



Facultad de Ingeniería y Computación

**Escuela Profesional de Ingeniería
Electrónica y de Telecomunicaciones**

**"ESTUDIO DEL CANAL PLC (POWER LINE
COMMUNICATIONS) PARA ENVÍO DE DATOS A
BAJO COSTO EN REDES ELÉCTRICAS
DOMICILIARIAS"**

Presentado por:

Víctor Alfredo Apaza Mamani

Para Optar por el Título Profesional de:

**INGENIERO ELECTRÓNICO Y DE
TELECOMUNICACIONES**

Orientador: Dr. Efrain Zenteno Bolaños

Arequipa, Noviembre de 2017

“No podemos resolver problemas pensando de la misma manera que cuando
los creamos.”

Albert Einstein, 1879-1955

Índice general

Abstract	5
Resumen	7
1. Introducción	9
1.1. Motivación y contexto	10
1.2. Planteamiento del problema	11
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo general	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
1.4. Metodología	12
1.5. Consideraciones complementarias	12
1.5.1. Recursos y materiales	12
1.5.2. Cronograma de trabajo	14
1.6. Contribuciones de este trabajo	15
1.7. Organización del presente documento	16
2. Marco teórico	17
2.1. Introducción a las redes de distribución de energía eléctrica	17
2.1.1. Niveles de tensión existentes	18
2.1.2. Código nacional de electricidad	18
2.1.3. Plan nacional de atribución de frecuencias (PNAF)	18
2.2. Estándares y regulaciones	20
2.2.1. Compatibilidad electromagnética (EMC)	21
2.2.2. Estándar Europeo (EN 50065)	22
2.2.3. Estándar EEUU (IEEE P1901)	22
2.2.4. <i>HomePlug Powerline Alliance</i>	23
2.2.5. Otros estándares relacionados a PLC	23
2.3. Comunicación de datos	24
2.3.1. Señales digitales en banda base	24
2.3.2. Modulación de la señal	24
2.4. Caracterización del canal PLC	30
2.4.1. Introducción	30
2.4.2. Modelos de aproximación	31
2.4.3. Acoplamiento	32
2.4.4. Ruido e interferencia	34

3. Estado del arte	35
3.1. Introducción	35
3.2. Avances en PLC	35
3.2.1. La IEEE P1901	35
3.2.2. Aplicaciones PLC	36
3.3. Apreciaciones finales	39
4. Diseño de la solución	41
4.1. Diseño de la sección de acoplamiento	41
4.2. Caracterización del canal	44
4.2.1. Recomendaciones para trabajar con una red de baja tensión (220 VAC)	44
4.2.2. Ruido de fondo e interferencia	45
4.2.3. Identificación de bandas de frecuencias adecuadas para reali- zar la transmisión de datos.	48
4.2.4. Elección de la banda de trabajo para transmitir datos	50
4.3. Diseño del transceptor de comunicaciones	50
4.3.1. Conversión analógico-digital y digital-analógico	50
4.3.2. Muestreo de la señal	51
4.3.3. Modulación y demodulación	52
5. Implementación y resultados	55
5.1. Transceptor	55
5.1.1. Conversión analógica a digital	55
5.1.2. Acoplador a la red eléctrica	57
5.1.3. Modulador FSK binario	59
5.1.4. Demodulador FSK binario	60
5.1.5. Recuperación de la señal analógica	61
5.1.6. Transceptor implementado	62
5.2. Costo del prototipo	64
6. Conclusiones y discusiones	65
6.1. Conclusiones	65
6.2. Discusiones y trabajos futuros	65
Reconocimientos	67
A. Anexo	69
A.1. Programa: Digitalización del audio con el PIC 12F675	69
A.2. Programa: Conversión serie-paralelo con el PIC16F628A	75
A.3. Esquemático del transmisor	80
A.4. Esquemáticos del receptor	81
Bibliografía	83

Índice de figuras

1.1. Comparación de diferentes soluciones en el desarrollo de PLC.	15
2.1. Distribución de energía eléctrica.	17
2.2. Desviación de frecuencia en FSK	26
2.3. Espectro de frecuencias FSK.	26
2.4. Demodulador FSK no coherente.	29
2.5. Demodulador FSK coherente.	29
2.6. Demodulador FSK con PLL.	30
2.7. Diagrama de bloques de dos modems conectados	32
2.8. Modelo simplificado de impedancias para un canal PLC	33
3.1. Características clave en <i>HomePlug AV2</i>	38
4.1. Filtro pasivo RC como acoplador a la red PL.	41
4.2. Función de transferencia teórica del acoplador diseñado.	42
4.3. Función de transferencia del acoplador simulada en <i>Proteus</i>	42
4.4. Función de transferencia medida del acoplador diseñado	43
4.5. Representación del canal para la transmisión de datos de la red eléctrica.	43
4.6. Función de transferencia de los acopladores en cascada	44
4.7. Esquema utilizado para caracterizar la red eléctrica.	45
4.8. Espectro de potencia medido en la red PL	46
4.9. Ruido transitorio por efecto de encendido y apagado de focos	46
4.10. Ruido introducido por un motor universal en la red eléctrica	47
4.11. Ruido introducido por un cargador de computadora portátil.	47
4.12. Espectro de potencia 25 MHz a 65 MHz en condiciones de ruido esporádico.	48
4.13. Espectro de potencia para banda de 9 kHz a 14 MHz	49
4.14. Ruido presente en bandas de 30 MHz a 60 MHz.	50
4.15. Modulación PCM.	51
4.16. Señal serial PIC.	52
4.17. Diagrama de bloques del CD74HC4046A como modulador FSK	53
4.18. Diagrama de bloques del CD74HC4046A como demodulador FSK	53
4.19. Esquemático del modulador FSK utilizando el CD74HC4046A	53
4.20. Esquemático del demodulador FSK utilizando el CD74HC4046A	54
4.21. Pre-acondicionamiento de la señal digital (previa a la modulación FSK)	54
5.1. Diagrama de bloques del transceptor.	55

5.2. Esquemático de la conversión analógico-digital.	56
5.3. Señal de audio digitalizada.	56
5.4. Esquema de conexión para los acopladores.	57
5.5. Esquema para evaluar el parámetro de reflexión.	57
5.6. Función de transferencia y parámetro de reflexión del acoplador im- plementado.	58
5.7. Función de transferencia del canal PLC	59
5.8. Esquemático del modulador FSK.	60
5.9. Esquemático del demodulador FSK.	60
5.10. Espectro de la señal FSK a la entrada del demodulador.	61
5.11. Datos seriales recuperados	61
5.12. Esquemático de la conversión de la señal serie recibida a analógica. .	62
5.13. Transmisor implementado.	62
5.14. Receptor implementado.	63
5.15. Señales de audio transmitida y recibida.	63
A.1. Esquema circuital del transmisor (modulador FSK).	80
A.2. Esquema circuital del receptor (demodulador FSK).	81
A.3. Conversión seria-paralelo y salida de audio recuperado.	82

Índice de cuadros

1.1. Recursos y materiales.	13
1.2. Cronograma de trabajo.	14
2.1. Bandas destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM).	19
2.2. Bandas del PNAF de interés en esta tesis.	19
2.3. Designaciones de banda CCIR	20
2.4. Bandas CENELEC EN 60065	22
2.5. Clasificación de impedancias en serie (Z_s) y paralelo (Z_{II})	33
3.1. Técnicas de transmisión multicanal	36
3.2. Clasificación de tecnologías PLC.	40
4.1. Características y condiciones del canal estudiado.	44
5.1. Costo de implementación del transceptor.	64

Abstract

Due to the increase in the need for communications, several proposals have been developed to cover all these needs. Several researchers and companies have come to the conclusion that the PLCs (Power Line Communications) are the best option not only for its advantages, but also because its infrastructure does not need to be implemented. This work continues the research in PLC as an alternative channel of communication, with low-cost design and implementation. To achieve this, first we tested the PLC channel in home electrical low voltage networks (220 VAC), making use of a previously designed coupling. Optimum frequency bands were found to perform the data transmission. An operating frequency was selected for the design of the transceiver. An audio signal digitizing system was designed, which was modulated using binary FSK. The results show a favorable frequency band for a data transmission (audio), it was reached to transmit with a speed higher than 200 Kbps.

