multidifusión	Por ondas cortas y medias	1.3-1.6; 3.9-4.0; 5.9-6.0; 6.0-6.2; 7.1-7.3; 7.3-7.35; 9.4-9.5; 9.5-9.9; 13.5-13.6; 13.6-13.8; 15.1-15.6; 25.6-26.1
Movilidad Marítima	Táctica de estrategias marítimas de seguridad y emergencia. Multidifusión de comunicaciones marítimas Navales por Sistema Global de Posicionamiento Diferencial (DGPS - Differential Global Position System)	1.6-1.8; 2.04-2.16; 2.3-2.5; 2.62-2.65; 2.65-2.8; 3.2-3.4; 4.0-4.4; 6.2-6.5; 8.1-8.8; 12.2-13.2; 16.3-17.4; 18.7-18.9; 1.6-1. 2.0-2.02; 2.02-2.04; 2.3-2.5
Radio Aficionado	Llamada en espera, fax, teléfono, etc.	1.81-1.85; 3.5-3.8; 7.0-7.1; 10.1-10.15; 14.0-14.2; 14.25-14.35; 18.0-18.16; 21.0-21.4; 24.8-24.9; 28.0-29.7
Ejército	Comunicaciones de larga distancia del Reino Unido y de la Organización del Tratado Atlántico Norte	2.0-2.02; 2.02-2.04; 2.3-2.5
Aeronáutica	Aeronáutica	2.8-3.0; 3.02-3.15; 3.4-3.5; 3.8-3.9; 4.4-4.65; 5.4-5.68; 6.6-6.7; 8.81-8.96; 10.0-10.1; 10.1-11.1; 21.0-22.0; 23.0-23.2
Radio Astronomía	Radio Astronomía	13.3-13.4; 25.55-25.57

Tabla 3.2. Posibles víctimas electromagnéticas para PLC y sus bandas de ocupación

3.10 Estándares y Organismos que controlan las interferencias PLC

Los estándares de Compatibilidad Electromagnética EMC son prerequisites que permiten asegurar los límites de perturbación causados por el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, tales como la emisión de señales parásitas y las alteraciones radiadas, como también la susceptibilidad de los equipos bajo la influencia de dichas perturbaciones. De acuerdo a las perturbaciones ocasionadas se definen estándares de medición sobre los niveles máximos alcanzados y permitidos.

El organismo de estandarización más importante es la IEC cuya misión es promover y coordinar la estandarización internacional, y asuntos relacionados, tales como la evaluación de conformidad de los estándares en los campos de la electricidad, electrónica y las tecnologías relacionadas [40].

La IEC fue fundada en 1906 y sus miembros actuales abarcan los comités nacionales electrotécnicos y más de 50 países, incluyendo países industrializados y países en vía de desarrollo. Para trabajo técnico, la IEC está conformada por 200 comités y subcomités de los cuales el estudio de compatibilidad electromagnética (EMC) se clasifica en tres grandes grupos, de acuerdo al número de estados en el cual operan: internacional; regional, y nacional. En la categoría regional, los Estados Unidos y la Unión Europea son los más representativos. A nivel nacional depende de los entes reguladores propios de cada país, sobresaliendo la Agencia de Radio Comunicaciones (*RA - RadioCommunications Agency*) del Reino Unido y la Autoridad Regulatoria de Telecomunicaciones y Correos (*RegTP - Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post*) en Alemania. Todos los organismos en conjunto trabajan de forma consultiva y cooperativa para desarrollar los estándares EMC, los cuales intentan combinar intereses de todas las partes en cuestión (Figura 3.33) [40].

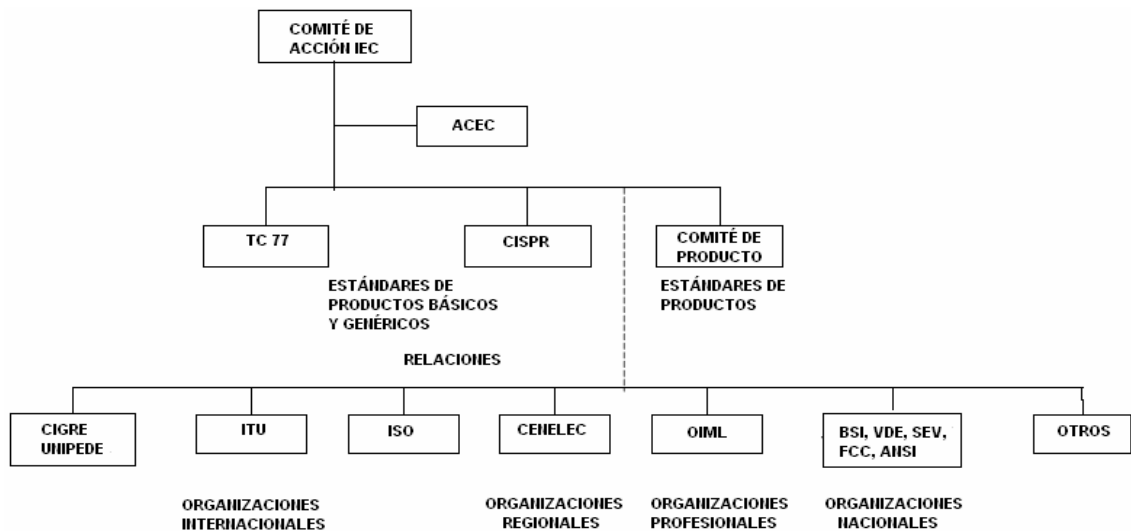


Figura 3.33. Grupos de trabajo en Compatibilidad Electromagnética de la IEC [40]

3.10.1 Comités Internacionales

Estos comités y subcomités presentan los resultados de sus trabajos en forma de estándares o reportes técnicos. El más antiguo e importante de estos comités es el

“Comité Internacional Especial de Radio Interferencia” (*CISPR - International Special Committee on Radio Interference*), el cual fue establecido por la IEC en 1934 en París, cuando las interferencias de radio frecuencia habían empezado a ser un problema. Esta fue la primera organización de cooperación internacional que produjo estándares para proteger la recepción de transmisiones de radio, extendiendo su campo de actividad a los estándares de compatibilidad electromagnética de los productos, como por ejemplo para equipos caseros y Equipos de Telecomunicaciones. Las recomendaciones contenidas en CISPR 22 definen los límites establecidos para las emisiones conducidas y radiadas desde equipos de comunicaciones y sirve como base para mejorar los estándares nacionales.

El segundo subcomité de estandarización importante de la IEC es el Comité Técnico 77 referido como IEC TC 77 que juega un rol complementario para la CISPR. Fue creado en 1973, y es responsable junto con otros comités de algunas extensiones de los estándares EMC básicos que tienen aplicación general y para estándares Genéricos EMC, en la cual el estado exige sean completa o parcialmente respetados. El estudio de la sensibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y sus métodos de medida son de la especialidad del subcomité IEC TC 65 [40].

3.10.2 Organizaciones Regionales

En los Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) es la agencia gubernamental responsable de la planeación de frecuencias y control de interferencias. La mayoría de veces, la FCC se considera como una organización regional en vez de una organización nacional. La FCC tiene regulaciones que cubren la limitación de emisiones de un amplio rango de productos (entre estos los estándares de la División FCC 15 que son aplicados a todos los equipos digitales). Estas regulaciones FCC imponen dos diferentes límites de emisión, medidos a diferentes distancias del dispositivo. El límite aplicable depende del ambiente en el cual el equipo operará. Los equipos de Clase A son diseñados para uso en aplicaciones comerciales o industriales. La Clase B define límites para equipos de uso residencial. LA FCC no especifica el método de aislamiento de los equipos de las dos clases para evitar emisiones EM, pero sí especifica los límites de la fuerza de campo radiado en el espectro 30 Mhz a 1 Ghz y el límite de voltaje de las perturbaciones conducidas en la banda de frecuencia 450 Khz a 30 Mhz [40].

En Europa y en la estructura del Comité de Coordinación Europea de Estándares Eléctricos en el Mercado Común Europeo (CENELCOM - Comité de Coordination Européen des Normes Electriques pour le Marché Común), se tomó la decisión de establecer un Comité de Estandarización Común para crear un estándar que limitara las emisiones de equipos eléctricos. El Comité de Estandarización Común se fundó en 1970 y está enlazado con representantes de proveedores de energía eléctrica y constructores de aplicaciones eléctricas caseras. El Mercado Común Europeo y CENELCOM se reorganizaron bajo el nombre CENELEC o Comité de Estandarización Eléctrica Europea.

3.10.3 Estándares límites para las emisiones radiadas

Bajo la observación de la agencia de radio comunicaciones en Londres, varias pruebas de campo fueron monitoreadas para explorar la tecnología PLC y obtener una idea acerca de la EMI causada por los equipos. En forma paralela, la agencia invitó al desarrollo de un nuevo procedimiento de medida llamada MPT1570, el cual fue titulado “radiaciones electromagnéticas de sistemas de telecomunicaciones operando sobre substancias materiales en el rango de frecuencias de 9 Khz a 300 Mhz”. Las medidas realizadas condujeron a que los límites de la fuerza del campo eléctrico podrían ser expresados como se indica en la Ecuación 3.44 [44]:

$$E = 20 \left(\frac{dB\mu V}{m} \right) - 7.7 \log \left(\frac{f}{Mhz} \right) \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Debido a los límites bajos obtenidos sobre las medidas de los niveles de EMI, y a la masiva protesta por parte de los usuarios civiles y militares en el rango de onda corta, se modificaron estos límites obtenidos. La autoridad de Regulación Alemana RegTP bajo el ministerio de asuntos de economía, publicó las primeras limitaciones electromagnéticas en un documento preliminar en enero de 1999 que fue conocido bajo el nombre “NB30” cuya diferencia es de 20 dB con respecto a los límites iniciales.

Esas limitaciones se indican en la Tabla 3.3, concernientes tanto a PLC como a las transmisiones sobre cualquier tipo de transmisión sobre hilos, incluyendo TV cable, xDSL, etc [44].

Banda de Frecuencia	Límites de la fuerza de Campo E permitido (Máximo)
0.009 Mhz - 1 Mhz	40 dB(μ V/m) - $20 \text{Log}_{10}(f/\text{Mhz})$
1 Mhz - 30 Mhz	40 dB(μ V/m) - $8.8 \text{Log}_{10}(f/\text{Mhz})$
30 Mhz - 1 Ghz	27 dB(μ V/m)
1 Ghz - 3 Ghz	40 dB(μ V/m)

Tabla 3.3 Límites de Campo Eléctrico Permitido por NB 30 para PLC y otros sistemas bajo hilo

En los Estados Unidos, la División FCC 15 especialmente deja aparte los sistemas de portadoras de corriente que son radiadores no intencionados, incluyendo a PLC, de los límites de emisión conducidos encima de los 1.705 Mhz, basándose en lugar de esto en los límites de emisiones radiadas especificadas. Los límites permitidos para el campo E radiado de acuerdo a las Divisiones FCC se muestran en la Tabla 3.3 [45].

Durante el 2001, la comisión Europea publicó una disposición denominada M313, e invitó a los organismos de los diferentes estándares incluidas CENELEC, ETSI, CISPR y miembros de la Conferencia Europea de las Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (*CEPT- Conference Européen des Administrations des Postes et des Telecommunicatios*) junto con las empresas de diseño PLC-InHome a empezar el establecimiento de estándares armónicos para todas las redes de telecomunicaciones. El Mandato M313 se titula oficialmente “Mandato de Estandarización dirigido a CEN, CENELEC y ETSI concerniente a la Compatibilidad electromagnética en redes de Telecomunicaciones”. El primer paso para este mandato es establecer estándares concertados, considerando emisión e inmunidad, para sistemas de comunicaciones por líneas eléctricas, cables coaxiales y líneas telefónicas. El énfasis es sobre las redes de comunicaciones y no sobre el equipo, aunque más adelante deberá estar en línea con algunos estándares producidos para equipos que producen EMC [46].

3.10.4 Estándares límites para emisiones conducidas

El estándar CISPR 22 presenta el procedimiento de medida de los niveles de las señales de emisión conducida generadas por los equipos y especifica los límites para el rango de frecuencia de 0.15 Mhz a 1 Ghz. Como todos los otros estándares FCC, este estándar también subdivide los equipos en dos categorías: clase A y clase B.

CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE TRANSMISIÓN PLC

El estándar define diferentes tipos de medidas y limitaciones para las emisiones conducidas provocadas por interfaces de conexión, tanto para la línea eléctrica como para otro tipo de interfaces de conexión a redes de comunicaciones, de forma independiente. Por consiguiente se espera que para próximas reformas del estándar, se estudie las emisiones producidas por la integración de diferentes interfaces, incluida las de la red eléctrica, como una medida general del nivel de la señal de emisión conducida. Por el momento, los conectores de las líneas eléctricas de los equipos PLC se encuentran en la categoría de conexiones a la línea eléctrica y son medidos acordemente. Los límites recomendados para las perturbaciones conducidas en conexiones de la red eléctrica se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5 para los equipos de la clase A y B respectivamente [47].

Banda de Frecuencia (Mhz)	Límites en dB (μ V)			
	Clase A		Clase B	
	Pico Máximo	Pico Promedio	Pico Máximo	Pico Promedio
0.15 - 0.50	79	66	66 - 56	56 - 46
0.50 - 5	73	60	56	46
5 - 30	73	60	60	50

Tabla 3.4. Límites para perturbaciones conducidas en puertos para línea eléctrica.

Banda de Frecuencia (Mhz)	Límites en dB (μ V)			
	Clase A		Clase B	
	Pico Máximo	Pico Promedio	Pico Máximo	Pico Promedio
0.15 - 0.50	97	84 - 74	84 - 74	74 - 64
0.50 - 30	87	74	74	64

Tabla 3.5. Límites para perturbaciones conducidas en modo común para puertos de equipos Telecomunicaciones

4. DISEÑO DE MODEMS OFDM Y GMSK PARA EL CANAL ELÉCTRICO.

Teniendo en cuenta que la red eléctrica es un medio bastante hostil para la transmisión de datos debido a las múltiples derivaciones, malas conexiones, impedancias variables y al ruido provocado por diferentes sistemas, los principales proveedores de equipos PLC ofrecen una gama de productos en las que hacen uso de dos tipos esenciales de modulaciones que son la Modulación OFDM utilizada por los chips de la empresa DS2 y la Modulación GMSK utilizada por la empresa ASCOM. La primera se basa en crear muchísimas portadoras, realizando modulaciones de n -bits por portadora según la degradación que tenga cada frecuencia. Por su lado, GMSK es un tipo de modulación muy utilizada en telefonía móvil que consiste en transmitir dos o tres portadoras a la vez. Ambas modulaciones son mucho más robustas que las convencionales, para poder combatir el ruido que existe en el medio de transmisión [48].

4.1 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)

OFDM es un método de modulación cuyo espectro asociado a cada dato es una pequeña porción del ancho de banda total, el cual se divide en N subcanales (subportadoras). De este modo cada uno de estos subcanales es un canal de banda angosta que experimenta un desvanecimiento casi plano haciendo que la equalización del canal resulte simple. Cada subcanal se modula con un símbolo y se multiplexa en frecuencia [49].

Para obtener una mayor eficiencia espectral, la respuesta en frecuencia de los subcanales está superpuesta y es ortogonal, de la cual deriva su nombre. La Figura 4.1 muestra el espectro de la modulación OFDM [49].

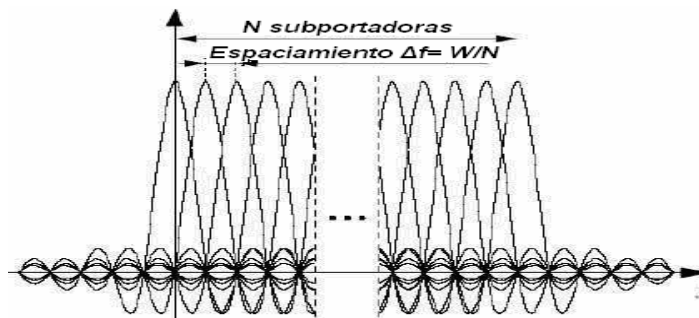


Figura 4.1. Superposición de subportadoras ortogonales.

4.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Mínimo Gaussiano (GMSK)

GMSK es una modulación de fase continua de portadora única, la cual utiliza un filtro de pre-modulación Gaussiano. Esta modulación se caracteriza por tener envolvente constante y permite la reducción del ancho de banda requerido [50], [51]. El prefiltrado aminora la radiación en los canales adyacentes, pero a costa de cierta interferencia entre símbolos y una disminución del nivel de la señal, lo cual debe compensarse en la recepción [52].

Este esquema de modulación es bastante robusto ante el ruido impulsivo, garantizando así una transmisión de información confiable, inclusive con una baja relación de señal a ruido [53].

4.3 Modelado de un Sistema de Transmisión OFDM y GMSK para canal PLC

Con el propósito de evaluar los tipos de modulación mencionados anteriormente y las características del canal, se diseñó un sistema (modem) que permitiera corroborar que dichas modulaciones hacen posible la transmisión de datos en el canal. Es importante aclarar que, además de las modulaciones, son necesarios algunos elementos de codificación e intercalamiento con el fin de obtener un mejor desempeño del sistema ante el ruido presente.

A continuación se define el diagrama en bloques del diseño, simulado posteriormente mediante la herramienta MATLAB 7.1.

4.3.1 Diagrama en Bloques del Sistema

La Figura 4.2 ilustra el diagrama en bloques del esquema de transmisión y recepción simulado. El código del sistema y su funcionamiento se describe en detalle en el capítulo 3 del Anexo “Solución de Acceso a una Intranet utilizando la Tecnología PLC”.

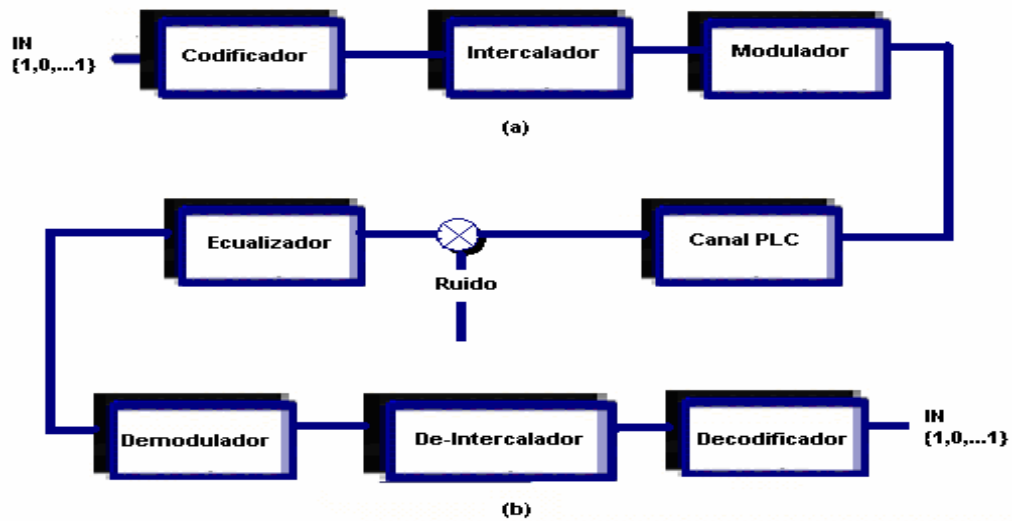


Figura 4.2. Diagrama en Bloques del sistema (a) Transmisor (b) Receptor

4.3.1.1 Codificador

Para esta etapa se utilizaron codificadores en bloque entre los cuales se encuentra el codificador Convolutivo y el codificador Reed Solomon. Para mayor información del modo de operación de estos codificadores dirigirse al capítulo 2 del Anexo “Solución de Acceso a una Intranet utilizando la Tecnología PLC”.

En el codificador Reed Solomon se agrupan los bits de entrada en bloques de 8 bits ($k=8$), a cada uno de estos bloques se agregan 4 bits de paridad ($m=4$), para así obtener una palabra código de 12 bits ($n=m+k$). Es decir se obtiene una tasa de codificación $k/n= 2/3$. En el codificador Convolutivo a cada bit de entrada se le asigna una palabra código de 2 bits, es decir $n=2$ y $k=1$, entonces la tasa de codificación convolutiva es $1/2$.

4.3.1.2 Intercalador

Altera el orden de transmisión de los bits, separando bits consecutivos, evitando que una ráfaga de interferencia dañe varios bits de una misma palabra [49]. Se diseñó con un parámetro $L=8$, que permite separar dos bits consecutivos, ubicando entre ellos el bit correspondiente a la posición de la suma de L y la posición del primer bit de dicha pareja.

4.3.1.3 Modulador

Compuesto por dos tipos de modulaciones: GMSK y OFDM. En seguida se muestra el diagrama en bloques de cada modulador y una breve explicación de cada uno de sus módulos.

4.3.1.3.1. OFDM

En la Figura 4.3 se presenta el diagrama en bloques del modulador OFDM.



Figura 4.3. Diagrama en Bloques de un Modulador OFDM

En la etapa de Mapeo, se define el tipo de modulación digital la cual da la ortogonalidad a los símbolos de información [54]. La modulación utilizada fue QPSK que toma dos bits consecutivos de entrada y produce un símbolo de salida así:

Entrada	Salida
00	$1 + j$
01	$-1 + j$
11	$-1 - j$
10	$1 - j$

Tabla 4.1 Esquema de Mapeo QPSK utilizado en el Modulador OFDM

El bloque inserción de símbolos piloto permite identificar la amplitud y la fase de referencia de la constelación mapeada [55]. Para este bloque se utilizó el símbolo OFDM definido en el estándar IEEE 802.11^a que define la siguiente estructura:

POSICION	1	2-6	8	7-21	21	22-27	28	29-34	35	36-48	49	50-54	55-64
DATO	0	Señal	1	Señal	1	Señal	0	Señal	1	Señal	1	Señal	0

Tabla 4.2 Estructura para Inserción Símbolos Piloto OFDM

Los “1” son los símbolos pilotos, y los “0” indican que las bandas laterales son cero. Los bits de información se ubican en la sección “Señal” [56].

La etapa IFFT asigna una sub-portadora a cada símbolo de la estructura de la Tabla 4.2 [54]. Este bloque es el más importante para la modulación OFDM.

El bloque prefijo cíclico copia los últimos diez y seis (16) bits de la salida del bloque IFFT y los adiciona al principio de la trama entregada por el bloque IFFT. Este proceso se realiza con el fin de disminuir la Interferencia Inter- Símbólica (ISI - Inter Symbol interefente) e intercanal (ICI- Inter Canal interefente) [49].

4.3.1.3.2. GMSK

En la Figura 4.4 se muestra el diagrama en bloques del modulador GMSK.

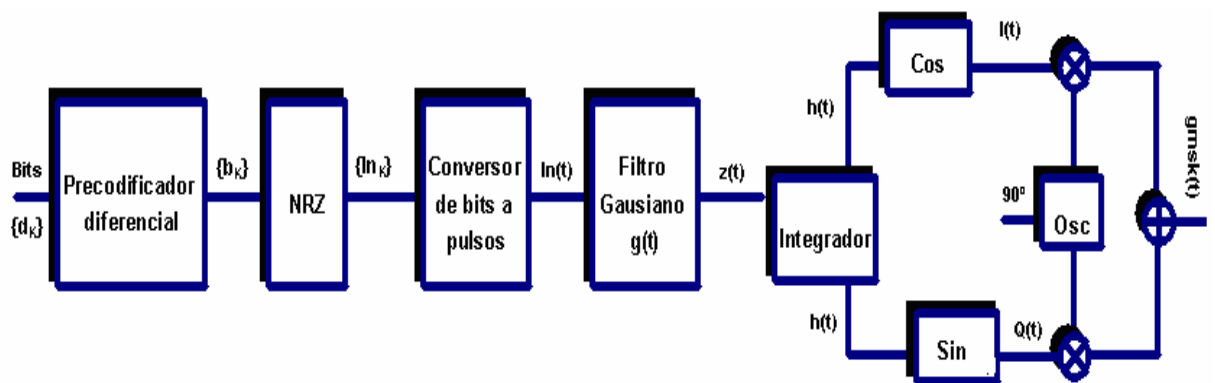


Figura 4.4. Diagrama en Bloques GMSK

La etapa Precodificador diferencial tiene la función de realizar una operación XOR entre el dato de entrada y el dato codificado anteriormente ($b_k = d_k \oplus b_{k-1}$) [57].

El bloque NRZ devuelve una cadena bipolar, es decir, los “1” los convierte en uno (1) y los ceros (0) los convierte en menos uno (-1).

El bloque conversor de bit a pulsos asigna una duración T a cada bit. Esta duración es de 0.5 microsegundos. La salida de este bloque es la señal ln(t) de la Figura 4.4.

El bloque Filtro Gaussiano es el más importante de la modulación GMSK. Este filtro es un filtro pasabajos Gaussiano que se caracteriza por dos parámetros: T período de bit y Bb ancho de banda del filtro. La multiplicación de estos dos se conoce como ancho de banda normalizado ($BN = Bb * T$). Entre menor sea B_N el nivel de

ISI incrementara. El filtro introduce ISI en la señal transmitida, pero esta degradación no es grave si el parámetro B_N del filtro es mayor de 0.5 [50].

La respuesta del filtro Gaussiano está dada por la ecuación 4.1:

$$g(t) = \frac{1}{2T} \left[Q \left(2\pi B_b \left(\frac{t - (T/2)}{\sqrt{\ln 2}} \right) \right) - Q \left(2\pi B_b \left(\frac{t + (T/2)}{\sqrt{\ln 2}} \right) \right) \right] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Para $0 \leq B_b T \leq \infty$

Donde $Q(t)$ es la función Q

$$Q(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad \text{Ecuación 4.2}$$

La función $E(t)$ [58] esta dada por:

$$E(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad \text{Ecuación 4.3}$$

La función $E(t)$ está relacionada con la función complementaria de error ($erfc$) de acuerdo a la ecuación 4.4 [58].

$$E(t) = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{t}{\sqrt{2}}\right) \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Tomando las ecuaciones 4.2 y 4.3 se puede notar que

$$Q(t) = \sqrt{\pi} E(t) = \sqrt{\pi} \frac{1}{2} erfc\left(\frac{t}{\sqrt{2}}\right) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Si se reemplaza la ecuación 4.5 en la ecuación 4.1 se obtiene:

$$g(t) = \frac{1}{2T} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} erfc\left(\frac{2\pi B_b}{\sqrt{2}} \left(\frac{t - (T/2)}{\sqrt{\ln 2}} \right) \right) - \frac{\sqrt{\pi}}{2} erfc\left(\frac{2\pi B_b}{\sqrt{2}} \left(\frac{t + (T/2)}{\sqrt{\ln 2}} \right) \right) \right] \quad \text{Ecuación 4.6}$$

De tal forma que la salida del filtro Gaussiano $z(t)$ esta dada por la ecuación 4.7:

$$z(t) = \text{conv}(g(t), \ln(t)) \quad \text{Ecuación 4.7}$$

El bloque Integrador integra la señal de salida del filtro Gaussiano ($z(t)$).

Los bloques Sen y Cos permiten obtener las componentes I ($I(t)$) y Q ($Q(t)$) de la señal integrada ($h(t)$). Luego a cada una de estas componentes se asigna una portadora desfasada en fase a través del bloque OSC. Finalmente son sumadas las componentes I y Q con sus respectivas portadoras para obtener la señal GMSK ($gmsk(t)$).

4.3.1.4 Canal PLC

De acuerdo al análisis previo mostrado en el capítulo 3, puede verse que el modelo de la función de transferencia del canal está dado por la ecuación 4.8 planteada por Manfred Zimmermann y Klaus Dostert:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Factor de Carga}} \cdot \underbrace{e^{-(a_0 + a_1 * f^K) * d_i}}_{\text{Atenuación}} \cdot \underbrace{e^{-j 2 \pi f \tau_i}}_{\text{Retardo}} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Los parámetros del modelo de la función de transferencia se describen en la Tabla 4.3.

Parámetro	Significado
l	Número de la ruta, donde la ruta con retardo menor tiene un índice $i=1$
a_0, a_1	Parámetros de Atenuación
K	Exponente del factor de atenuación (los valores típicos están entre 0.5 y 1)
g_i	Factor de carga para la ruta i , en general complejo, que puede ser considerada como una combinación de los factores de transmisión y reflexión involucrados.
d_i	Longitud de la ruta
τ_i	Retardo de la ruta i - d_i / V_p con velocidad de propagación de la luz $V_p = 3 * 10^8$ m/s

Tabla 4.3. Parámetros del modelo de la función de transferencia del canal PLC

De acuerdo a las investigaciones de Zimmermann y Dostert en el documento [28], el canal puede ser modelado dependiendo de las rutas que existan. Uno de los modelos planteados hace uso de 4 rutas. Los resultados de las pruebas en ambientes reales, muestran las siguientes condiciones del canal powerline.