Resumen

Debido al incremento de la necesidad de comunicaciones, se han planteado diversas propuestas para cubrir estas necesidades. Muchos investigadores y empresas han visto en PLC (*Power Line Communications*) una opción con ventajas sobre todo porque su infraestructura no necesita ser implementada. Este trabajo continua la línea de investigar PLC como canal alternativo de comunicación, planteándose un diseño e implementación a bajo costo. Para esto primero se realizaron pruebas sobre el canal PLC en redes eléctricas domiciliarias de baja tensión (220 VAC) diseñando previamente un acoplador. Se encontraron bandas de frecuencia óptimas para realizar la transmisión de datos. Se seleccionó una frecuencia de operación para el diseño del transceptor. Se diseñó un sistema digitalizador de señales de audio, el cual fue modulado usando FSK binario. Los resultados muestran una banda de frecuencia favorable para una transmisión de datos (audio), se alcanzó a transmitir con una velocidad superior a los 200 Kbps.

1. Introducción

"En un mundo tan acelerado como el que vivimos sería difícil no elegir a la tecnología como forma de vida pues está inmersa en la organización de la sociedad tal es así que si la quitáramos nos encontraríamos en un mundo desesperante quizás hasta caótico".

Antiguamente la tecnología buscaba cubrir nuestras necesidades básicas, pero hoy en día se busca un nivel de vida con comodidad, buscamos interactuar con nuestros dispositivos electrónicos, tener un control sobre ellos de manera simple y rápida. Estas nuevas necesidades se ven reflejadas en diferentes dispositivos electrónicos que permiten un determinado control sobre ellos, aparecen nuevos conceptos como Internet de las cosas (IoT) o domótica, sistemas capaces de automatizar e interactuar con las personas en un ambiente como una casa, oficinas, etc. El objetivo es brindar al usuario un nivel de confort, de seguridad, ahorro energético, mejor comunicación e interacción.

Estos nuevos sistemas de comunicación como IoT o domótica encierran muchos aspectos, entre los cuales el medio de comunicación es muy importante. Puede ser una comunicación inalámbrica de baja transferencia de datos como bluetooth, de alta transferencia como *Wi-Fi* que se ven limitados en la distancia y por obstáculos. También tenemos a la red cableada *Ethernet* que necesita ser instalada, implicando un costo adicional, se pierde la estética en los ambientes y tendría que conectarse cerca de cada dispositivo electrónico con el que se desee interactuar. Además consideremos los cambios en la infraestructura desplegada si los dispositivos cambian de lugar.

Alrededor de 1922 se comenzó a trabajar con sistemas de portadoras (15 - 500kHz) en redes de alta tensión [1]. En la actualidad este estudio se denomina *Power Line Communications* (PLC). El incremento continuo de la cantidad de datos a través de las redes de comunicaciones hace necesario buscar alternativas que puedan brindar canales de comunicación para estos escenarios demandantes. En adelante nos referiremos a PLC como la tecnología de un sistema de comunicación y como red PL (*Power Line*) a la infraestructura física (o canal de comunicación) de esta tecnología de comunicación. PLC presenta las siguientes ventajas [2][3]:

- Permite alcanzar elevadas tasas de transmisión de datos (hasta varios cientos de Mbps), se puede transmitir audio y video en tiempo real.
- La instalación de su infraestructura es de mínimo costo pues se hace uso de la red eléctrica instalada.

- Es accesible a casi cualquier lugar donde se quiera llegar pues existen tomas de energía en casi todas las partes de una casa u oficina.
- Es una red cableada flexible, donde el cambio de posición de los dispositivos puede generar costos mínimos.
- La atenuación de la señal no es afectada por las paredes entre dos puntos de comunicación.

Entre las principales desventajas del uso de PLC en la actualidad están el ruido electromagnético que es muy variado y dependiente de particularidades de la red eléctrica en cada ciudad. Otra desventaja es el precio que tienen los equipos. Si habláramos de interconectar varios dispositivos por medio de esta tecnología a una red, el costo se elevaría mucho más.

En este trabajo se estudió el comportamiento del canal de una red PL en baja tensión domiciliaria (220VAC) de la ciudad de Arequipa, por medio de la cual se diseñó y probó un transceptor de bajo costo que permita el envío de datos en tiempo real (específicamente audio). Se hará uso de tecnologías como microcontroladores PIC (*Peripheral Interface Controller*) y diversos circuitos integrados de bajo costo disponibles en el mercado. Esta tesis se puede incorporar a un estudio más amplio que involucre acopladores, técnicas de modulación o acceso al medio, entre otras que permitan aprovechar al máximo el potencial de las comunicaciones en una red PL.

1.1. Motivación y contexto

Existe un incremento de la necesidad de comunicación "todo conectado, todo el tiempo y accesible desde cualquier parte". PLC es una tecnología que puede cubrir esta necesidad. La ventaja de las redes PL son los mínimos costos en instalación ya que están cerca o llegan casi a cualquier dispositivo electrónico con el que se desea comunicar: focos, televisores, radios, puertas, ventanas, etc. En la actualidad se comercializan dispositivos que permiten la comunicación en varios cientos de Mbps, pero sus costos son relativamente elevados. Por ejemplo, si quisiéramos interconectar varios focos de nuestra casa, tendríamos que comprar igual cantidad de dispositivos PLC, incrementando los costos.

Algunas empresas como Devolo tiene a la venta su "*dLAN Audio Extender*" capaz de transmitir audio streaming a 85 Mbps, también otras empresas como Tp-link han lanzado productos *HomePlug* que transmiten cientos de Mbps, sin embargo, a costos elevados. Por este motivo el presente trabajo está dedicado a estudiar la red PL como alternativa de comunicación de bajo costo. Se transmitió audio en tiempo real sobre una red PL la cual se estudió previamente. Esta transmisión de datos, en el orden de algunos cientos de kbps, puede llegar a cubrir fácilmente necesidades de comunicación en varias aplicaciones y puede servir de base para futuros trabajos en PLC.

La caracterización del canal y las pruebas de transmisión de datos se realizaron en un ambiente que simula una red domiciliar de 220 VAC, con dispositivos conectados como: computadoras, focos, artefactos eléctricos, etc.

1.2. Planteamiento del problema

Hacer uso de las redes de energía eléctrica para la transmisión de información trae consigo problemas como el ruido de fondo, ruido impulsivo, interferencia electromagnética, variabilidad en el tiempo, entre otras. Las líneas de energía no están blindadas para evitar interferencias y no han sido diseñadas para enviar señales de información, transmitiendo en ellas señales de energía eléctrica (de 50 ó 60 Hz).

En las actividades de investigación de los últimos años se ha tenido a la red PL como uno de los principales temas y ha obtenido avances en cuanto a su modelamiento y caracterización del canal de propagación. A la red PL se le relaciona con las redes inalámbricas mencionando que ambos comparten características importantes para el diseño y performance de su sistema como medio de comunicación [4]. El canal de propagación es el principal contribuidor de problemas y limitaciones (mencionadas en el párrafo anterior) que aquejan a PLC. Este canal presenta múltiples variaciones, varía de acuerdo a las distancias, al horario, al tipo de topología, a los niveles de voltaje y al nivel de carga que experimenta la red eléctrica, varía de país en país e incluso de ciudad en ciudad [4]. Por lo tanto, se identificó como problema: "el desconocimiento de características del comportamiento del canal PL en nuestra localidad", que permita estudiar efectos de la red eléctrica y posibilite el desarrollo de sistemas de bajo costo de comunicación sobre esta red.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar, implementar y validar un transceptor de bajo costo que utiliza la red eléctrica PL como canal de comunicación.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Diseñar, implementar y validar un acoplador que permita incorporar datos a la red eléctrica, utilizando componentes disponibles en el mercado local y de bajo costo.
2. Caracterizar el ruido e interferencia en una red PL de baja tensión domiciliar (220 VAC) encontrando bandas con bajos niveles de interferencia y con características adecuadas para la transmisión de datos.

3. Diseñar, implementar y validar un transceptor de bajo costo para la transmisión y recepción de audio en una de las bandas de frecuencia seleccionadas del estudio de la red PL.

1.4. Metodología

Se utilizará una metodología basada en recopilación de información y pruebas experimentales:

1. En una primera etapa, se implementará acopladores a la red eléctrica. Esto permitirá enviar y recibir señales a través de la red PL sin dañar los circuitos del transceptor.
2. La segunda etapa de la metodología es la caracterización de la red PL. Esto permite entender su comportamiento en el dominio de la frecuencia frente a interferencias externas y ruido.
3. La tercera etapa es el diseño y validación del transceptor de bajo costo que haga uso de las bandas de frecuencias obtenidas de los análisis de la red eléctrica, las cuales son propuestas como las más óptimas para la transmisión de audio a través de este canal.