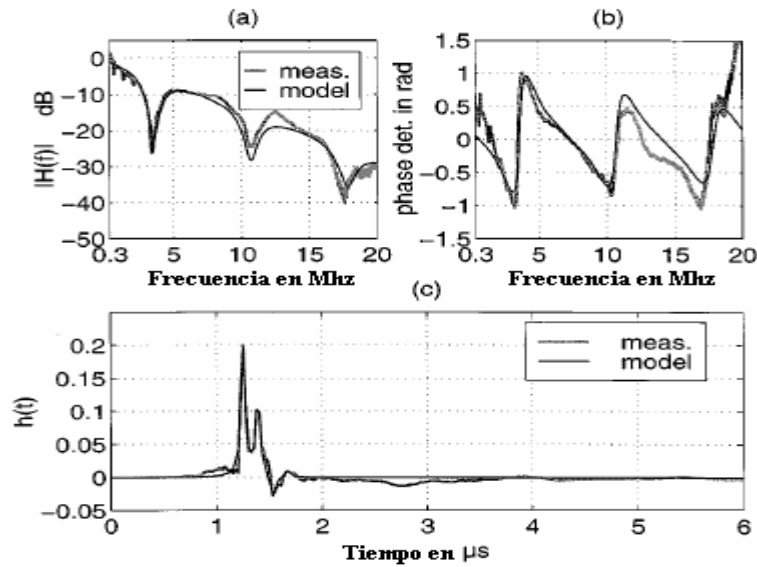


Figura 4.5. Red de Prueba, medidas y simulación con $N=4$ rutas: a) respuesta en amplitud, b) detalles de la fase, c) respuesta impulso [28]

De acuerdo a la respuesta obtenida, el canal puede expresarse en términos de los parámetros de acuerdo a la Tabla 4.4:

Parámetros de Atenuación					
$K=1$	$a_0=0$	$a_1=7.8 \cdot 10^{-10} \text{ s/m}$			
Parámetros de la Ruta					
i	g_i	d_i/m	i	g_i	d_i/m
1	0.64	200	3	-0.15	244.8
2	0.38	222.1	4	0.05	267.5

Tabla 4.4. Parámetros del modelo de 4 rutas

Con los valores de la Tabla 4.4 se simuló en Matlab la función de transferencia del canal (Ecuación 4. 8) como se ve en la Figura 4.6.

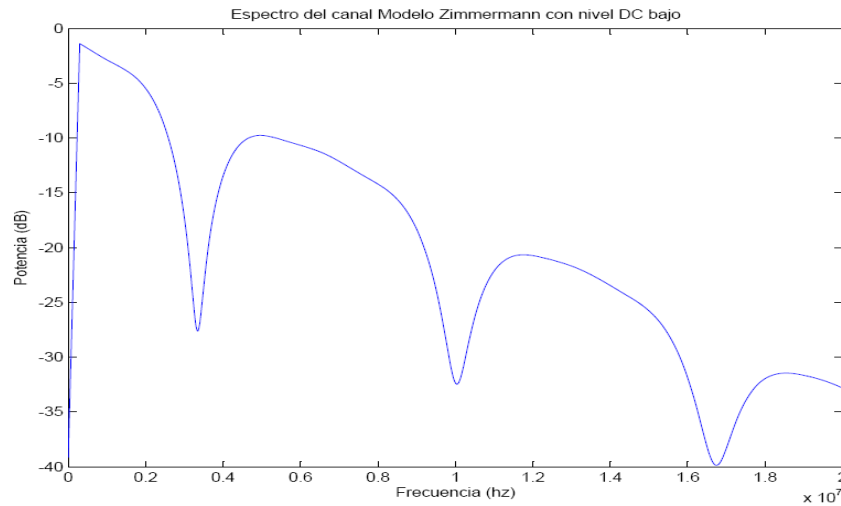


Figura 4.6. Espectro Canal PLC del Modelo Simulado

4.3.1.5 Ruido y Ecuador

Debido a que en un sistema de transmisión está presente el ruido, este se simuló tomando Ruido Blanco Aditivo Gaussiano, pues este se encuentra distribuido en todo el espectro. Dado que el ruido afecta la forma de los pulsos que llegan al receptor, es necesario un ecualizador para reconstruirlos. Para nuestro diseño por facilidad de simulación se optó por elegir un ecualizador con respuesta inversa a la respuesta del canal, es decir $(H(f))^{-1}$. Cabe aclarar que en sistemas reales los ecualizadores son diseñados con métodos de estimación del canal, utilizando preámbulos que permiten examinar el comportamiento del canal y evaluar la variación de las características del transmisor.

4.3.1.6 Demodulador

4.3.1.6.1. OFDM

Cada uno de los bloques del demodulador OFDM opera en forma inversa a los bloques del modulador (descritos en la sección 4.3.1.3.1). El diagrama en bloques se puede apreciar en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Diagrama en Bloques de Demodulador OFDM

4.3.1.6.2. GMSK

De la Figura 4.8, se puede apreciar que el demodulador GMSK no se comporta como un “espejo” del modulador GMSK.

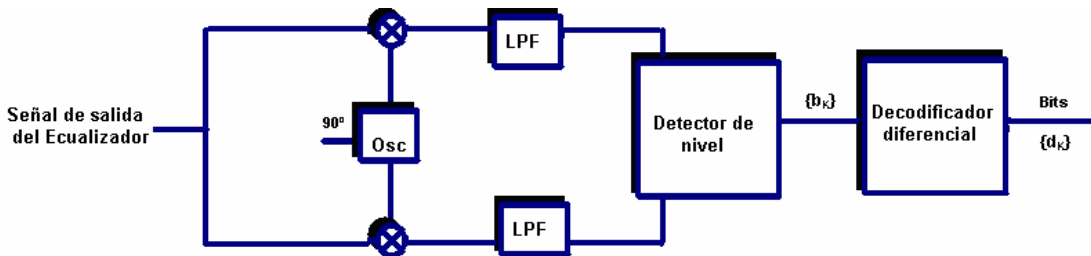


Figura 4.8. Diagrama en Bloques de Demodulador GMSK

El bloque OSC permite recuperar las componentes I y Q con sus respectivas portadoras. El bloque LPF es un filtro pasabajos que elimina las frecuencias altas. El bloque Detector de Nivel, de acuerdo a la constelación I-Q obtenida en recepción, examina cual fue la entrada. Finalmente el bloque Decodificador Diferencial opera de acuerdo a la ecuación $b_k = d_k \oplus d_{k-1}$.

4.3.1.7 De-Intercalador

Opera de forma inversa al bloque intercalador, organizando la secuencia de bits para obtener la palabra original.

4.3.1.8 Decodificador

Si en transmisión se eligió el codificador Convolutivo, en recepción se decodifica utilizando decodificación de Viterbi (explicada en detalle en el Capítulo 2 del Anexo “Solución de Acceso a una Intranet utilizando la tecnología PLC”). Si por el contrario se utiliza el Codificador Reed Solomon es necesario decodificar haciendo uso de un decodificador de la misma clase o Reed Solomon.

4.4 Pruebas para el Sistema de Transmisión Modelado OFDM y GMSK

En las pruebas realizadas se obtuvo el comportamiento de los dos esquemas de modulación sobre un canal PLC usando como criterio la probabilidad de error por bit transmitido para diferentes valores de SNR.

Las modulaciones GMSK y OFDM están basadas en principios diferentes, pues mientras GMSK tiene como objetivo enviar datos en un ancho de banda estrecho, OFDM pretende esparcir los datos en el ancho de banda disponible. Por esta razón, se compararon estas dos modulaciones usando un ancho de banda equivalente. Para GMSK se utilizó dos canales y para OFDM un canal, en aproximadamente el mismo ancho de banda como se lustra en la Figura 4.9. Con el fin de observar la influencia de los dos primeros valles del canal PLC se ubicó un canal OFDM entre 1 - 9.1 Mhz y dos canales GMSK entre 1 - 5 Mhz y otro entre 5.1 - 9.1 Mhz. Para ambos esquemas de modulación se estableció un número de datos adecuado para que el tiempo de procesamiento en simulación fuera corto. (Es importante aclarar que al sistema PLC se pueden enviar muchos más datos, pero entre mayor sea dicho número el tiempo de procesamiento en la simulación será más grande).

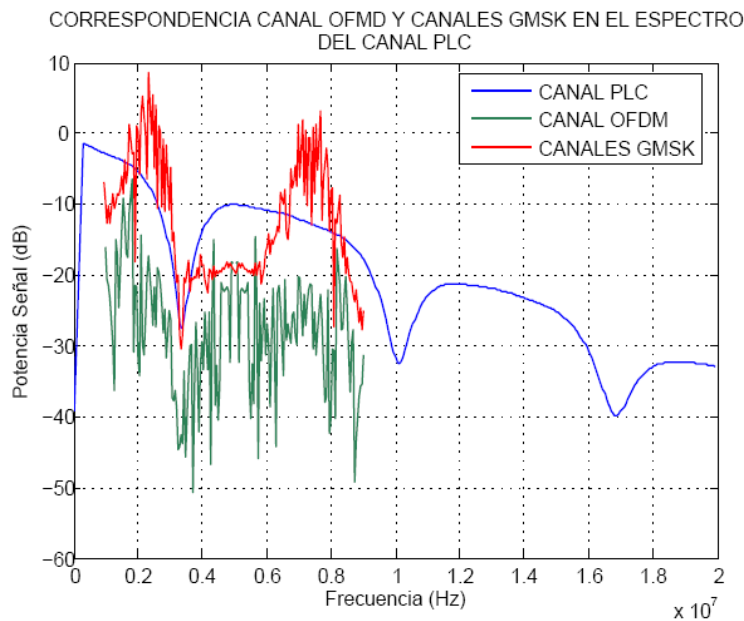


Figura 4.9. Función de Transferencia del modelo del canal PLC usado en Simulación, y la ubicación espectral de los canales usados

Se hicieron 10 mediciones para cada simulación, con el fin de calcular un promedio del número de errores obtenidos. En la Tabla 4.5 se resumen los parámetros más relevantes de cada una de las dos modulaciones.

Bits de entrada	1920	Bits
OFDM		
1 Canal	1-9.1	Mhz
Bits de información	48	Bits
Símbolos piloto y ceros	16	muestras
Prefijo cíclico	16	muestras
Longitud total de la trama	80	muestras
Datos que ingresan al canal por trama	162	muestras
Tasa de bits de información	14.8	Kbps
Separación entre portadoras	50	KHz
Tamaño de la FFT	64	Puntos
Modulación usada por portadora	QPSK	
Tasa de bit de información	14.8	Kbps
GMSK		
2 Canales para GMSK	1-5 5-9.1	Mhz
Bits de información	32	Bits
Longitud total de la trama	32	Bits
Datos que ingresan al canal por trama	160	Muestras
Parámetro BT usado	0.5	
Tasa de bit de información	10.13	Kbps

Tabla 4.5. Parámetros del modelo simulado

Para OFDM los datos que ingresan al sistema PLC se dividen en tramas de 80 datos. Para GMSK los datos se dividen en tramas de 32 datos. La cantidad de datos que van hacia el canal por trama es equivalente para ambas modulaciones, para OFDM se envían 162 datos por trama debido al proceso que se requiere para convertir la señal que sale del modulador OFDM en una señal real, y para GMSK se envían 160 datos, pues es la cantidad de datos de una trama que sale del modulador GMSK, ya que cada dato de entrada se repite 5 veces. Para más detalle del proceso de envío de tramas GMSK y OFDM a través del canal PLC puede dirigirse a las secciones 3.4.2 y 3.4.3 del Anexo “Solución de Acceso a una Intranet utilizando la tecnología PLC”.

A continuación se describen las pruebas realizadas y las respectivas graficas de SNR y probabilidad de error.

4.4.1 Validación del Modelo

Con el fin de validar el modelo simulado, se presenta la gráfica de BER vs. SNR para GMSK y OFDM con y sin codificación.

En la Figura 4.10 se puede apreciar que el modelo simulado efectivamente responde al comportamiento de graficas de BER vs. SNR; pues a medida que se aumenta la SNR, la probabilidad de error disminuye. Partiendo de $P_e = 0.5$ (total incertidumbre) para SNR igual a 0.1, y llegando a $P_e = 0$ para altos valores de SNR.

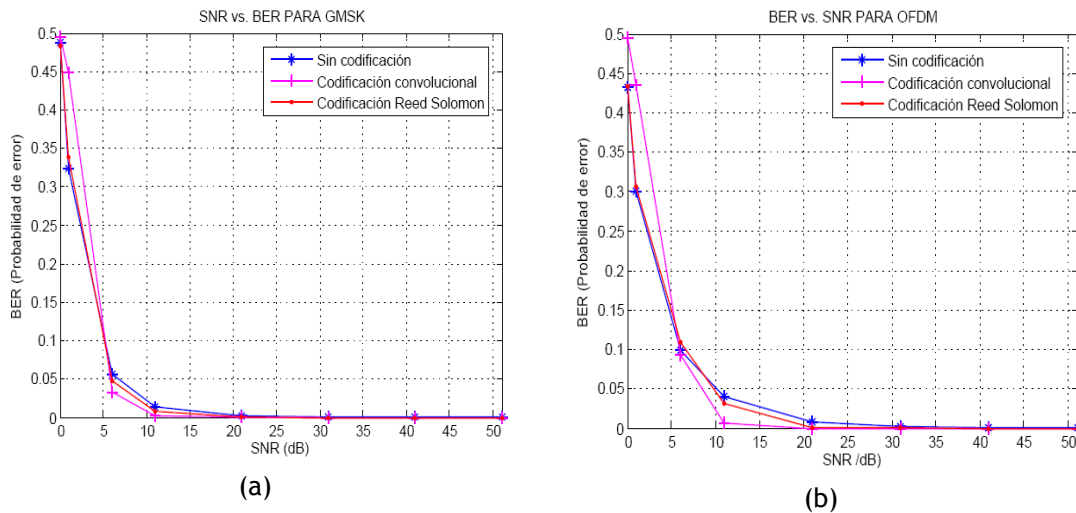


Figura 4.10. Validación del Modelo Simulado (a) GMSK (b) OFDM

4.4.2 Prueba 1: Modulación GMSK y OFDM sin codificación, con codificación convolucional y con codificación Reed Solomon

Dado que es más adecuado interpretar la probabilidad de error en escala logarítmica, se describen las gráficas de la Figura 4.10 en dicha escala (Figura 4.11). Cabe aclarar que aquellos puntos donde la probabilidad de error es cero, no se grafican, pues logaritmo de cero (0) es un valor no definido.

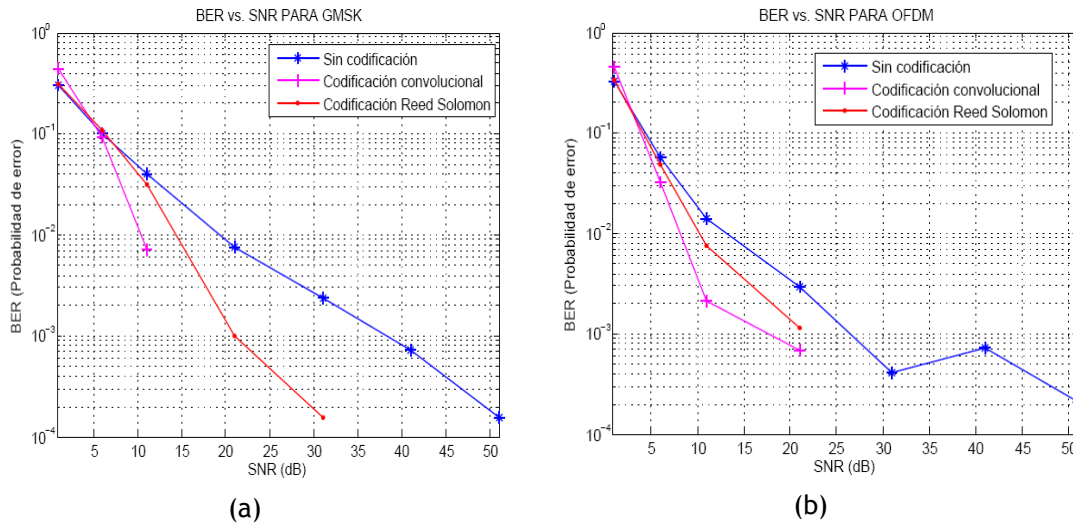


Figura 4.11. Validación del Modelo Simulado en Escala Logarítmica (a) GMSK (b) OFDM

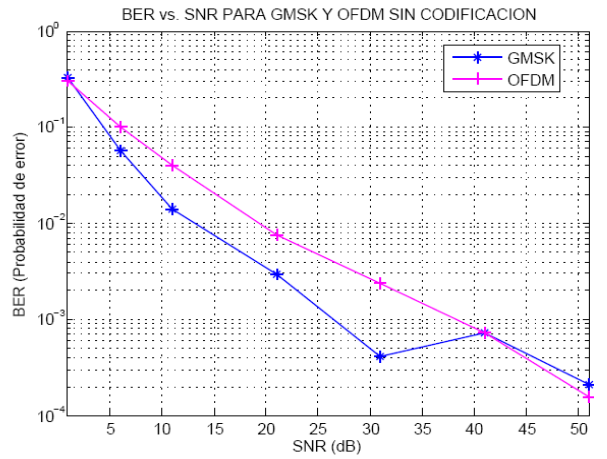
De las Figuras 4.11(a) y 4.11(b) se puede verificar que para ambas modulaciones, efectivamente los codificadores Reed Solomon y Convolucional disminuyen la probabilidad de error respecto al experimento realizado sin codificación. El codificador Convolucional usado con parámetros (2,1) se comporta mejor que el codificador RS con parámetros (12,8).

Partiendo de la validación del modelo se describen las pruebas realizadas y las respectivas gráficas de BER vs. SNR, para la región donde $BER < 10^{-1}$, que es la región de operación en un sistema de telecomunicación real.

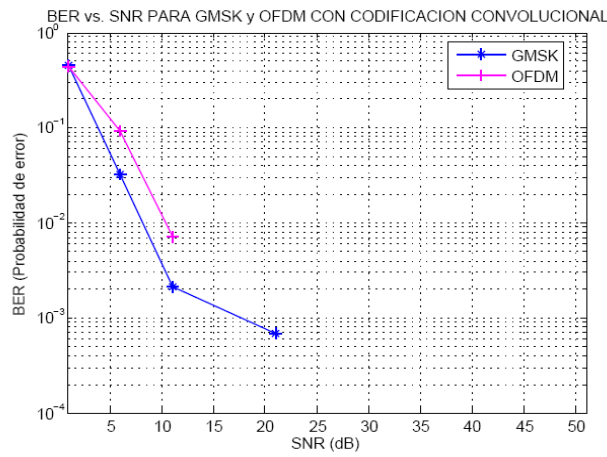
4.4.3 Prueba 2: Modulación OFDM y GMSK sin y con codificación.

Los resultados se ilustran en la Figura 4.12.

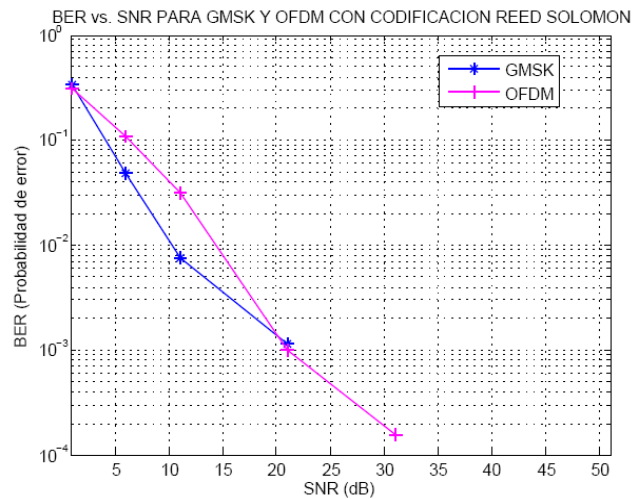
En la Figura 4.12(a), la modulación GMSK alcanza una probabilidad de error de aproximadamente 10^{-3} con una SNR alrededor de 25dB, mientras que en la modulación OFDM se alcanza dicha probabilidad de error con una SNR de 40 dB (aprox. 15 dBs mayor que en GMSK).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.12. BER vs. SNR para GMSK y OFDM (a) sin codificación (b) Cod. Convolutional (c) Cod. Reed Solomon

Con codificación convolucional - Figura 4.12(b)- el comportamiento de GMSK para SNR bajos es mejor que OFDM, pero para SNR altos (mayores a 11dBs) la Probabilidad de error se hace cero más rápido en la modulación OFDM que en la GMSK. Mientras que con codificación Reed Solomon - Figura 4.12(c)- la probabilidad de error se hace cero más rápido para GMSK (21 dB) y más tarde para OFDM (31 dB).

4.4.4 Síntesis de Resultados

El propósito de evaluar las modulaciones GMSK y OFDM con técnicas de codificación e intercalamiento es útil para realizar una comparación más objetiva de productos disponibles en el mercado, así como para el establecimiento de pautas en el diseño de nuevos modems para sistemas PLC. En las pruebas realizadas se ha utilizado un ancho de banda similar para OFDM y GMSK al usar dos canales GMSK por un canal OFDM, de tal manera que se puede concluir que para el mismo ancho de banda, la modulación GMSK se comporta ligeramente mejor que OFDM. Los resultados de Probabilidad de error por bit vs. Relación señal-ruido muestran un comportamiento sutilmente mejor usando la técnica GMSK que OFDM en algunos casos. Sin embargo, en esta simulación no se tuvo en cuenta ruido impulsivo o interferencias de banda angosta en el canal, donde el esquema de modulación OFDM puede presentar ventajas debido a su posibilidad de adaptar la potencia y tipo modulación por portadora de acuerdo con las características espectrales del canal y el ruido. Adicionalmente, OFDM presenta ventajas sobre GMSK en los siguientes aspectos: reducción de ISI y entre canales, menor potencia de transmisión, y ahorro de ancho de banda por sus características de ortogonalidad y superposición (eficiencia espectral).

4.5 Síntesis de un modelo de transmisión mediante herramientas Hardware.

La simulación del sistema de modems diseñados, ha permitido adquirir los conceptos de teoría de señales necesarios para crear un modelo de transmisión real, mediante herramientas para síntesis de hardware. Con este conocimiento se desarrollaron algunos bloques básicos de un sistema de telecomunicaciones. La herramienta utilizada fue el ISE 8.1i de Xilinx Corporation, que a través del paquete System Generator permite la integración con Matlab, mediante el entorno del Simulink, facilitando la manipulación de sus componentes. Esta integración permite que Xilinx opere como una librería del Simulink de Matlab, facilitando la creación de modelos de forma transparente, para posteriormente sintetizarlos en

código VHDL (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language), entendido por los recursos FPGAs (Field Programmable Gate Array) propios de esta compañía.

Los bloques que se desarrollaron en Xilinx fueron:

1. Transmisión y recuperación de datos a través de los bloques codificador convolucional y decodificador de Viterbi.
2. Modulador y demodulador BPSK.
3. Modulador QPSK y su respectiva constelación.
4. Modulador OQPSK
5. Modulador MSK (*Minimum Shift keying*).

El diseño de cada uno de estos bloques se explica detalladamente en la sección 4 del Anexo “Solución de Acceso a una Intranet utilizando la tecnología PLC”.

5. DISEÑO DE UNA RED GENÉRICA Y SU FUNCIÓN DE COSTOS DE IMPLANTACIÓN.

Las redes de acceso Powerline Communications (PLC) usan la infraestructura de la red de bajo voltaje para ofrecer diferentes servicios de telecomunicaciones de baja y alta velocidad, tal como telefonía, acceso a Internet, entre otros. La principal ventaja de la tecnología PLC es la reutilización de la infraestructura existente de la red eléctrica. Sin embargo, se requiere la instalación de equipos adicionales que permiten la transmisión de señales de datos entre los usuarios y la red de área amplia (WAN). Entre los equipos adicionales se encuentra la Estación Base (BS) cuya tarea principal es conectar la red de acceso PLC al backbone de la red (o red metropolitana), además de organizar el acceso de los usuarios al medio con el fin de realizar una utilización eficiente de la capacidad del medio. La organización del acceso al medio se realiza porque el medio es compartido, en el cual a cada cable de suministro eléctrico se encuentran conectados diferentes usuarios (Figura 5.1).

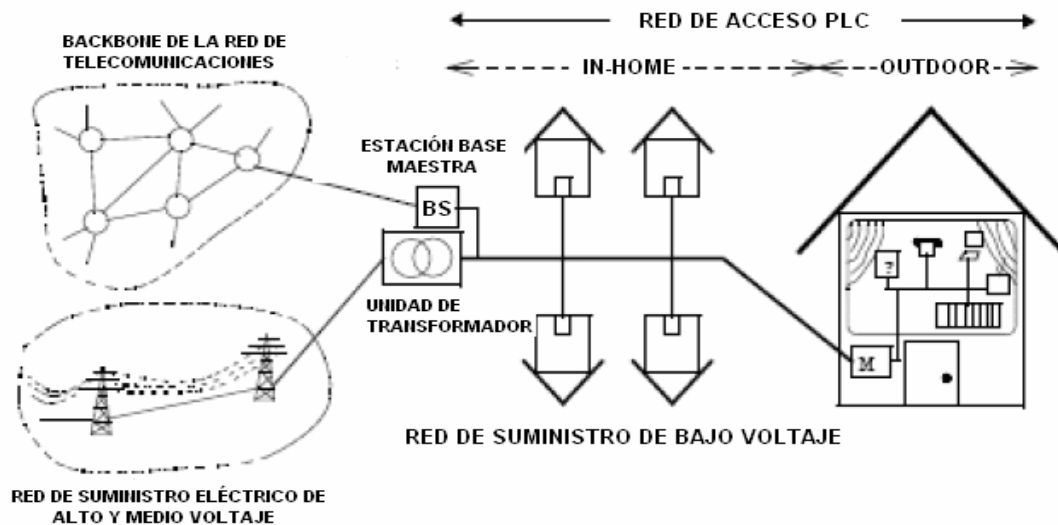


Figura 5.1. Estructura General de una red de acceso PLC [61]

Para hacer competitiva la red de acceso PLC con las diferentes tecnologías de acceso, la adaptación de la red de bajo voltaje a una red de telecomunicaciones se debe realizar con el menor costo posible. Estos costos pueden optimizarse con la instalación de un número óptimo (o mínimo) de estaciones base, de tal forma que se garantice una calidad de servicio aceptable a los usuarios [59].

Para tener una idea de los costos de implantación de la tecnología es necesario conocer la infraestructura sobre la que está soportada. Para esto se definirá de forma general la estructura de las redes de bajo voltaje que permiten llevar a cabo la implementación de la tecnología PLC como solución de acceso.

5.1 Redes de Bajo Voltaje

La Red de Bajo Voltaje (*LVN - Low Voltage Network*) es la parte de la red de distribución de energía, que conecta la parte de voltaje más alta de la red con los límites del consumidor. Las rejillas de baja tensión se representan usualmente como una estructura en árbol. Sin embargo, este no es siempre el caso, porque el requerimiento de confiabilidad de esas rejillas ha sido transformado en un conjunto de anillos conectados. Sin embargo, la estructura de árbol de las LVNs es aún usada en algunas regiones, como en los sectores rurales, donde los usuarios no demandan gran cantidad de energía [60].

5.1.1 Estructura de las redes de bajo voltaje

Las redes de distribución de electricidad están constituidas principalmente por tres niveles: la red de alto voltaje, el nivel más alto de la rejilla de voltaje, la grilla de medio voltaje como un nivel intermedio hacia los usuarios de electricidad, y la red de bajo voltaje. Esta jerarquía se ilustra en la Figura 5.2 [59].

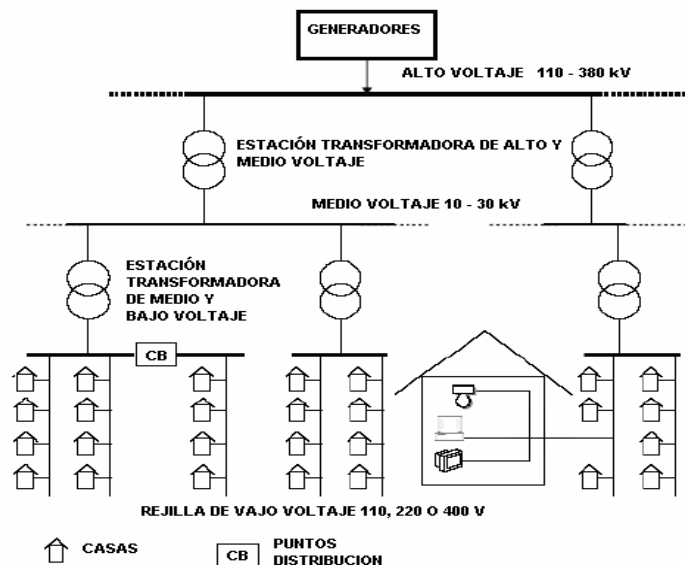


Figura 5.2. Jerarquía de las redes eléctricas [59].

El uso de las rejillas de alto, medio y bajo voltaje para transmisión de datos (o información) empezó desde hace ya varios años. Sin embargo, el interés se enfoca en el uso de la rejilla de baja tensión o voltaje que permite la construcción de las redes de acceso PLC [59].

Las redes de bajo voltaje o LVNs pueden tener estructuras diferentes dependiendo de una localización o de otra. La estructura de la LVN está determinada por la naturaleza de las regiones (tanto sectores urbanos como rurales), la naturaleza de los clientes (como usuarios industriales o residenciales), etc. Sin embargo, es posible clasificar la estructura de las LVNs de acuerdo a la naturaleza de su ambiente (o localización) en diferentes tipos, tales como [59]:

- Tipo A: localización con edificios dispersos
- Tipo B: pueblos o aldeas, principalmente compuesto por edificaciones agropecuarias
- Tipo C: localización de pocos hogares, con baja densidad de consumo
- Tipo D: localización de varios hogares, con alta densidad de consumo.
- Tipo E: áreas con hileras de casas
- Tipo F: zonas con hileras de edificios altos, con baja densidad de consumo
- Tipo G: zonas con hileras de edificios altos, con alta densidad de consumo
- Tipo H: áreas con bloques de edificios separados
- Tipo I: ciudades históricas, o sectores céntricos.