1.5. Consideraciones complementarias

1.5.1. Recursos y materiales

El cuadro 1.1 lista los componentes, dispositivos e instrumentos utilizados en el desarrollo de la caracterización del canal PLC y la implementación del transceptor de audio.

Cuadro 1.1.: Recursos y materiales.

Tipo	Material/recurso	Uso/ descripción	UCSP	costo (s/.)
Hardware	Computadora / Laptop	Edición de resultados, almacenamiento de información, uso de software.	si	-
	Circuitos integrados: PIC, PLL, comparadores, DAC, op amps.	Permitirá la digitalización del audio, y la recuperación del mismo para obtener la señal analógica.	si	50
	VNA	Análisis de la red eléctrica asociadas a la reflexión y transmisión.	si	-
	Osciloscopio	Visualizar resultados de señales a la entrada y/o salida.	si	-
	Analizador de red RF	Medir parámetros de reflexión y transmisión.	si	-
	Llaves termomagnéticas	Como soporte para la seguridad ante posibles cortos circuitos.	no	16
	Fuente de audio	La fuente de la señal que será digitalizada para ser enviada a través de la red PL	no	24
	Filtros	Seleccionar la información que viene junto con la señal de la red eléctrica.	no	20
	Multímetro	Comprobar conexiones, voltajes, continuidad, etc.	no	40
	Otros equipos eléctricos	Guantes aislantes, conectores eléctricos, cutter, pistolas de soldar, etc.	no	-
Fuentes de Información	Libros, bases de datos de revistas indexadas, i.e. IEEE, Scopus, etc.	El material usado se encuentra en la biblioteca u obtenida de la base de datos IEEE Xplore.	si/no	-
Total				150

1.5.2. Cronograma de trabajo

En el cuadro 1.2 se muestra el cronograma de las actividades que se siguieron para terminar el presente trabajo. Como se puede observar, varias de las actividades fueron trabajadas en paralelo

Cuadro 1.2.: Cronograma de trabajo.

MES	2015		Sem. 2016-I							Sem. 2016-II					2017	
	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02
Recopilación de la información	X	X	X													
Construcción del planteamiento del problema		X	X	X												
Objetivos y justificación		X	X	X	X											
Metodología			X	X	X	X	X									
Marco teórico					X	X	X	X								
Propuesta de diseño						X	X	X								
Caracterización del canal PLC							X	X	X	X	X					
Análisis e interpretación de resultados									X	X	X	X				
Diseño del transceptor									X	X	X	X	X			
Implementación y pruebas											X	X	X	X	X	
Rediseño y pruebas												X	X	X	X	
Análisis e interpretación de resultados									X	X	X	X	X	X	X	X

1.6. Contribuciones de este trabajo

Parte de este trabajo se encuentra publicado en las actas de conferencia 2017 IEEE XXIV *International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing* (INTERCON 2017), que se encuentra indizada en IEEE xplora and Scopus. Dicha conferencia fue llevada a cabo en la ciudad del Cusco-Perú (Agosto-2017)[5].

Para *Narrowband* PLC se ha encontrado propuestas de comunicación con un costo de implementación de \$2 dólares [6] donde transmiten 5 bps utilizando modulaciones como ASK (*Amplitude-shift keying*) o FSK (*Frequency-shift keying*). Para mayores velocidades utilizan OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), para ésta última implementación de moduladores OFDM (a conocimiento del autor) no se reportan costos en la literatura.

Lo que hoy en día (Noviembre-2017) tiene mayor desarrollo es el uso de *Broadband* con modulaciones como OFDM, se alcanzan velocidades de cientos de Mbps, pero el costo también es mucho mayor. Algunas empresas como Tp-link comercializan su línea *power line* con precios por encima de los \$55 dólares [7]. Podemos encontrar en china productos similares desde los \$37 dólares [8] que tienen velocidades en capa física desde 200 Mbps y en MIMO (*Multiple-input Multiple-output*) PLC por encima de los \$100 dólares [9] con velocidades en capa física de 500 Mbps. Un resumen de diversas tecnologías PLC, donde se muestra la relación de velocidad de transmisión, costo, tipo de modulación y banda de frecuencia utilizada se presenta en la figura 1.1.

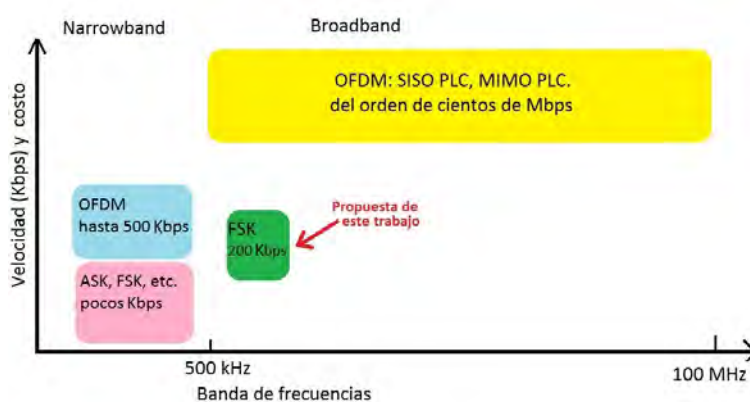


Figura 1.1.: Comparación de diferentes soluciones en el desarrollo de PLC.

Como se puede observar en la figura 1.1, se aprecia los compromisos al desarrollar transceptores para el canal PLC. Por un lado, a mayor velocidad de transmisión se requiere de hardware de mayores prestaciones y algoritmos con mayor costo computacional. En consecuencia eleva el costo de los transceptores. Además, elevar la velocidad de transmisión requiere mayor ancho de banda de transmisión.

Finalmente, podemos observar que este trabajo propone el desarrollo de un prototipo que utiliza la banda *Broadband* con una modulación "simple" utilizando un ancho de banda "reducido" a costo de sacrificar velocidad de transmisión pero reduciendo dramáticamente los costos del prototipo final.

1.7. Organización del presente documento

Este trabajo comienza con una introducción, motivación, contexto, objetivos y metodología a seguir. En el primer capítulo se presenta la introducción, contexto y motivación del presente trabajo. Además, este capítulo indica los objetivos y la metodología. En el segundo capítulo se presenta el marco teórico con todos los conceptos básicos sobre distribución energética, estándares, regulaciones, digitalización de datos y modulación FSK. Estos conceptos nos ayudarán en la caracterización del canal PLC y el diseño de nuestro transceptor. En el tercer capítulo se presenta el estado del arte, que detalla trabajos de investigación realizados en este campo, presentando sus avances, ventajas y resultados. En el cuarto capítulo, se caracteriza (presenta mediciones) el canal PLC identificando el ruido e interferencia que le afecta y explicando los principios de diseño del transceptor. En el quinto capítulo se implementa el transceptor para que envíe datos a través de nuestro canal PL y se evalúan e interpretan los resultados obtenidos. Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones del estudio y discusiones para ser consideradas en trabajos a futuro.

2. Marco teórico

2.1. Introducción a las redes de distribución de energía eléctrica

La red del suministro eléctrico que tiene como función el suministro de energía desde su generación hasta la distribución a los usuarios finales.

Las etapas que comprende son [10]:

1. Sistema de generación: comprende la central eléctrica de generación y la subestación elevadora, trabaja con líneas de muy alta tensión (MAT).
2. Sistema de transmisión: comprende una subestación de transmisión y una subestación de subtransmisión, maneja líneas de MAT, líneas de Alta tensión (AT) y termina con líneas de media tensión (MT).
3. Sistema de distribución:
 - a) Subsistema de distribución primaria, maneja líneas de media tensión (MT).
 - b) Subsistema de distribución secundaria, maneja líneas de baja tensión (BT).

La figura 2.1 muestra la distribución de la energía eléctrica en el Perú

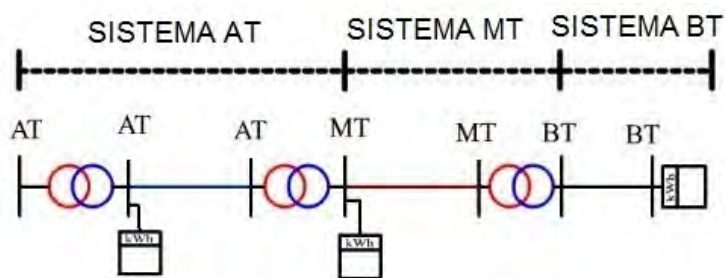


Figura 2.1.: Distribución de energía eléctrica.