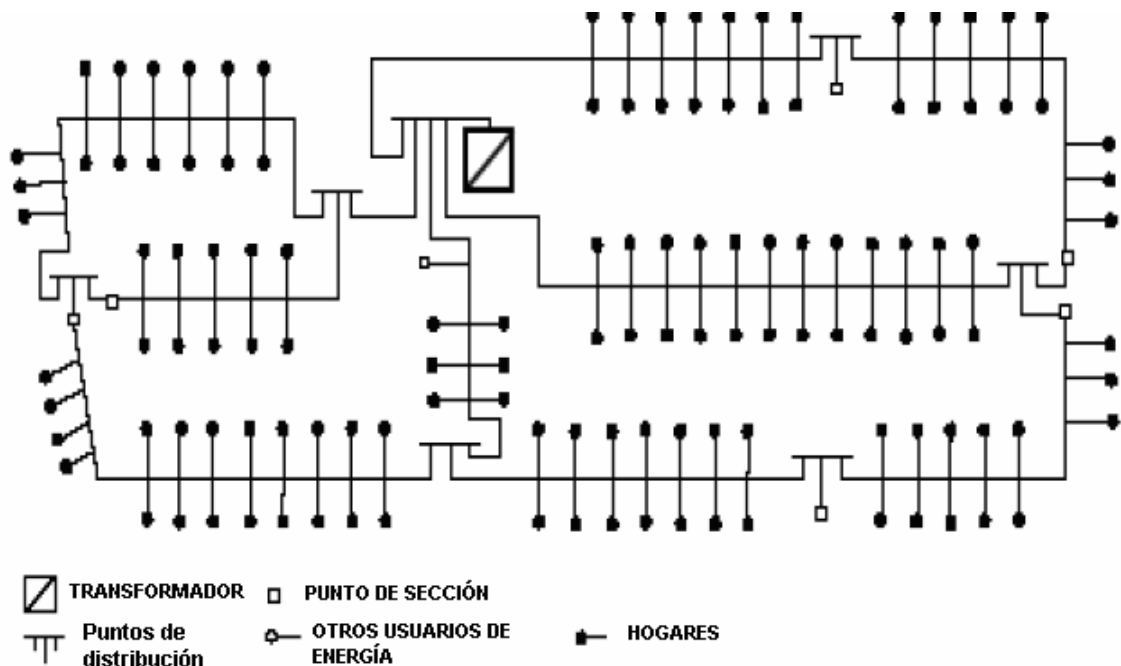


Figura 5.3. Estructura de la red de bajo voltaje Tipo C [60]

5.1.2 Modelado de las redes de bajo voltaje y la célula PLC

Considerando la LVN en la Figura 5.3, puede interpretarse la red como un conjunto de anillos conectados. Estos anillos se forman a través de la inserción de puntos de sección, que garantizan una mínima disponibilidad del suministro eléctrico. Para la tecnología de acceso PLC, el punto de sección puede ser considerado como abierto y por lo tanto puede ser ignorado, convirtiendo la LVN en una topología en árbol, cuya raíz es la estación transformadora. El árbol es una estructura gráfica bien conocida con diferentes variantes, pero para este caso se considerará solamente como una simple estructura en árbol sin orden. Los nodos de este árbol son los armarios o gabinetes en las calles denominados *puntos de distribución*; instalados en la mayor parte sobre los andenes (Figura 5.4). En general el árbol de una LVN tiene los siguientes elementos [59]:

- Un conjunto U_s que incluye todos los usuarios de energía quienes son también potenciales subscriptores de PLC;
- Una raíz la cual es representada por la estación transformadora;
- Un conjunto de nodos N_s que representa a todos los puntos de distribución de la calle en la rejilla de bajo voltaje;
- Un conjunto de bordes (o ramas) E_s donde la rama es el enlace que conecta dos nodos (armarios en la calle SC_s (street cabinas)).
- Diferente de la forma de árbol general, en las cuales las salidas son los nodos que no tienen hijos, en nuestro caso las salidas del árbol son las extremidades de los enlaces que se derivan desde los nodos sin hijos, como en la Figura 5.4.

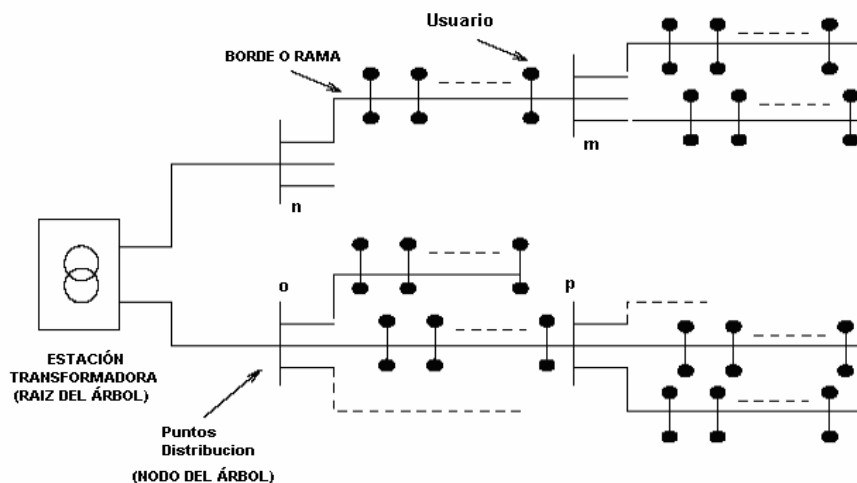


Figura 5.4. Modelo en árbol de la red de bajo voltaje [59]

Además, debido a la naturaleza especial de la planeación de las redes de acceso PLC, se debe tener en cuenta también en consideración el conjunto de usuarios que pertenecen a cada enlace (o borde) en el árbol. Entonces, denotamos $U_s^{(n,m)}$ al conjunto de usuarios que pertenecen a cada enlace, el cual conecta los nodos n y m . Estos conjuntos son primordiales para la formulación y solución de los emplazamientos de las estaciones base.

La meta de la planeación PLC es colocar las estaciones base PLC, asignar sus usuarios y asignar a cada estación base los canales PLC que pueden usar. En otras palabras, estos resultados de planeación son llamados células PLC. Dependiendo del tamaño de la LVN, pueden ser construidas uno o varias células PLC, estructuradas para cada sitio PLC (Figura 5.5). La entidad de una célula contiene una BS, sus usuarios y los repetidores usados por esta BS para prestar servicio a los usuarios. Por lo tanto, una célula PLC j puede ser vista como un árbol $(B_j, R_s^{(j)}, E_s^{(j)}, U_s^{(j)})$ teniendo como administrador el nodo B_j donde está localizada la BS, $R_s^{(j)}$ como el conjunto de nodos en el árbol que representan los lugares donde están localizados los repetidores que se utilizan para alcanzar a los usuarios $U_s^{(j)}$, los cuales se denominan pertenecientes a cada rama, denotada por $E_s^{(j)}$ [60].

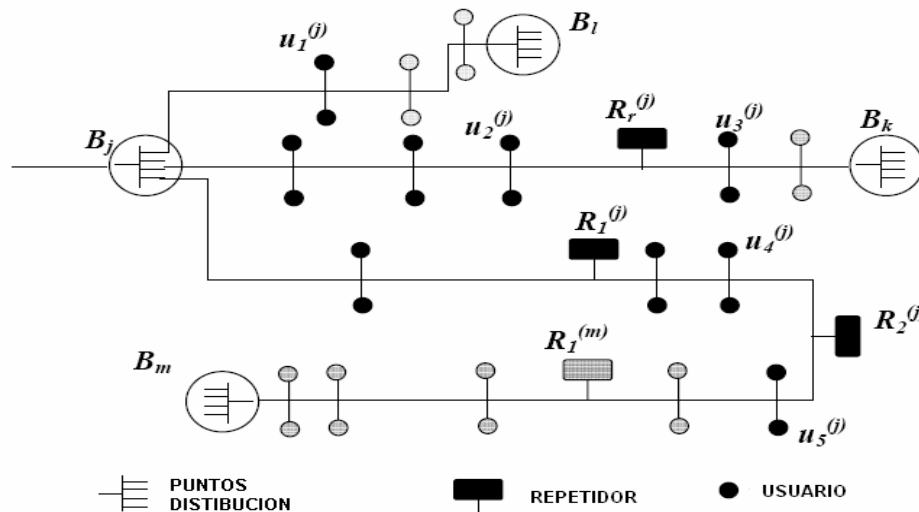


Figura 5.5. Ejemplo de un sitio PLC [60]

5.2 Planeamiento de las Redes de Acceso PLC Banda Ancha y sus Costos

5.2.1 Problema de Localización de la Estación Base (BSP)

Para planear una red de acceso PLC, se debe definir en la LVN considerada un conjunto de potenciales lugares, donde sea posible instalar una o más estaciones base. Una primera tarea de proyección consiste en encontrar los lugares óptimos de este conjunto, donde se instalarán un número de BSs. Después de colocar las BSs, se debe asignar los usuarios PLC a cada una de las BSs en una forma óptima, con el fin de invertir un mínimo de costos posible. Por esta razón, se definen los siguientes conjuntos que permitirán la formulación matemática que ayudarán en los objetivos de optimización [59]:

- Un conjunto de posición, lugares o localizaciones, definidas por $P_S^{(BS)}$, y donde las BSs puedan ser instaladas, con $P^{(BS)} = |P_S^{(BS)}|$ y generalmente $P_S^{(BS)} = V_{LVN}$.
- Un conjunto de posición definida por $P_s^{(R)}$ donde los repetidores pueden ser instalados con $P^{(R)} = |P_s^{(R)}|$, y generalmente es posible que $P_S^{(BS)} \subseteq P_s^{(R)}$.
- Un conjunto U_s de usuarios de energía, o grupos familiares, deseosos de suscribirse al servicio PLC, con $U = |U_s|$;
- y un conjunto de puntos de acceso WAN, W_s a través del cual las BSs instaladas pueden tener acceso a la red de área amplia (WAN), con $W = |W_s|$.

La localización de las BSs debe ser logrado con un mínimo posible de costos. Los costos de localización de la BS contiene los costos de las BSs y sus costos de instalación, los costos de los usuarios asignados a esas BSs, los costos de los repetidores necesarios y los costos de conexión de cada BS al punto de acceso WAN.

La función de costo BSP es formulada en la Ecuación 5.1 usando las siguientes variables:

- $C_j^{(B)}$: Costos de la BS j y sus costos de instalación
- $C_{ij}^{(BU)}$: Costos de asignación del usuario i a la BS j .
- $C_{j'}^{(R)}$: Costos de un repetidor j' para la BS j y sus costos de instalación.
- $C_{jk}^{(BW)}$: Costos de conexión de la BS j al punto de acceso WAN k .
- X_j : es igual a 1 si una BS es instalada en posición j , de otra manera esto es igual a 0.
- Y_{ij} : es igual a 1 si el usuario i es asignado a la BS j , y 0 en otro caso.
- $Z_{j'}$: es igual a 1 si la BS j requiere un repetidor j' para prestar servicio a mínimo uno de sus usuarios.
- W_{jk} : es igual a 1 si la BS j accede a la WAN sobre el punto de acceso k ; donde $j \in \{1, 2, \dots, P^{(BS)}\}$, $j' \in \{1, 2, \dots, P^{(R)}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, U\}$ y $k \in \{1, 2, \dots, w\}$.

Los números K_B y K_w son las capacidades de las BSs y los puntos de acceso WAN, respectivamente. Estos se asumen como constantes para todas las BSs y todos los puntos de acceso, respectivamente. La capacidad K_B representa el máximo número de usuarios a los que esta BS puede proveer servicio, garantizando una calidad de servicio satisfactoria (por ejemplo tasa de bit) a cada usuario. Por ejemplo, si una BS tiene una capacidad de 2Mbps, se puede decir que el máximo número de usuarios a los que la BS puede prestar servicio es 10 usuarios. En este caso $K_B = 10$ y la BS garantiza un tasa de bit significativa de 200 kbps por cada usuario [59].

Ecuación 5.1.

$$v = \sum_{j=1}^{P^{(BS)}} C_j^{(B)} X_j + \sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^{P^{(BS)}} C_{ij}^{(BU)} Y_{ij} + \sum_{j'=1}^{P^{(R)}} C_{j'}^{(R)} Z_{j'} + \sum_{j=1}^{P^{(BS)}} \sum_{k=1}^w C_{jk}^{(BW)} W_{jk}$$

Y es condicionada por:

Ecuación 5.2 Ecuación 5.3 Ecuación 5.4 Ecuación 5.5

$$d_{ij}^{(BU)} \leq L_{m\acute{a}x} \qquad d_{j'j}^{(BR)} \leq L_{m\acute{a}x}$$

$$\sum_{j=1}^{P^{(BS)}} Y_{ij} = 1$$

Ecuación 5.6

$$\sum_{i=1}^U Y_{ij} \leq K_B$$

Ecuación 5.7

Ecuación 5.8

Ecuación 5.9

$$\sum_{j=1}^{P^{(BS)}} W_{jk} = 1$$

$$d_{ji'}^{(RU)} \leq L_{m\acute{a}x}$$

$$\sum_{k=1}^w W_{jk} \leq K_w$$

$$X_j, Y_{ij}, W_{jk}, Z_{j'} \in \{0,1\}$$

Donde $d_{ij}^{(BU)}$ es la distancia entre BS j y el usuario i , $d_{jj'}^{(BR)}$ es la distancia entre BS j y su repetidor j' y su usuario i' , el cual puede ser alcanzado solamente usando ese repetidor. La constante $L_{m\acute{a}x}$ es la máxima distancia sobre la cual la señal PLC puede ser transmitida y correctamente recibida. La ecuación 5.2 garantiza que cada usuario se conecte a exactamente una estación base. La ecuación 5.4 asegura que la capacidad de una estación base no será excedida. La ecuación 5.6 garantiza que cada estación base tiene exactamente una conexión de acceso a la red de área amplia, mientras que la ecuación 5.8 es con respecto a la capacidad de cada punto de acceso.

Otra importante condición límite para la localización de la estación base y la asignación de usuarios es la “condición de visibilidad”. Esta condición consiste en que cada usuario debe ser visible por su BS, por ejemplo ninguna otra estación base debe ser localizada entre una BS y sus usuarios [61].