2.1.1. Niveles de tensión existentes

El código nacional de electricidad especifica una denominación a los diferentes niveles de voltaje de corriente alterna [10].

- Baja Tensión: 380 / 220 V 440 / 220 V
- Media Tensión: 20,0 kV 22,9 kV 22,9 / 13,2 kV 33 kV 33 / 19 kV
- Alta Tensión: 60 kV 138 kV 220 kV
- Muy Alta Tensión: 500 kV

2.1.2. Código nacional de electricidad

El código nacional establece que todos los conductores deben ser de cobre y no pueden tener una sección menor que $2,5 \text{ mm}^2$ para los circuitos derivados de fuerza y alumbrado y $1,5 \text{ mm}^2$ para los circuitos de control de alumbrado; con excepción de cordones flexibles, alambres para equipos; y alambres o cables para circuitos de control [10].

2.1.3. Plan nacional de atribución de frecuencias (PNAF)

El espectro radioeléctrico es un recurso y patrimonio nacional, las frecuencias se fijan convencionalmente desde 9 kHz hasta 300 GHz. El Estado, a través del Ministerio de Transportes y Comunicaciones y del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF) administra y controla la atribución de frecuencias para los diferentes servicios de telecomunicaciones, de tal forma que se asegure su operatividad, minimice la probabilidad de interferencias perjudiciales y permita la coexistencia de servicios dentro de una misma banda de frecuencias, si fuera el caso [11].

Este plan indica que las siguientes bandas están destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM), ver cuadro 2.1 [11]:

Los servicios de radiocomunicaciones que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones y en ningún caso podrán causar interferencias a aplicaciones ICM [11].

En esta tesis no utilizaremos frecuencias ICM, pero las señales que viajen a través de la red eléctrica pueden presentar cierto nivel de interferencia si se llegasen a utilizar elevadas potencias. Mencionaremos algunos rangos de bandas del PNAF que son de interés en este trabajo, ver cuadro 2.2 [11]:

Cuadro 2.1.: Bandas destinadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM).

Banda de frecuencias (kHz)	Frecuencia central
13 553 – 13 567 kHz	13 560 kHz
26 957 – 27 283 kHz	27 120 kHz
40,66 – 40,70 MHz	40,68 MHz
902 – 928 MHz	915 MHz
2 400 – 2 500 MHz	2 450 MHz
5 725 – 5 875 MHz	5 800 MHz
24 - 24,25 GHz	24,125 GHz

Cuadro 2.2.: Bandas del PNAF de interés en esta tesis.

Banda de frecuencias (kHz)	Uso
7 100 - 7 300	Radioaficionados radioaficionados por satélite
7 300 -7400	Radiodifusión
7 400 - 8 100	Fijo móvil salvo móvil aeronáutico
8 100 - 8 195	Fijo móvil marítimo
8 195 - 8 815	Móvil marítimo
8 195 - 8 815	Móvil marítimo
8 815 - 9 040	Móvil aeronáutico
9 040 - 9 400	Fijo
9 400 - 9500	Radiodifusión
9 500 - 9 775	Radiodifusión onda corta internacional
9 775 - 9 995	Fijo
9 995 - 10 003	Frecuencias patrón y señales horarias (10 000 khz)
10 003 - 10 005	Frecuencias patrón y señales horarias investigación espacial
10 005 - 10 100	Móvil aeronáutico (r)
10 100 - 10 150	Fijo aficionados

Las designaciones de banda según el Comité Consultivo Internacional de Radio (CCIR) se muestran en el cuadro 2.3 [12].

Cuadro 2.3.: Designaciones de banda CCIR [12].

Numero de banda	Intervalo de frecuencias	Designación
2	30 Hz –300 Hz	ELF (frecuencias extremadamente bajas)
3	0.3 kHz –3 kHz	VF (frecuencias de voz)
4	3 kHz –30 kHz	VLF (frecuencias muy bajas)
5	30 kHz –300 kHz	LF (bajas frecuencias)
6	0.3 MHz –3 MHz	MF (frecuencias intermedias)
7	3 MHz –30 MHz	HF (frecuencias altas)
8	30 MHz –300 MHz	VHF (frecuencias muy altas)
9	300 MHz –3 GHz	UHF (frecuencias ultra altas)
10	3 GHz –30 GHz	SHF (frecuencias súper altas)
11	30 GHz –300 GHz	EHF (frecuencias extremadamente altas)
12	0.3 THz –3 THz	Luz infrarroja
13	3 THz –30 THz	Luz infrarroja
14	30 THz –300 THz	Luz infrarroja
15	0.3 PHz –3 PHz	Luz visible
16	3 PHz –30 PHz	Luz ultravioleta
17	30 PHz –300 PHz	Rayos X
18	0.3 EHz –3 EHz	Rayos gamma
19	3 EHz –30 EHz	Rayos cósmicos

2.2. Estándares y regulaciones

En esta sección se destacan las normas y reglamentos relativos a las comunicaciones por la red eléctrica. Existe una falta de estandarización centralizada que ha sido uno de los principales factores para el lanzamiento tardío de PLC como medio de comunicación. PLC tiene que operar en una red con simetría limitada, surge la necesidad de regulación para garantizar la compatibilidad electromagnética (EMC). Aquí se examina el estado actual de los procesos internacionales de normalización y de regulación en curso en diferentes países [13].

2.2.1. Compatibilidad electromagnética (EMC)

Se debe señalar que los cables que transportan energía eléctrica han sido diseñados para transportar energía a baja frecuencia, 50 Hz ó 60 Hz, su uso para PLC significa que se tendrá que transportar señales entre 9 kHz y 87 MHz, esto implica que una parte de potencia de la señal será emitida en forma de radiación electromagnética, considerándose a los cables como antenas lineales con baja eficiencia [13].

Los servicios inalámbricos pueden producir interferencias y el grado en que afectan a la red depende de la potencia y distancia que estas señales externas tengan. Una red que posee simetría (donde la impedancia entre cada conductor y tierra es igual) es electromagnéticamente compatible y funcionará en un ambiente electromagnético de forma satisfactoria y con mínimas interferencias [13].

Las redes en interiores no presentan simetría y el costo de volverlas simétricas haciendo uso de filtros es elevado, por lo que es necesario estudiar cómo se comporta el canal PLC ante estas interferencias. La reducción de la densidad espectral de potencia (PSD), que es la distribución de la energía de una señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada, conduce a disminuir los niveles de radiación electromagnética a pesar de que la potencia de transmisión se mantiene constante, por lo tanto es ventajoso usar esquemas de modulación de banda ancha. En este trabajo usaremos la modulación FSK de banda ancha (índice de modulación $> \pi/2$) [13].

Algunos organismos encargados de regularizar el uso del espectro de radiofrecuencia para PLC:

Europa

En Europa el Comité Internacional especial de perturbaciones radioeléctricas (CISPR) es el que establece las normas para el control de la interferencia electromagnética en los dispositivos eléctricos y electrónicos. Las publicaciones CISPR están destinadas a convertirse en leyes estrictas europeas. Después de pasar por un proceso de votación en el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica), que es un organismo europeo de normalización, en una de sus normas indica que si un oyente de servicio de radio se queja, el modem perturbador debe apagarse. Para sistemas de baja velocidad de 3 kHz a 148.5 kHz se ha dividido en cuatro bandas A, B, C y D y las velocidades máximas alcanzables están en el rango de 100 Kbps [13].

Estados Unidos

El uso de la red PL está regulado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC). Se distingue entre las aplicaciones de baja velocidad para la señalización y transmisión de datos de alta velocidad. Los sistemas de baja velocidad están permitidos operar en frecuencias menores a 490 kHz [13].

Japón

Se permite el uso de sistemas PLC en el rango de frecuencia de 10 kHz - 450 kHz por el Derecho nacional de radio. Es utilizado para señalización o conmutación sencilla en tareas de supervisión [13].

2.2.2. Estándar Europeo (EN 50065)

El estándar CENELEC EN 50065 permite un rango de comunicaciones de 3 kHz a 148.5 kHz, y se subdivide en 5 sub-bandas, de las cuales cuatro sub-bandas se denominan A,B,C y D. El uso de estas bandas se describe en el cuadro 2.4 [13].