Para explicar esta condición, se considera la Figura 5.6, donde ningún usuario del conjunto $U_s^{(j'j'')}$ puede ser asignado a la BS en el nodo (SC) j , si una BS existe en el nodo j' . Esta condición puede ser formulada matemáticamente de la siguiente forma:

$$\text{Si } X_{j'} = 1, \text{ entonces } U_s^{(j'j'')} \cap U_s^{(j)} = \emptyset$$

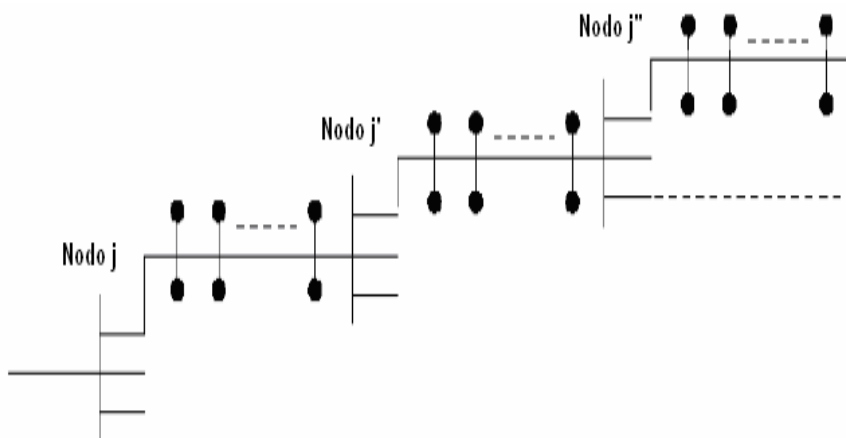


Figura 5.6. Condición de visibilidad del BSP [59]

La optimización del problema BSP se encuentra solucionando la función de la ecuación 5.1. Sin embargo, debido a que es difícil enumerar todas las posibilidades del espacio de soluciones con el fin de encontrar una solución global, se utilizan métodos heurísticos para solucionar este problema. Los algoritmos o métodos heurísticos son aquellos que toman muestras del espacio de solución y las evalúan de acuerdo a algunas reglas definidas. Al final, la mejor solución encontrada por el algoritmo será considerada como la solución final del problema [59].

5.2.2 Problema de Asignación del Canal (CAP)

Después de construir las células PLC de acuerdo a la determinación de las necesidades de cada estación base y los usuarios a los que presta servicio, se tiene que determinar el conjunto de canales que van a ser usados por cada BS para su operación. Esta tarea es llamada Problema de asignación del Canal (*CAP - Channel Allocation Problem*). La solución CAP tiene dos objetivos principales.

- Primero, cada BS debe obtener un número suficiente de canales PLC con el fin de satisfacer la tasa de bit (o calidad del servicio) a sus subscriptores.
- Segundo, la solución encontrada por el CAP debe garantizar la compatibilidad electromagnética entre todas las células. La compatibilidad electromagnética significa que cada célula PLC puede operar sin perturbación a sus células vecinas y sin ser perturbadas por ellas. En otras palabras, todas las células PLC deben ser capaces de operar simultáneamente sin perturbación (o interferencia) con cada otra.

Esta tarea de asignación del canal (o problema CAP) dispone de un conjunto total de canales PLC disponible F_s y debe asignar a cada estación base B_j un subconjunto de canales $F_{asignado}^j$ que debe ser capaz de cubrir la demanda de capacidad de la célula $F_{demandado}^j$.

Esta demanda de capacidad está definida para cada célula de acuerdo al número de usuarios a los que la estación base presta servicio y de acuerdo a la naturaleza de su tráfico. Además, la configuración asignada al canal escogido tiene que garantizar que todas las células puedan operar simultanea y correctamente, por ejemplo sin interferencia entre las células. La evasión de interferencia se puede lograr mediante la consideración de la matriz de interferencia de la distancia (M_{ID}), en la cual cada elemento a_{ij} determina la distancia entre cada elemento del canal de $F_{asignado}^j$ en la célula i y $F_{asignado}^j$ en la célula j .

La matriz de compatibilidad electromagnética EMC entre canales es escrita de la siguiente forma:

$$M_{ID} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,1} & a_{i,j} & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots \\ a_{B,1} & \dots & a_{B,B} \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.10

Donde B es el número de estaciones base construidas (o células) en la LVN considerada. El elemento a_{ij} es el número de separación de frecuencia requerida entre los canales usados por las células i y j con

$$a_{ij} = \begin{cases} a: & \text{Número de separación requerida (distancia)} \\ 0: & \text{Célula } i \text{ y } j \text{ que puede usar el mismo canal} \end{cases}$$

La matriz M_{ID} representada por la ecuación 5.10 es una matriz en la que cada elemento a_{ij} representa la distancia de frecuencia entre las células i y las j . Esto significa, que cada elemento $f_s^{(i)}$ usado por la célula i y el canal $f_s^{(j)}$ usado por la

célula j debe estar distanciado por a_{ij} canales. Esta condición puede también ser formulada de la siguiente manera:

$$\left| f_g^{(i)} - f_g^{(j)} \right| \geq a_{ij}, \forall f_g^{(i)} \in f_s^{(i)} \quad \text{Y} \quad f_g^{(j)} \in f_s^{(j)} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

La asignación de los canales del conjunto F_s a las B células PLC construidas, puede representar los resultados de la asignación en la forma de una matriz que puede ser llamada *matriz de localización*, representada por la ecuación 5.12

$$M_A = \begin{bmatrix} b_{1,1} & & \dots & & b_{1,B} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ b_{p,1} & & b_{p,q} & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ b_{F,1} & & \dots & & b_{F,B} \end{bmatrix}$$

Ecuación 5.12

Un elemento $b_{p,q}$ de la matriz M_A da la información si la frecuencia del canal f_p es asignada a la célula PLC q o no. Por lo tanto, este elemento puede ser formulado de la siguiente forma:

$$b_{p,q} = \begin{cases} 1: & \text{Si } f_p \text{ es asignado a la célula } q \\ 0: & \text{0 entro caso} \end{cases} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

El problema de asignación del canal fue en primera medida encontrado en la proyección de sistemas inalámbricos, donde recibe el mismo nombre. La mayoría de referencias disponibles tratan este problema por algoritmos heurísticos, debido a la dificultad de buscar todo el espacio de soluciones [62].

5.3 Comparación de costos en redes de acceso PLC y redes de cableado estructurado.

Un análisis de costos implica un estudio más detallado que tiene en cuenta factores que dependen de la naturaleza de la región, costos de operación, mantenimiento, administración, infraestructura, entre otros. Teniendo en cuenta

esto y con el fin de tener una idea aproximada acerca de la tecnología PLC se ha decidido limitar su estudio a costos de infraestructura y de paquetes comerciales, comparando la tecnología PLC con tecnología Ethernet. Para ello se define el siguiente escenario:

Tres edificios atendidos cada uno por un punto de distribución y cada uno de estos puntos están conectados a un transformador. Se supone que en cada edificio hay cincuenta (50) usuarios, de los cuales veinte (20) ya tienen acceso a servicios de Internet (voz, video-streaming y datos). La inquietud surge de brindar dichos servicios a los treinta (30) usuarios restantes de cada edificio, ya sea con la tecnología PLC o Ethernet, para determinar cual de ellas es la más económica en la parte de infraestructura. El número total de usuarios en los tres edificios sería noventa (90).

5.3.1 Costos Infraestructura.

5.3.1.1 PLC en el escenario planteado.

Para garantizar los servicios descritos anteriormente a cada uno de los treinta (30) usuarios de los tres edificios se requieren de los siguientes equipos:

1. Cabecera PLC (HE): ubicada en el transformador y es la encargada de brindar conexión con el backbone de la red (Internet)
2. Gateway PLC: Ubicada en cada punto de distribución y tiene como función segmentar el tráfico de cada punto de distribución.
3. Módems PLC: ubicados en las oficinas de cada uno de los usuarios. Uno (1) por cada usuario.

La tabla 5.1 ilustra el número de usuarios que atiende cada punto de distribución.

PUNTOS DISTRIBUCION	# USUARIOS
Punto de distribución 1	30
Punto de distribución 2	30
Punto de distribución 3	30

Tabla 5.1. Distribución usuarios para PLC

La tabla 5.2 ilustra los costos de cada uno de los dispositivos necesarios para cada uno de los tres (3) puntos de distribución y el equipo cabecera PLC. Cabe mencionar que en la medida que se establezca un estándar definitivo para la tecnología PLC, esto hará posible la masificación de la misma y por lo tanto los

precios de los equipos PLC tendrán la tendencia de disminuir sus precios. En la tabla 5.2 se especifica la referencia de los equipos comerciales de la empresa canadiense Corinex.

PUNTO DE DISTRIBUCION 1		
EQUIPOS	EUROS	REFERENCIA
1 HG	533.1 [61]	Corinex AV200 MDU Gateway
30 Modems (c/u 114.1 Euros)	3423 [61]	Corinex AV200 Powerline Ethernet Adapter (Para 32 usuarios)
<i>Total Gastos Punto de distribución 1</i>	<i>3956.1</i>	
PUNTO DE DISTRIBUCION 2		
EQUIPOS	EUROS	REFERENCIA
1 HG	533.1 [61]	Corinex AV200 MDU Gateway
30 Modems (c/u 114.1 Euros)	3423 [61]	Corinex AV200 Powerline Ethernet Adapter (Para 32 usuarios)
<i>Total Gastos Punto de distribución 2</i>	<i>3956.1</i>	
PUNTO DE DISTRIBUCION 3		
EQUIPOS	EUROS	REFERENCIA
1 HG	533.1 [61]	Corinex AV200 MDU Gateway
30 Modems (c/u 114.1 Euros)	3423[61]	Corinex AV200 Powerline Ethernet Adapter (Para 32 usuarios)
<i>Total Gastos Punto de distribución 3</i>	<i>3956.1</i>	
HE (Ubicado en el transformador)		
EQUIPO	EUROS	REFERENCIA
1 HE	409.9 [61]	Corinex Low voltage access Gateway
<i>Total Gastos HE</i>	<i>409.9</i>	
TOTAL GASTOS	12277.4	

Tabla 5.2. Costo equipos PLC

5.3.1.2 ETHERNET en el escenario planteado.

Tomando como referencia que el número total de usuarios es noventa (90), se segmentaría la red en cuatro (4) subredes. Se opta por segmentar el escenario en 4 subredes debido a que existen en el mercado switches de 24 puertos.

Para garantizar los servicios descritos anteriormente a cada uno de los usuarios de cada subred se requieren los siguientes equipos:

1. Router: Es el encargado de brindar conexión con el backbone de la red (Internet)
2. Switch: Encargado de administrar cada subred.
3. Armario o Rack: donde se ubica el centro de cableado de cada switch.
4. Tarjetas de red: Encargadas de conectar los equipos de los usuarios a la red.

Es decir cada subred estaría compuesta en base a la tabla 5.3.

SUB RED	# USUARIOS
Subred 1	23
Subred 2	23
Subred 3	22
Subred 4	22

Tabla 5.3. Distribución usuarios para Ethernet

La tabla 5.4 ilustra los costos de cada uno de los dispositivos necesarios para cada una de los cuatro (4) subredes y Router. Además se describen las especificaciones de cada uno de los dispositivos.

SUBRED 1		
EQUIPOS	EUROS	REFERENCIA
1 switch 24 puertos	349 [62]	PowerNet 3424
23 puntos de red (Costo promedio por punto = 107.1 Euros ¹⁹)	2463.3	
23 Tarjetas de red (c/u 4.5 Euros)	103.5 [63]	TRENDNET Tarjeta PCI Ethernet 10/100 Mb TE100-PCIWN - 32 bits
1 Rack (Armario)	665.3 [64]	PowerEdge™ 2410 24U rack enclosure
<i>Total Gastos Subred 1</i>		<i>3581.1</i>
SUBRED 2		
EQUIPOS	EUROS	REFERENCIA
1 switch 24 puertos	349 [62]	PowerNet 3424
23 puntos de red (Costo promedio por punto = 107.1 Euros)	2463.3	
23 Tarjetas de red (c/u 4.5 Euros)	103.5 [63]	TRENDNET Tarjeta PCI Ethernet 10/100 Mb TE100-PCIWN - 32 bits
1 Rack (Armario)	665.3 [64]	PowerEdge™ 2410 24U rack enclosure
<i>Total Gastos Subred 2</i>		<i>3581.1</i>

¹⁹ Incluye cable, canaleta, mano de obra. Datos suministrados por Ingeniero Jaime Gaviria (Jefe Red de Datos Universidad del Cauca)

DISEÑO DE UNA RED GENÉRICA Y SU FUNCIÓN DE COSTOS
DE IMPLANTACIÓN

SUBRED 3		
EQUIPOS	EUROS	REFERENCIA
1 switch 24 puertos	349 [62]	PowerNet 3424
22 puntos de red (Costo promedio por punto = 107.1 Euros)	2356.2	
22 Tarjetas de red (c/u 4.5 Euros)	99 [63]	TRENDNET Tarjeta PCI Ethernet 10/100 Mb TE100-PCIWN - 32 bits
1 Rack (Armario)	665.3 [64]	PowerEdge™ 2410 24U rack enclosure
<i>Total Gastos Subred 3</i>		<i>3469.5</i>
SUBRED 4		
EQUIPOS	EUROS	REFERENCIA
1 switch 24 puertos	349 [62]	PowerNet 3424
22 puntos de red (Costo promedio por punto = 107.1 Euros)	2356.2	
22 Tarjetas de red (c/u 4.5 Euros)	99 [63]	TRENDNET Tarjeta PCI Ethernet 10/100 Mb TE100-PCIWN - 32 bits
1 Rack (Armario)	665.3 [64]	PowerEdge™ 2410 24U rack enclosure
<i>Total Gastos Subred 4</i>		<i>3469.5</i>
ROUTER		
EQUIPO	EUROS	REFERENCIA
1 Router	399 [65]	Cisco 831 Ethernet Broadband Router
<i>Total Gastos Router</i>		<i>399</i>
TOTAL GASTOS		14500.2

Tabla 5. 4. Costo equipos Ethernet

5.3.1.3 Análisis de costos de infraestructura de acuerdo al escenario planteado.

De acuerdo a los resultados de costos totales de las tablas 5.2 y 5.4 se puede apreciar que los costos de infraestructura de PLC en comparación con Ethernet resultan más económicos, pero se debe tener en cuenta que en nuestro país aun no existe una reglamentación para el despliegue de la tecnología, y la falta de un estándar definitivo que respalde la tecnología hace que las empresas eléctricas teman a optar por esta tecnología como una solución de telecomunicación alternativa.

La economía de costos en infraestructura PLC se debe principalmente a tres factores:

1. Uso de la línea eléctrica como medio de transmisión, es decir no se requiere de uso de cableado extra hacia el usuario.

2. El aumento de la demanda en equipos PLC ha hecho posible que los precios de estos hayan disminuido notoriamente, pues hacia el 2004 un HE costaba alrededor de 3000 Euros. Actualmente este equipo esta por el orden de 400 Euros.
3. Diversidad de fabricantes de equipos PLC como Corinex, Ascom, Toyocom, entre otros, obligando a estos a ofrecer productos con tarifas competitivas en el mercado.

5.3.2 Costos Servicios Comerciales

A continuación se describen precios comerciales de servicios ofrecidos en España con las tecnologías ADSL y Cable modem. Se optó por escoger como referencia este país, pues es uno de los pioneros en prestar servicios PLC.

5.3.2.1 Precios de servicios Adsl/Cable

EMPRESA	PAQUETE COMERCIAL	COSTO MENSUAL (Euros)
Wanadoo	<i>ADSL NavegHable Nacional Router 512/128. (Tarifa plana. Telefonía e Internet)</i>	36
Terra	<i>Terra ADSL Plus 512/128. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Modem gratis.</i>	38.9
TelefonicaOnLine	<i>Kit autoinstalable ADSL 512. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Modem gratis.</i>	39,07
Yazztel	<i>ADSL 1 Mega. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Router Wi-Fi gratis.</i>	32.95
Tiscali	<i>ADSL F@st Dual 640/160 kbps. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Modem ADSL USB gratis.</i>	34.95
	<i>ADSL F@st 1M/300 kbps. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Router gratis.</i>	36,95
Ya.com	<i>ADSL 512/128 Voz. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Router Wi-Fi 11g 4 puertos gratis.</i>	32.95
	<i>ADSL 1Mb/300Kb Voz. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Router Wi-Fi 11g 4 puertos gratis</i>	36.95
ONO	<i>Banda Ancha ONO 24h. 3 Megas/150kbps. (Tarifa plana. Internet). Cable modem alquilado o comprado por 60 Euros.</i>	35.9
AUNA	<i>Pack Net 1Mega. (Tarifa plana. Telefonía e Internet) + Modem gratis durante: 6 meses (wifi) o 1 año (USB).</i>	39.3

Tabla 5. 5. Paquetes comerciales ADSL y Cable en España [66].

5.3.2.2 Precios de servicios PLC

EMPRESA	PAQUETE COMERCIAL	COSTO MENSUAL(Euros)
Iberdrola	PLC Iberdrola 1000.1000 Kbps. simétricos (Tarifa plana). Incluye instalación y modem gratis	39
	PLC Iberdrola 300. 300 Kbps simétricos (Tarifa plana). Incluye instalación y modem gratis	27.9

Tabla 5. 6. Paquetes comerciales PLC en España [66].

5.3.2.3 Análisis de costos de servicios comerciales.

De acuerdo a los precios de servicios comerciales en España (Tablas 5.5 y 5.6), PLC ofrece paquetes con tarifas similares a ADSL y con las mismas velocidades. El valor de estos servicios puede variar dependiendo de la empresa que los suministra.

5.4 Ventajas adicionales de PLC

PLC además de ser una solución de acceso que disminuye costos de implantación presenta múltiples ventajas como:

- Alta penetración de líneas eléctricas en los domicilios de los usuarios, facilitando conexión directa de los dispositivos a cualquier enchufe de la red eléctrica. Es decir cada enchufe de la red eléctrica se convierte en un punto de red, sin necesidad de cableado extra como el que se requiere en una LAN Ethernet, o con otras tecnologías.
- La red eléctrica tiene mayor cobertura que la red de telefonía. Es decir, con el sistema PLC la mayoría de la gente tendrá la posibilidad acceder a servicios sobre IP.
- Los proveedores de servicios PLC no requieren de infraestructura adicional, pues la infraestructura de baja y media tensión ya está establecida por los operadores eléctricos, mientras que proveedores de servicios de tecnologías como xDSL y CATV si requieren de infraestructura adicional para conectar a los usuarios finales.

- Facilidad de instalación de las redes PLC y rápido tiempo de operación (uno a dos días), mientras que en otras tecnologías el proceso de instalación es complejo y los tiempos de operación son del orden de las semanas.
- Las capacidades de datos alcanzadas por la tecnología PLC son superiores a tecnologías como ADSL en calidad y prestaciones.

En la Figura 5.7 se puede apreciar cómo la solución de acceso PLC se proyecta como una tecnología capaz de ofrecer al usuario costos significativamente menores y competitivos frente a sus dos adversarios directos como lo son las tecnologías ADSL y el Cable, tanto para el mercado residencial como empresarial.

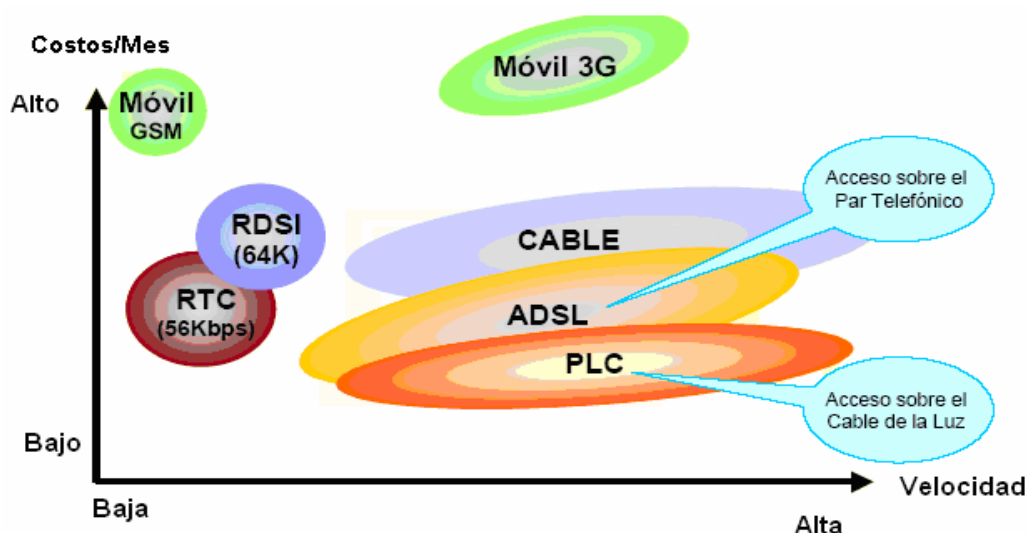


Figura 5.7. Comparativa de costos versus velocidad de acceso de las tecnologías Banda Ancha frente a las tradicionales (Red Telefónica Conmutada (RTC), Red Digital de Servicios Integrados (RDSI), GSM) [48]

5.5 PLC en Colombia

Actualmente, la tecnología PLC en Colombia está siendo estudiada como una posibilidad para promover y masificar el uso de la banda ancha, empezando desde los estratos 1 y 2. A pesar de esto, no existe ninguna prueba piloto establecida que permita incentivar el uso de la tecnología en los sectores empresariales, industriales y en los hogares.

La Comisión de Regulación de Telecomunicaciones considera que al existir nuevas tecnologías como sustituto o complemento a la infraestructura de telecomunicaciones existentes en el país, es posible, es necesario tener en cuenta

diferentes aspectos relacionados con su posible implementación, entre los cuales se tienen los siguientes puntos:

- Clasificación dentro del Marco Regulatorio actual de Colombia
- Servicios que puedan ser prestados
- Derechos de uso del espectro electromagnético.
- Canales que puedan ser utilizados, de acuerdo con la asignación existente en el cuadro nacional de atribución de frecuencias.
- Posibles cruces existentes entre la regulación del sector eléctrico y el sector de las telecomunicaciones.

El estudio de los anteriores puntos, crearán un entorno favorable para permitir la entrada de la tecnología y favorecer la mayor oferta de medios de acceso y conectividad a Internet.

6. SERVICIOS PLC EN UNA INTRANET

Con el propósito de determinar cuales servicios se podrían implementar en una Intranet PLC se recurrió a las especificaciones de los grupos de trabajo OPERA [67] y UPA [68].

Cabe recalcar que en la primera versión de OPERA existe una sección relacionada con QoS para PLC [67], pero para efectos de nuestro estudio y debido a la falta de estandarización de la tecnología PLC, se opta por no profundizar en este tema.

6.1 Parámetros de servicios PLC.

El estándar UPA DHS (Universal Power Line Association Digital Home Standard) fue creado con el propósito de asegurar que los servicios se puedan prestar sobre PLC. Adicional a esto, este estándar también se encarga de asegurar que no exista interferencia con otros servicios de otras tecnologías y trata temas de seguridad.

El grupo UPA en conjunto con DS2 trabajan en el draft IEEE P1901 [69], del cual ya existe una primera versión.

Los parámetros de servicios que se describen a continuación son datos del estándar UPA DHS y el draft IEEE 1901, los cuales se resumen en la Tabla 6.2. Este draft describe la relación de pérdida de paquetes.

6.1.1 Datos

Para transmisión de este servicio se requieren como mínimo 3 canales de 4Mbps cada uno. Entonces $BW_{\text{MINIMO}}=3*4\text{Mbps}=12\text{Mbps}$.

Dentro de esta categoría se encuentran las aplicaciones: Mail, Internet, E-Commerce. Entonces el BW mínimo para estas aplicaciones es 12 Mbps. La relación de pérdida de paquetes es alta, pues este servicio no es una aplicación en tiempo real.

6.1.2 Vo IP

Se requieren como mínimo 2 canales de 128kbps cada uno. Entonces $BW_{\text{MINIMO}}=2*128\text{kbps}=256\text{Kbps}$.

La máxima latencia es 30 ms, el máximo jitter es 20 ms. La pérdida de paquetes debe ser baja y el valor máximo de la relación de pérdida de paquetes es del 5%.

6.1.3 Video Streaming

Se requieren como mínimo: 4 canales de Televisión sobre IP (*IPTV - IP TeleVision*) de definición estándar (*SDTV -Standard Definition TeleVision*) de 5Mbps cada uno más 2 canales IPTV de alta calida de definición (*HDTV - High Definition TeleVision*) de 20 Mbps cada uno. Entonces $BW_{\text{MINIMO}}=4*5\text{Mbps}+2*20\text{Mbps}=60\text{Mbps}$.

La máxima latencia es 150 ms, el máximo jitter es 30 ms. La pérdida de paquetes debe ser baja y el valor máximo de la relación de pérdida de paquetes es del 1%.

El estándar UPA DSH considera diferentes codecs para video streaming, los cuales tienen un papel importante en las capacidades de ancho de banda requerido.

En la tabla 6.1 se ilustra como las velocidades dependen del codec, formato de resolución y escaneo seleccionado. Esta elección permite obtener una calidad de buena a excelente.

Formato de Resolución y escaneo	CODEC	Velocidad requerida para obtener calidad buena-excelente (Mbps)
720p	MPEG2	12-16
	MPEG4	6-8
	WM9	6-8
1080i	MPEG2	16-20
	MPEG4	8-10
	WM9	8-10
1080p	MPEG2	24-30
	MPEG4	12-15
	WM9	12-15

Tabla 6.1. Velocidades requeridas por diferentes codecs

SERVICIOS DEMANDADOS SOBRE UNA RED PLC

SERVICIO	MIN BW (MBPS)	LATENCIA (ms)	JITTER (ms)	PERDIDA DE PAQUETES
VoIP	0.25	<30	<20	Baja, <5% PLR
Video Streaming	60	<150	<30	Baja, <1% PLR
Audio	6	<30	*	Baja, <1% PLR
Datos	12	*	*	Alta

Tabla 6.2. Requerimientos de QoS y BW para servicios sobre PLC

*. Para estas aplicaciones no se especifica este dato.

De acuerdo a las especificaciones de las recomendaciones G1010 para VoIP el valor máximo de latencia es 150 ms y para Video Streaming es 10 s. Si se comparan estos dos valores con el campo de latencia para VoIP y Videostreaming de la tabla 6.2 se puede afirmar que estos servicios son soportados por una red PLC. El servicio de datos no es una aplicación en tiempo real, razón por la cual no se considera el parámetro de latencia.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los objetivos propuestos para este trabajo de grado se han alcanzado y al mismo tiempo se ha realizado un estudio sobre las características de los sistemas de transmisión de señales de comunicaciones a través de la línea eléctrica (Powerline Communication - PLC). Se presentaron diferentes criterios sobre el canal de transmisiones y sus efectos de ruidos sobre la señal de comunicaciones, además de abordar los efectos de compatibilidad electromagnética y posibles soluciones que podrían ayudar a que PLC se establezca como solución de acceso a nivel mundial.

El análisis de costos a partir de la red genérica y los servicios que pueden ser implementados sobre redes PLC permiten tener ventaja sobre las actuales tecnologías de acceso.

CONCLUSIONES

Respecto de la tecnología PLC.

- Efectivamente la inversión en infraestructura para una LAN PLC resulta más económica que una LAN Ethernet, con la ventaja que PLC puede conectarse utilizando cualquier enchufe eléctrico sin necesidad de cableado adicional.
- La economía de costos en infraestructura PLC se debe principalmente a tres factores:
 1. Uso de la línea eléctrica como medio de transmisión, es decir no se requiere de uso de cableado extra hacia el usuario.
 2. El aumento de la demanda en equipos PLC ha hecho posible que los precios de estos hayan disminuido notoriamente, pues hacia el 2004 un HE costaba alrededor de 3000 Euros. Actualmente este equipo esta por el orden de 400 Euros.
 3. Diversidad de fabricantes de equipos PLC como Corinex, Ascom, Toyocom, entre otros, obligando a estos a ofrecer productos con tarifas competitivas en el mercado.

- En cuanto a precios de servicios comerciales en España, los proveedores de servicios PLC ofrecen tarifas muy similares a las de sus homólogos en otras tecnologías, dependiendo de las tasas de transmisión alquiladas y las empresas que lo suministran.
- PLC ofrece ventajas adicionales como: Facilidad de instalación de las redes PLC y rápido tiempo de operación, los proveedores de servicios PLC no requieren de infraestructura adicional para conectar a los usuarios finales.
- Aunque aun no existe un estándar definitivo de la tecnología PLC, esta es una tecnología prometedora en la cual se esta invirtiendo un gran recurso económico en la parte investigativa (FASE II Opera (Apoyada por la Unión Europea)), para así solventar aquellas falencias que aún presenta la tecnología PLC como las interferencias con servicios HF.
- Los cuerpos de regulación y otras organizaciones interesadas (ETSI, PLCForum, entre otras) están trabajando sobre una especificación de los valores límites de operación de PLC, pero aún no existe estandarización para estos sistemas además del estándar CENELEC para transmisiones en banda angosta. Pese a esto, diferentes pruebas han sido llevadas a cabo exitosamente y han permitido valorar la tecnología PLC como una alternativa eficiente que permitirá conectar a todo el mundo mediante el uso de la conexión eléctrica desde cualquier enchufe en sus hogares.
- Ante la ausencia de un estándar PLC para Banda Ancha, los grupos de apoyo aportan especificaciones que tratan aspectos de la capa física, MAC, servicios, seguridad, entre otras. Estas especificaciones han generado valiosas contribuciones, que tienen como objetivo establecer el estándar para PLC, lo que permitirá la masificación de la tecnología.

Respecto del sistema simulado y las herramientas utilizadas.

- Se comprobó que OFDM y GMSK en conjunto con técnicas de codificación, permiten la transmisión de datos sobre la red eléctrica, en presencia de ruido aditivo blanco gaussiano. Para el sistema simulado se obtuvo que para un ancho de banda similar para ambos tipos de modulaciones, GMSK se comportó ligeramente mejor que OFDM, sin embargo, en nuestra simulación no se tuvo en cuenta ruido impulsivo o interferencias de banda angosta en el canal, donde el esquema de modulación OFDM puede presentar ventajas debido a su posibilidad de adaptar la

potencia y tipo modulación por portadora de acuerdo con las características espectrales del canal y el ruido.