Cuadro 2.4.: Bandas CENELEC EN 60065 [13].

Banda	Rango de frecuencia	Uso
	3 kHz – 9 kHz	Restringido a los proveedores de energía.
A	9 kHz – 95 kHz	Restringido a los proveedores de energía y sus concesionarios
B	95 kHz – 125 kHz	Destinado a los clientes de los proveedores de energía.
C	125 kHz – 140 kHz	Destinado a los clientes de los proveedores de energía, para poder hacer la operación simultánea de varios sistemas con una frecuencia central de 132.5 kHz
D	140 kHz – 148.5 kHz	Destinado a los clientes de los proveedores de energía, el protocolo de acceso no está definido

2.2.3. Estándar EEUU (IEEE P1901)

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) formó el grupo para elaborar la norma IEEE Std P1901-2010. Más de 90 organizaciones contribuyeron a la norma. La mitad de las organizaciones eran de Estados Unidos, una cuarta parte de Japón y el restante de Europa [13].

El IEEE Std 1901-2010 es un estándar para alta velocidad (hasta 500 Mbps en la capa física) en dispositivos a través de líneas de energía eléctrica, llamada banda ancha o *Broadband Power Line* (BPL). La norma utiliza frecuencias de transmisión

menores a 100 MHz, con distancias menores a 1500 m. El grupo de trabajo mantiene y amplía normas, es patrocinado por el Comité IEEE *Power Line Communication Standard* (PLCSC) [13].

2.2.4. *HomePlug Powerline Alliance*

Fundada en 2000 por 13 líderes de la industria (3Com, AMD, Cisco Systems, Compaq, Conexant, Enikia, Intel, Intellon, Motorola, Panasonic, Radio Shack, SONICblue y Texas Instruments) permite y promueve la rápida adopción de dispositivos que cumplen con los estándares. La primera línea de productos *HomePlug 1.0* utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con 128 portadoras entre 4.5 MHz a 21 MHz, conjuntamente con concatenado Viterbi y codificación Reed Solomon. Incluye la reducción de la densidad espectral de potencia, con una velocidad en capa física alrededor de 14 Mbps [13].

HomePlug Powerline Alliance es una corporación sin fines de lucro, proporciona un foro para la creación de especificaciones abiertas para los productos y servicios PLC de alta velocidad.

2.2.5. Otros estándares relacionados a PLC

Mencionaremos algunos otros estándares [13]:

- La norma IEC 870 internacional sobre telecontrol, teleprotección y asociado de telecomunicaciones para sistemas PLC.
- La norma CENELEC ENG1107 especifica equipos para la medición de la energía eléctrica y control de carga.
- La Asociación de Electrónica de Consumo (CEA) R7 *Home Network Committee*, coexistencia de redes domésticas.
- La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha estandarizado las comunicaciones por la red de distribución.
- El PLC forum [40] es una asociación internacional que representa los intereses de los fabricantes y empresas afines.
- ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones) encargada de producir normas que serán utilizadas en toda Europa y más allá.

2.3. Comunicación de datos

2.3.1. Señales digitales en banda base

Se considera una señal en banda base cuando sus frecuencias son cercanas a cero. Esta señal de banda base se refiere a la banda de frecuencias producidas en baja frecuencia como las del audio. Esta señal necesitará ser digitalizada y enviada en una o más portadoras (banda ancha). En este trabajo se usará la modulación por desplazamiento de frecuencia - *Frequency Shift Keying* (FSK) [14].

Código de línea

La codificación permite la regeneración de una señal. Los binarios "1" y "0" se representan en dos principales categorías [14]:

En el presente trabajo se utilizará el código de línea unipolar NRZ. Este código tiene la principal ventaja de que solo requiere una fuente de alimentación, es sencilla de implementar con los microcontroladores PIC y también porque los integrados tienen entradas y salidas digitales de 0-1 (a excepción del convertidor analógico - digital ADC y el convertidor digital-analógico DAC) [14].

2.3.2. Modulación de la señal

No es práctico propagar señales de información en banda base a través de los canales de comunicación como el cableado, la atmosfera, etc. Es necesario modular la información de nuestra fuente con una señal analógica de mayor frecuencia, llamada portadora. La modulación no es más que el proceso de cambiar una o más propiedades de la portadora en proporción con la señal de la información [12].

Hay dos razones por las que la modulación es necesaria en las comunicaciones electrónicas [12]:

1. Es extremadamente difícil irradiar señales de baja frecuencia en forma de energía electromagnética, con una antena o en un medio tan hostil como la red PL.
2. Señales de la información pueden ocupar la misma banda de frecuencias y si se transmiten al mismo tiempo las señales de dos o más fuentes, interferirán entre sí.

Los dos tipos básicos de comunicaciones electrónicas son: analógico y digital. El presente trabajo utilizó el digital pues presenta ventajas como:

- Altos niveles de inmunidad frente al ruido.
- Se le puede codificar y encriptar.
- Modulación-demodulación con DSPs (*Digital Signal Processors*).

Una señal de información digital puede ser modulada de diferentes maneras, si la amplitud de la portadora se varía proporcionalmente a la señal de información, se produce una modulación por conmutación de amplitud (ASK, de *Amplitude Shift Keying*). Si la frecuencia de la portadora varía en forma proporcional a la señal de información se produce la modulación por conmutación de frecuencia (FSK, de *Frequency Shift Keying*), y si la fase varía de manera proporcional a la señal de información, se produce la modulación por conmutación de fase (PSK, de *Phase Shift Keying*). Si varían al mismo tiempo la amplitud y la fase en proporción con la señal de información, resulta la modulación de amplitud en cuadratura (QAM, de *Quadrature Amplitude Modulation*) [12].

Modulación por desplazamiento de frecuencia.

Esta tesis utilizó la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK, de *Frequency-Shift Keying*). La FSK binaria es una forma de modulación de ángulo, de amplitud constante, parecida a la modulación de frecuencia (FM). La señal moduladora es una señal binaria que varía entre dos valores discretos de voltaje (no es una forma de onda analógica que cambie continuamente). La ecuación 2.1 muestra de modo general la FSK binaria. [12]

$$V_{fsk}(t) = V_c * \cos 2\pi[f_c + V_m(t)\Delta f]t \quad (2.1)$$

Dónde:

- $V_{fsk}(t)$ = forma de onda binaria FSK.
- V_c = amplitud de la portadora (Volts).
- f_c = frecuencia central de la portadora (Hertz).
- Δf = desviación máxima de frecuencia (Hertz).
- $V_m(t)$ = señal moduladora de entrada binaria (+-1).

La figura 2.2 muestra la desviación en frecuencia de la modulación FSK, y la figura 2.3 e espectro de frecuencias FSK.

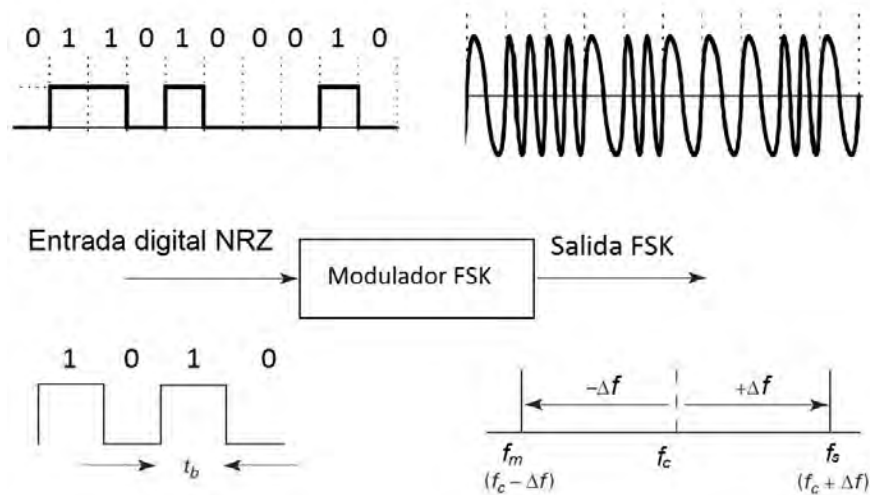


Figura 2.2.: Desviación de frecuencia en FSK.