- El sistema PLC simulado, sirve como guía de diseño para la implementación real de modems PLC sobre diferentes herramientas de síntesis y modelado de circuitos como VHDL.
- Matlab es una herramienta matemática que permite validar y evaluar diseños de sistemas de telecomunicaciones, llevándonos a una idea aproximada del comportamiento real de tales sistemas.
- Matlab permite la interacción con otro tipo de herramientas como Xilinx (Integrada como librería de Matlab), facilitando su uso mediante el entorno simulink y permitiendo la creación de diseños que pueden ser fácilmente sintetizados en lenguaje VHDL. No obstante, se requiere de una tarjeta FPGA específica que soporte los recursos hardware de la síntesis.
- A pesar que Xilinx es una herramienta de diseño para dispositivos hardware, que se puede programar como una librería desde el entorno Simulink de Matlab, difiere en la forma de operación de código en Matlab; ya que Matlab es una herramienta de simulación y en esta se trabaja bajo condiciones ideales y no se tienen en cuenta factores como tiempos de procesamiento y sincronización, los cuales son críticos en un sistema Hardware.
- Xilinx ofrece un bloque M_Code que permite cargar archivos de código Matlab los cuales tienen la extensión *.m, pero este bloque no sintetiza todas las funciones de Matlab, admitiendo unas cuantas funciones de Matlab. Este bloque no soporta vectores y al programar en Matlab todos los tipos de datos operan bajo el concepto de vectores. Entonces, no todo archivo que se simula en Matlab puede ser sintetizado por el bloque M_Code.
- Para diseñar sistemas en Xilinx es necesario tener muy claros los conceptos de teoría de señales y de programación de FPGA's, pues Xilinx es una herramienta para implementar sistemas reales.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Diseño y evaluación de un sistema PLC teniendo en cuenta ruido impulsivo o interferencias de banda angosta.

- Diseño y evaluación de un sistema adaptable a condiciones dinámicas del canal.

- Exploración de herramientas de emulación como Xilinx para el diseño de filtros y en especial de moduladores, lo que permitiría corroborar las características de operación de las líneas eléctricas e impulsaría la producción de equipos hardware en nuestro país. Esta exploración facilitaría la creación de un modelo similar al utilizado por los proveedores de equipos PLC permitiendo la evaluación de estas herramientas y en especial la evaluación de la tecnología.

- Implementación en Xilinx del modelo simulado en Matlab, con el fin de corroborar los resultados ideales de la simulación.

- Evaluación en Xilinx para diversas formas de generar GMSK:
 1. A través de MSK añadiendo el filtro Gaussiano
 2. Propuesta en el modelo simulado.

- Evaluación de la capa MAC y su influencia sobre la transmisión de datos a través de la red eléctrica

- Investigación de posibles herramientas que permitan evaluar protocolos de acceso sobre una red PLC

- Estudio de los problemas de compatibilidad electromagnética, para obtener criterios que permitan definir la operación adecuada de estos sistemas de modo tal que no afecte a otros sistemas de telecomunicación definidos en la banda de operación de PLC.

- Implementación de un sistema real de prueba PLC en el entorno universitario, mediante el uso de módems PLC, para evaluar los parámetros de un servicio específico (VoIP u otro).

- Estudio de algoritmos heurísticos, con el fin de resolver la optimización de los problemas de localización de las estaciones base y de asignación de las células a los sistemas PLC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hrasnica Halid, Lehnert Ralf, “Powerline Communications in Telecommunication Access Area (Powerline Communications im TK-Zugangsbereich)” Universidad Tecnológica de Dresden Alemania, Septiembre 25 de 2000.
- [2] Hrasnica Halid, Lehnert Ralf, “Powerline Communications in Telecommunication Access Area (Powerline Communications im TK-Zugangsbereich)” Universidad Tecnológica de Dresden Alemania, Enero 22 de 2001.
- [3] Garg V. K., Sneed E. L., “Digital wireless local loop system”, IEEE Communications Magazine, Octubre de 1996. (Doc tema4_redes inalámbricas)
- [4] Telefónica, La red de acceso, capítulo 8 http://www.telefonica.es/sociedaddelainformacion/pdf/publicaciones/telecomunicacionesng/capitulos/08_la_red_de_acceso.pdf
- [5] Ims L. A., “Wireline broadband access networks”, Teletronikk 73-87, 1999.
- [6] Metelo Cecilio, “La tecnología PLC en los Programas de Fomento de la Sociedad de la Información”, EKOPLC, Junio de 2005. <http://www.ekoplpc.net/noticias/programa-fomento/fundamentos-plc.htm>
- [7] L. Luis, “Power Line Communications”, plctecnocom, Polígono Industrial Vallecas, Madrid-España, 2003.
- [8] Diario Oficial de la Comisión Europea, “Recomendación de la Comisión relativa a las comunicaciones electrónicas de banda ancha a través de la red eléctrica”, Bruselas, Abril 6 de 2005
- [9] Berterreix, Germán y Bonet, Maximiliano, “Transmisión de datos por la red eléctrica (PLC) en Banda Angosta”, Universidad Nacional de Comahue, Depto. de Electrotecnia - Facultad de Ingeniería, 2006.
- [10] PLCForum, <http://www.plcforum.com>
- [11] <http://www.upaplpc.org>
- [12] Dostert Klauss, “Telecommunications over the Power Distribution Grid - Possibilities and Limitations”, IIR-Powerline 6/97, Alemania, 1997.

-
-
- [13] Alazabal Valencia Carlos, “DS2 la solución del mañana”, Jornadas “Nuevos tiempos, nuevas oportunidades”, Valencia España, Julio de 2005.
- [14] Tlili Fefhi, Rouissi Fatma, Ghazel Adel, “Precoded OFDM For PLC”, CitéTechnologique des Communications, Ariana- Tunisia, 2003.
- [15] Dostert Klauss, “EMC Aspects of High Speed Powerline Communication”, Instituto de Sistemas de Información Industrial, EMC Symposium WROCLAW Universidad de Karlsruhe, Alemania, Junio 30 de 2000.
- [16] Bumiller G., Pirschel N., “Airfield ground lighting automation system realised with power-line communication”, 7 th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC2003), Kyoto, Japan, March 26-28, 2003.
- [17] Henry Paul S., “Interference Characteristics of Broadband Power Line Communication Systems Using Aerial Medium Voltage Wires”, IEEE Communications Magazine, Abril de 2005.
- [18] Haidine A, Hrasnica H., Lehnert R., “Analysis and Modeling of Low Networks for Planning of Powerline Communications Access Networks”, Cátedra de Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de Dresden, Alemania, 2003.
- [19] McCaughern R.W., “Consulation Paper on Broadband over Power Line (BPL) Communication Systems, Spectrum Management and Telecommunications of Canada”, SMSE-005, Julio de 2005.
- [20] Australian Communications Authority, “Broadband Powerline communication systems, A Background Brief, Spectrum Planning Team, Radiofrequency Planning Group”, Documento SP 11/03, Septiembre de 2003.
- [21] Haidine A., Hrasnica H., Lehnert R., “Performance Comparison of Reservartion MAC Protocols for Broadband Powerline Communications Networks”, Cátedra de Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de Dresden, Alemania, 2003.
- [22] Little Arthur D., “White Paper on Power Line Communications (PLC)”, PUA PLC Utilities Alliance and PLC Forum, Octubre 12 de 2004.
- [23] Sandoval Cuervo Fernando, “PLC como oportunidad para el desarrollo de ciudades digitales”, II Foro Ciudades Digitales - Endesa Net Factory, Teruel, Mayo 31 de 2005.
- [24] Seema M. Singh, “BroadBand over Power Line. A White Paper”, División del Defensor Contribuyente, Newark, Estado de New Jersey, 2002.

-
-
- [25] Dominquez Richards Victor, “Call For Interest in Standards on Broadband over Power Lines”, DS2, Denver, Junio 7 de 2004.
- [26] Méndez Pérez Daniel, “Tecnología Powerline”, ISA - Ingeniería de Sistemas y Automática, Curso de Doctorado, Valencia España, 2001-2002.
- [27] Philipps H., “Development of a statistical model for powerline communications channels”, Proceedings of the 4th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Limerick, Irlanda, Abril 5-7, 2000.
- [28] Zimmermann Manfred, Dostert Klaus, “A Multipath Model for the Powerline Channel”, IEEE Transactions on Communications, VOL. 50 - No 4, Abril de 2002.
- [29] Zimmermann Manfred, Dostert Klaus, “A Multi-Path Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range”, Instituto de Sistemas de Información Industrial, Universidad de Karlsruhe, Alemania, Abril de 2002.
- [30] Andreou G. T., Manitsas E. K., Labridis D. P., Katsis P. L., Pavlidou F. N., Dokopoulos P. S., “Finite element characterization of LV power distribution lines for high frequency communications signals”, Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Kyoto, Japón, 109-119, Marzo 26-28, 2003.
- [31] Zimmermann Manfred, Dostert Klaus, “An análisis of the Broadband Noise Scenario in Powerline Networks”, Instituto de Sistemas de Información Industrial, Universidad de Karlsruhe, Alemania 2001.
- [32] Hrasnica Halid, Haidine Abdelfatteh, “Modeling MAC Layer for Powerline Communications Networks”, Cátedra de Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de Dresden, Alemania 2002.
- [33] Kuhn Marc, Wittneben Armin, “PLC enhanced wireless access networks: a link level capacity consideration”, Universidad de Saarland, Instituto de Comunicaciones Digitales. Alemania, Saarbruecken.
- [34] Liu Er, Gao Yangpo, Samdani Golam, Mukhtar Omar, Coronen Timo, “Broadband Powerline Channel and Capacity Analysis”, Laboratorio de Comunicación, Universidad de Tecnología de Helsinki, Finlandia, 2004.
- [35] Lluís Ferrer i Arnau, Introducción a la compatibilidad electromagnética, Departamento de Ingeniería Electrónica, UPC, Barcelona-España, 1999.
- [36] Delicado Bernardo A. “Nuevas Tecnologías y Seguridad en el Transporte Aéreo - La Compatibilidad Electromagnética”, Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. España, Madrid de 2003

- [37] IEC, Electromagnetic Compatibility, International Electrotechnical Vocabulary, capítulo 161, Publicación IEC, Geneva, Enero de 1989.
- [38] Associació de Mestres Rosa Sensat, Fundació Terra, “Perspectiva Ambiental 18, Suplemento de Electromagnetismo”, Barcelona, Abril de 2000.
- [39] Tihanyi L., “Electromagnetic Compatibility in Power Electronics”, IEEE Press, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Nueva York, 1995.
- [40] Comisión Internacional Electrotécnica, “EMC Electromagnetic compatibility - The role and contribution of IEC standards”, IEC, 2001.
- [41] Pérez Fernández Enrique, “Nuevo Método de Detección y Análisis en Tiempo Real de Eventos en la Tensión de Suministro de Energía Eléctrica Empleando un Modelo Combinado Wavelets-Filtro de Kalman Extendido”, Universidad de Cantabria, Departamento de Electrónica y Computadores, Santander, Marzo de 2006.
- [42] Zalitsky Y., Koret J., “Information Transmission over Power Lines”, Patente EE.UU App. No. US2004/0032320 A1, Estados Unidos, Febrero 19 de 2004.
- [43] Report and Order, ET Dockets 03-104 and 04-37, Octubre 28 de 2004. http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-04-245A1.doc
- [44] Hansen D., “Megabits per second on 50 Hz Power Lines?”, Proceedings of the International Wroclaw, Simposio sobre Compatibilidad Electromagnética EMC 2000, Wroclaw, Polonia, Junio 27-30 de 2000.
- [45] Fenton D., Brown P., “Some aspects of benchmarking high frequency radiated emissions from wireline communication systems in the near and far fields”, Proceedings of the 5th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Malmo, Suecia, Abril 4-6, 2001.
- [46] Newbury J., Yazdani J., “From narrow to broadband communications using the low voltage power distribution network”, Proceedings of the 7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Kyoto, Japón, Marzo 26-28 de 2003.
- [47] Hensen C., “CISPR 22 Compliance test of power-line transmission systems”, Proceedings of the 6th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC), Atenas, Grecia, Marzo 27-29 de 2002.

- [48] Veà Baró Andreu, “Evolución de la Tecnología de Acceso a Internet-PLC”. Tesis Doctoral, La Salle, Mayo de 2002.
- [49] Rodríguez Díaz Benigno, “Estudio de conveniencia del agregado de un bloque de precancelación de ruido, en un sistema basado en el estándar WLAN`s IEEE802.11^a”, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Agosto de 2004.
- [50] University of Hull - Appendix D.
www.emc.york.ac.uk/reports/linkpcp/appD.pdf
- [51] A. Bjerke , John G. Proakis, Y. Martin Lee, Zoran Zvonar, “A Comparison of GSMReceivers for Fading Multipath Channels with Adjacent- and Co-Channel Interference”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, VOL.18, No.11, Noviembre de 2000.
- [52] <http://www.tesis.ufm.edu.gt/fisicc/2003/74387/tesis.htm>
- [53] <http://www.cable-usuarios.org/post2631-1.php4>
- [54] Jiménez Leonardo, Parrado Joaquín, Quiza Carlos, Suárez Carlos, “Modulación Multiportadora OFDM”. Revista Ingeniería, Universidad Distrital, Febrero 2 de 2001.
- [55] Hrasnica Halid, Haidine Abdelfatteh, Lenhnert Ralf, “Broadband Powerline Communications Networks”, Universidad de Tecnología de Dresden, Alemania, 2003.
- [56] Serra i Serra Moisés, “Prototipatge Ràpid de la Capa Física d’OFDM: cas HIPERLAN/2”, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, Marzo de 2005
- [57] Couch L. II, “Sistemas de Comunicación A/D. Cap. 3: Códigos de Línea precodificación: codificación diferencial, aleatorización interferencia entre símbolos y su eliminación”.
- [58] Haykin Simon, Moher Michael, “Modern Wireless Communications. Internacional edition”, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [59] Haidine Abdelfatteh, Hrasnica Halid, Lehnert Ralf, “Analysis and Modeling of Low-Voltage Networks for Planning of Powerline Communications Access

- Networks”, Cátedra de Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de Dresden, Alemania, 2004.
- [60] Haidine Abdelfatteh, Hrasnica Halid, Lehnert Ralf, “Multi-Objective Optimization for the Design of the Broadband Powerline Communications (B-PLC) Access Networks”, Cátedra de Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de Dresden, Alemania, 2004.
- [61] <http://www.corinex.com>
- [62] <http://www1.la.dell.com/content/products/compare.aspx/3000>
- [63] <http://www.pixmania.com/es/es/1676/xx/xx/441/9/criteresn.html>
- [64] <http://i.dell.com/images/global/branding/dellecomicon.ico>
- [65] www.areapc.com/cisco_router_801_1x10_1rdsi_10200937_p.html
- [66] García Celda Antonio, “PLC: Una Tecnología Nueva, pero con Futuro?”, Abril 23 de 2004.
- [67] Consortium OPERA, “OPERA Technology Specification-Part1. Versión 1”, 31 de Enero de 2006.
- [68] UPA, “Digital Home Standard. Marketing Requirements Document For Powerline Communications. Versión 1”, Enero 4 de 2006.
- [69] IEEE P1901, “Draft Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications”, Febrero 7 de 2006.