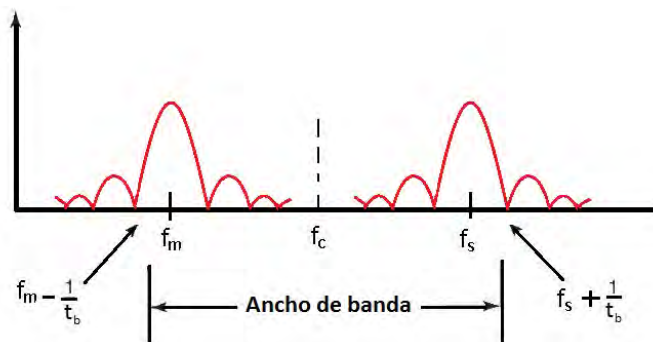


Figura 2.3.: Espectro de frecuencias FSK.

De la figura 2.3 la señal binaria de entrada desplaza a la frecuencia de la portadora. Cuando la señal binaria de entrada cambia de un 0 lógico a un 1 lógico y viceversa, la frecuencia de salida se desplaza entre dos frecuencias [12].

- f_m : Una frecuencia de marca, frecuencia de trabajo o frecuencia de 1 lógico.
- f_s : Una frecuencia de espacio o de 0 lógico.

Las frecuencias de marca y de espacio están separadas de la frecuencia de portadora por la desviación máxima de frecuencia, es decir, por $f_c \pm \Delta f$, donde $f_m = f_c + \Delta f$ y $f_s = f_c - \Delta f$. Sin embargo, es importante observar que las frecuencias de marca y de espacio se asignan en forma arbitraria, dependiendo del diseño del sistema [12].

Rapidez de bits FSK y baudios

En FSK binaria hay un cambio de frecuencia de la portadora cada vez que cambia la condición lógica (0 o 1) de la señal binaria de entrada.

La rapidez de cambio de salida es igual a la rapidez de cambio en la entrada. En modulación digital, la rapidez de cambio en la entrada del modulador se llama frecuencia de bits, o rapidez de transferencia de bits, y se representa por f_b . Tiene las unidades de bits por segundo (bps) [12].

La rapidez de cambio de la salida del modulador se llama baudio, en honor de J. M. E. Baudot. Con frecuencia, el baudio se malentiende y se confunde con la rapidez de bits. El baudio es una rapidez de cambio, y es igual a la recíproca del tiempo de un elemento de señalización en la salida. Con la manipulación por desplazamiento de frecuencias (FSK), el tiempo de un elemento de señalización en la salida es igual al tiempo de un solo bit, t_b . Con la FSK binaria, el tiempo de un elemento de señalización y el tiempo de un bit son iguales, entonces la rapidez de cambio de entrada y salida son iguales, y la rapidez de bits y los baudios también son iguales [12].

Transmisor FSK

El transmisor FSK se parece mucho a un modulador convencional de FM, y con mucha frecuencia es un oscilador controlado por voltaje (VCO, voltage-controlled oscillator). La frecuencia central (o de reposo) de la portadora se escoge de tal modo que esté a la mitad entre las frecuencias de marca y de espacio. Un uno lógico corre a la salida del VCO hasta la frecuencia de marca, y un cero lógico desplaza la salida del VCO a la frecuencia de espacio. En un modulador FSK binario, Δf es la desviación máxima de frecuencia de la portadora, y es igual a la mitad de la diferencia entre las frecuencias de marca y de espacio. Un modulador VCO-FSK puede funcionar en el modo de barrido, en el que la desviación máxima de frecuencia no es más que el producto del voltaje binario de entrada por la sensibilidad del VCO a la desviación [12].

Si los valores de 0 y 1 lógicos corresponden a valores de voltaje, entonces voltajes que varían entre estos dos valores alto y bajo generarán oscilaciones de la portadora dentro del rango de frecuencias $f_c \pm \Delta f$ [12].

Consideraciones de FSK respecto del ancho de banda

La desviación máxima de frecuencia se determina con:

$$\Delta f = \frac{|f_m - f_s|}{2} \quad (2.2)$$

Dónde:

- Δf = desviación máxima de frecuencia.

El ancho mínimo de banda aproximado es:

$$B = 2(\Delta f + f_b) \quad (2.3)$$

Dónde:

- B = ancho mínimo de banda (Hertz)

La máxima rapidez de cambio de una señal binaria sin retorno a cero (NRZ) se presenta cuando están alternando unos y ceros. Como se necesita una alta y una baja (niveles de voltaje) para producir un ciclo, la máxima frecuencia fundamental contenida en una onda cuadrada es igual a la rapidez de repetición de esa onda cuadrada con la cual una señal binaria es igual a la mitad de la rapidez de bits. Es decir, $f_a = f_b/2$ [12].

Dónde:

- f_a = máxima frecuencia fundamental de la señal moduladora binaria (Hertz).

Conociendo que el índice de modulación en FM es $h = \frac{\Delta f}{f_a}$, podemos obtener la siguiente ecuación:

$$h = \frac{|f_m - f_s|}{f_b} \quad (2.4)$$

Demodulación FSK

La demodulación FSK es un circuito como el de la figura 2.4 donde la señal de entrada FSK se aplica en forma simultánea a las entradas de dos filtros pasabanda (BPF) a través de un divisor de potencia. El filtro respectivo sólo pasa la frecuencia de marca o sólo la de espacio a su respectivo detector de envolvente. A su vez, los detectores de envolvente indican la potencia total en cada banda pasante, y el comparador responde a la mayor de las dos potencias. Este es un tipo de detección FSK llamada no coherente porque no hay frecuencia implicada en el proceso de demodulación, que esté sincronizada en fase, frecuencia o en ambas, con la señal FSK que entra [12].

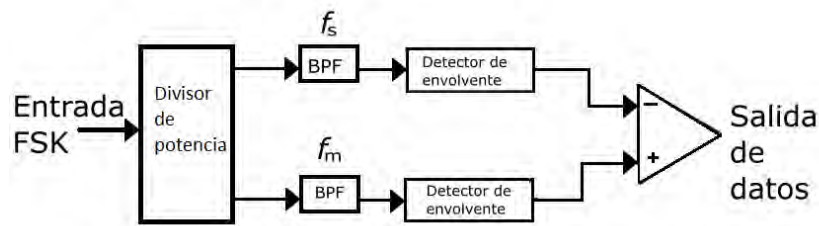


Figura 2.4.: Demodulador FSK no coherente.

La figura 2.5 muestra el diagrama de bloques de un receptor FSK coherente. La señal FSK de entrada se multiplica por una señal de portadora recuperada que tenga exactamente la misma frecuencia y fase que la referencia del transmisor. Sin embargo, las frecuencias de marca y espacio, en general no son continuas. Por lo que no es práctico reproducir una referencia local que sea coherente con ambas. Es por esto que la detección FSK coherente no se usa con frecuencia [12].

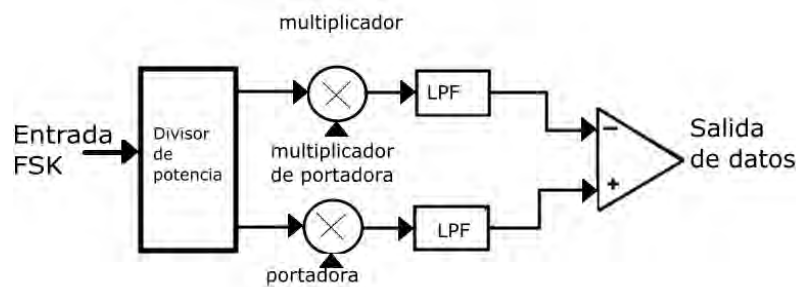


Figura 2.5.: Demodulador FSK coherente.

El circuito más común para demodular señales FSK binarias es el lazo amarrado a fase (PLL, *phase-locked loop*), su diagrama de bloques en la figura 2.6. Cuando la entrada al PLL se desplaza entre las frecuencias de marca y de espacio, el voltaje de error de cd en la salida del comparador de fases sigue el desplazamiento de frecuencias. La frecuencia natural del PLL se iguala a la frecuencia central del modulador FSK. En consecuencia, los cambios en el voltaje de cd de error siguen a los cambios de la frecuencia analógica de entrada, y son simétricos respecto a 0 V. La FSK binaria tiene menor eficiencia en errores que la PSK o la QAM, y por eso casi nunca se usa en sistemas digitales de radio de alto rendimiento. Su uso se limita a módems de datos asíncronos, de bajo rendimiento y bajo costo, que se usan en comunicaciones de datos en líneas telefónicas analógicas de banda de voz [12].

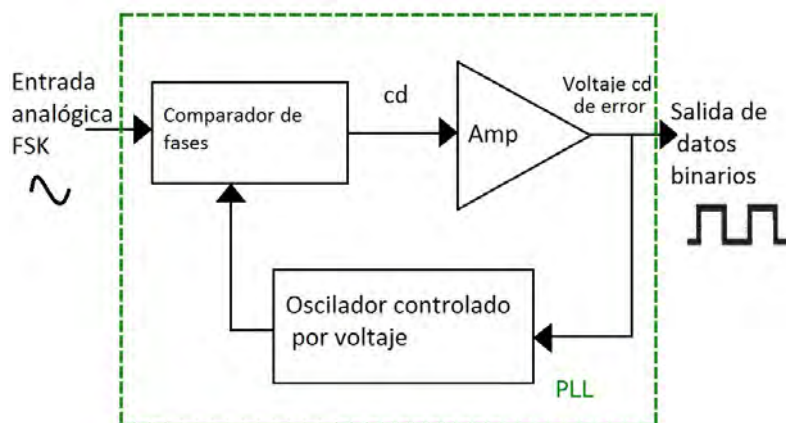


Figura 2.6.: Demodulador FSK con PLL.

2.4. Caracterización del canal PLC

2.4.1. Introducción

Las redes de líneas de energía fueron diseñadas originalmente para la distribución de energía a una frecuencia de 50 Hz o 60 Hz y no se diseñó para la comunicación de datos mucho menos para transmitir información a altas velocidades (lo que se conoce en la actualidad como banda ancha). Entre los principales retos de la red de energía se tienen [2]:

- La misma estructura de la red eléctrica, cableados de diferentes densidades y calidades de cobre, aluminio, etc.
- Las malas prácticas de cableado: cableados delgados, aglomeración de empalmes, etc.
- La conexión a tierra en el interior, la mayoría de domicilios no cuenta con un sistema a tierra.
- Además el canal es un medio áspero y ruidoso, difícil de modelar [15][16]:
 - Es selectivo en frecuencia.
 - Afectado por el ruido de fondo de color.
 - Afectado por ruido impulsivo periódico y no periódico.
 - Es variable en el tiempo periódicamente (doble de la frecuencia de red).
 - La función de transferencia del canal puede variar abruptamente con los cambios en la topología de la red.

- Las líneas que a menudo no poseen blindaje y se convierten en fuente y víctima de la interferencia electromagnética (EMI).

Debido a que la red eléctrica no está aislada (a la salida del transformador) se comparten entre varios usuarios. Las señales que se generan por un usuario pueden interferir con las de otro usuario, por lo que a más usuarios en la red cercana PLC se genera más interferencias. A medida que aumenta la interferencia los usuarios experimentarán una disminución de la tasa de datos ya que se producen más colisiones de paquetes, fenómeno que ocurre también en el cable coaxial y en las redes inalámbricas. Sin embargo estas dos redes cuentan con anchos de banda mucho más grandes y pueden mitigar las interferencias usando canales de comunicación separados en frecuencia (Multiplexación por división de frecuencia - FDM), mientras que PLC cuenta con una banda de frecuencia de 2 MHz a 30 MHz [15].

Por este motivo se analizará el comportamiento que tiene la red eléctrica como canal de comunicación, realizando pruebas en diferentes bandas de frecuencia para conocer las interferencias a las que esta red PL está comúnmente expuesta.

2.4.2. Modelos de aproximación

Los canales inalámbricos y PLC comparten una serie de características importantes para el diseño y funcionamiento de los sistemas de comunicación.

Todos los modelos de canales disponibles en la actualidad se clasifican en tres enfoques principales [4][17]:

- Modelos deterministas: Requieren un conocimiento detallado de la topología de la red, modelos de cable, etc.
- Modelos empíricos (analíticos, estadísticos): No requieren un conocimiento detallado de la topología de la red, pero si requieren una extensa campaña de medición.
- Modelos híbridos.

Debido a la dificultad de modelar la función de transferencia de la línea eléctrica, los primeros intentos de modelado se basaron en análisis estadísticos (campañas de medición) que se realizaron a una población determinada, obteniéndose mediciones sobre el comportamiento del canal PL. Más recientemente los enfoques deterministas han ido apareciendo, se tiene una mejor comprensión de la propagación física de las señales. Como ejemplo de conjeturas formuladas en los enfoques de análisis que no se validaban, hoy en día se conocen los trayectos múltiples de propagación de la señal a lo largo del cableado [4].

2.4.3. Acoplamiento

El conectar un modem sensible y caro a la red PL es algo preocupante por los niveles de voltaje (de corriente alterna) que podrían dañarlo, por lo que muchas veces puede estar limitado en diseño y construcción debido a sus circuitos de acoplamiento. Los acopladores que existen en el mercado por lo general no son los apropiados porque el comportamiento de la red PL es muy variante incluso de ciudad en ciudad. Estos acopladores pueden debilitar el rendimiento del sistema [4][18].

Si se trabajase con acopladores no apropiados se puede obtener efectos secundarios como:

- Una inusual combinación de ruido.
- Fluctuaciones de impedancia.

Una manera de evitar estos efectos es realizar simulaciones en computadora que podrían ser más fiables si se verificasen las líneas en vivo.

La figura 2.7 muestra dos módems listos para ser conectados a través de algún canal de comunicación.

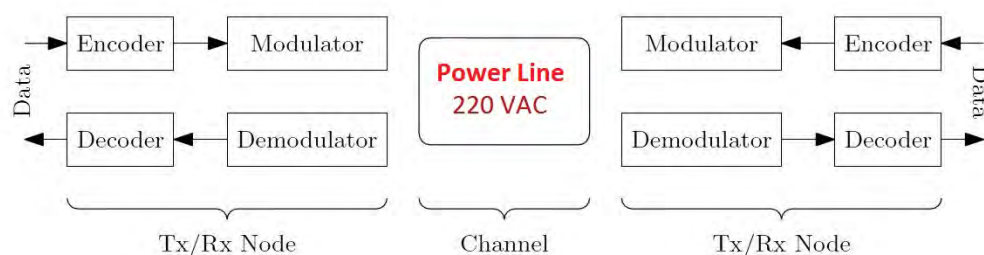


Figura 2.7.: Diagrama de bloques de dos módems conectados.

El acoplador es un dispositivo que permite que una señal de comunicaciones sea superpuesta y/o extraída desde una forma de onda de energía, esta señal de comunicación es llevada como ruido en la señal de energía de 50 Hz o 60 Hz.

Tipos de acopladores [4]:

- *Acopladores inductivos:* Son eléctricamente aislados de los cables de energía, por lo que ninguna conexión eléctrica directa es realizada. En esencia son transformadores con un bobinado primario que viene del modem y el bobinado secundario vendría a ser el cable de la red eléctrica; en algunos casos el cable de red podría enrollarse al bobinado para aumentar la eficiencia. Pero como se ve, esta tarea es bastante complicada si se tiene la red eléctrica ya instalada.
- *Acopladores capacitivos:* La mayoría de acopladores de este tipo son usados junto a un transformador de acoplamiento para la adaptación de impedancia

y protección contra caídas de rayos, picos inductivos y sobretensiones. Son los de mayor uso en las líneas de energía (BT) para modems PLC, económicas para competir contra las redes alámbricas e inalámbricas. El transformador de acoplamiento viene con un varistor, el cual influye con pérdidas a diferentes frecuencias, por lo cual es necesario realizar un mayor análisis si se desea implementar este tipo de acopladores.

Después de revisar este capítulo es evidente la necesidad y la importancia que tiene un buen diseño de acoplamiento para un sistema PLC.

El desafío más importante está asociado con los niveles de impedancia desconocidos, ambos de cables y cargas, si estos pueden ser caracterizados en las frecuencias de modulación se daría un paso importante hacia adaptaciones más precisas de impedancia. La caracterización de la carga podría ser beneficiosa especialmente para altas frecuencias.

Los valores de impedancia son muy variables, por ejemplo algunas investigaciones muestran que para las frecuencias CENELEC B, C y D se tienen valores de impedancia típicos entre 0.2 Ohm y 10 Ohm, otros estudios muestran hasta 100 Ohm. La figura 2.8 muestra un modelo simplificado de las impedancias del canal PLC y el cuadro 2.5 se muestran valores de impedancias típicas para frecuencias entre 5 kHz y 500 kHz [4].

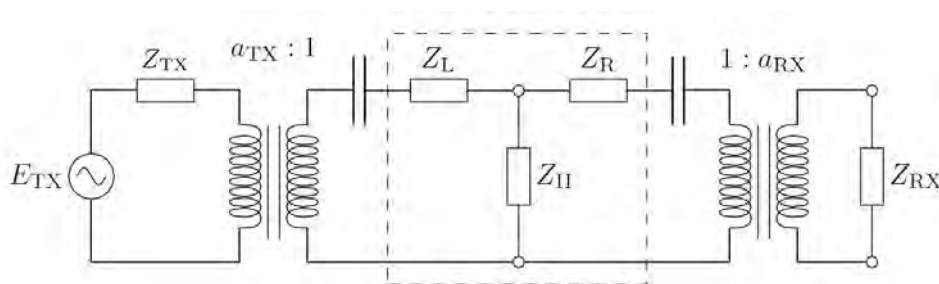


Figura 2.8.: Modelo simplificado de impedancias para un canal PLC [4].

Cuadro 2.5.: Clasificación de impedancias en serie (Z_s) y paralelo (Z_{II}) [4].

$Z_s = Z_R + Z_L$		
Línea corta	Línea mediana	Línea larga
0.1 - 1Ω	1 - 10Ω	10 - 100Ω
Z_{II}		
Carga ligera	Carga media	Carga alta
10 - 100Ω	1 - 10Ω	0.1 - 1Ω

2.4.4. Ruido e interferencia

El ruido e interferencia son los factores que más afectan las líneas de la red eléctrica.

Ruido propio de la red eléctrica

Este ruido no gaussiano de las redes PLC puede ser clasificado en dos categorías [19]:

1. Ruido de fondo
 - a) El ruido de color: Es una perturbación al sistema que se genera por las diferentes fuentes de energía interconectadas a la red y su densidad de potencia espectral decae exponencialmente con interferencias de banda estrecha [19].
 - b) El ruido de banda angosta (interferencia): Generada por la inducción de señales de radiodifusión, AM, FM, red celular, etc. [20] [16].
2. Ruido impulsivo: El ruido impulsivo es producido por efectos transitorios debido a fenómenos de conmutación, fenómenos como relámpagos, conexión y desconexión de aparatos, tiene una variación de microsegundos a milisegundos [21].
 - Ruido impulsivo sincronizado con las frecuencias principales tienen corta duración, entre 10-100 us, y es originado comúnmente por rectificadores controlados de silicio en las fuentes de alimentación [16].
 - Ruido impulsivo asíncrono, consiste en impulsos de duraciones variables ocasionados por eventos aleatorios de encendido y apagado. Es causada principalmente por la conmutación de fuentes de alimentación de electrodomésticos y las frecuencias afectadas van de 50 kHz a 200 kHz [16].
 - Ruido de avalancha o ionización, producido por campos eléctricos intensos que arrancan electrones en un material [22].
 - Ruido de transición, aparece por desfases que aparecen entre los voltajes y corrientes en el interior de dispositivos [22].

3. Estado del arte

3.1. Introducción

El acceso de ancho de banda tiene como candidato por excelencia a las redes PLC siempre y cuando sea explotada sobre la infraestructura ya existente.

PLC es considerado como el habilitador tecnológico de una multitud de futuras aplicaciones. La mayor barrera de que no se extienda es la falta de estándares técnicos internacionales. Se espera que el grupo de trabajo (creado en junio del 2005) de estándares corporativos de la IEEE P1901 elimine estas barreras. PLC a la fecha tiene más de 100 años, las primeras aplicaciones reportadas de PLC eran el monitoreo remoto de voltaje en los sistemas de telégrafos y lecturas de medidores remotos. En la actualidad el interés de PLC es el acceso de internet en banda ancha para redes de área local (LAN) en interiores.

De forma particular empresas proveedoras de productos globales como Tp-link, D-link, Devolo, entre otras, han lanzado al mercado productos PLC de alta velocidad.

3.2. Avances en PLC

3.2.1. La IEEE P1901

Como se mencionó en el Cap. 2 sobre la iniciativa IEEE P1901, se ha llegado a establecer frecuencias de transmisión por debajo de los 100 MHz para la conexión de la última milla con dispositivos a menos de 100 m.

Los esfuerzos de la P1901 se limitan a la capa física y la capa de enlace de datos. Se desarrollaron cientos de requerimientos técnicos y funcionales (FTRs), estos FTRs establecen cómo los dispositivos pueden compartir el canal para evitar interferencias entre sí, protocolos de coexistencia, de intercambio general de recursos, entre muchos otros más. Su arquitectura fundamental es maestro – esclavo. Propone dos técnicas de transmisión multicanal que se muestran en el cuadro 3.1 [2]:

- Ventana OFDM basado en FFT.
- Wavelet OFDM .

Cuadro 3.1.: Técnicas de transmisión multicanal [2].

FFT-OFDM PHY	
Método de comunicación	Fast Fourier Transform (FFT) OFDM
Puntos FFT	3072, 6144
Frecuencia de muestreo (MHz)	75, 150
Longitud de símbolo (μs)	40.96
Modulación primaria (por subportadora)	BPSK, QPSK, 8-, 16-, 64-, 256-, 1024-, y 4096-QAM
Banda de frecuencias (MHz)	2-30 (bandas opcionales: 2-48 y 2-60)
Máxima velocidad de transmisión (Mbps)	545 (8/9 CTC)
Wavelet-OFDM PHY	
Método de comunicación	Wavelet OFDM
Frecuencia de muestreo (MHz)	62.5, 125
Longitud de símbolo (μs)	8.192
Modulación primaria (por subportadora)	BPSK, 4-, 8-, 16-, 32-PAM
Banda de frecuencias (MHz)	2-28 (banda opcional: 2-60)
Máxima velocidad de transmisión (Mbps)	544 (239/255 RS)

3.2.2. Aplicaciones PLC

Red de sensores y automatización de luces

La principal ventaja de PLC sobre otras redes alámbricas es que esta infraestructura de la red eléctrica está presente en casi todo el mundo. Se vienen realizando pruebas a nivel mundial sobre aplicaciones de las redes PLC. Un trabajo realizado a la sombra de REMPLI (*Real-Time Energy Management via Powerlines and Internet*) [23] y un aeródromo son muestras del desarrollo que se viene dando. El primero (sistema de gestión de energía) es una red consciente de sensores y actuadores interconectados (esto se orienta al concepto Smart Grid); suponiendo que todos los hogares contarán con medidores de este tipo fácilmente se superarían los 300 nodos que necesariamente tendrían que presentar una alta fiabilidad en tiempo real. El segundo es un sistema de automatización de luces moderno AGL (*Airfield Ground Lighting*) que monitoreará sensores desplegados en un campo de aviación como guías visuales.

Al finalizar las pruebas realizadas en la banda CENELEC-A con un ancho de banda de 50 kHz se obtuvieron buenos resultados, confirmando así la proliferación de PLC

como un facilitador para Smart Grid. PLC no tiene la necesidad de una fuente de alimentación adicional, ésta se extrae directamente de su conexión a la red eléctrica. Algunas nuevas definiciones sobre PLC las distinguen como [24]:

Narrowband: Con un ancho de banda menor a 500 kHz usado en controladores y medidores automatizados.

Wideband o Broadband: Con un ancho de banda entre 1.6-30 MHz, usa OFDM como esquema de modulación.

Se elaboró una comparación entre características de canal para bajas y altas frecuencias y las relaciones entre las diferentes métricas [23], llegándose a concluir que los resultados llenan un vacío en la literatura de datos relevantes para ayudar en el diseño de PLC *Narrowband*.

Los resultados:

- El análisis de la ganancia del canal PLC promedio mostró mucha menor atenuación de la señal promedio en las bandas hasta 500 kHz que a frecuencias por encima de los 2 MHz, por lo tanto bandas CENELEC/FCC/ARIB son ventajosas para transmitir señales PLC en términos de promedio de atenuación.
- También se muestran otros resultados muy importantes donde se evaluaron las métricas anteriormente mencionadas, este estudio utiliza el método de modelamiento estadístico, un método que toma mediciones del lugar y se obtienen resultados reales.

MIMO PLC

MIMO (*Multiple-input Multiple-output*) en PLC ha intentado la adaptación de la transmisión de múltiples antenas y técnicas de recepción a la red eléctrica. Como resultado MIMO PLC ha adoptado especificaciones de la ITU-T G.hn en la recomendación G.9963, así como la especificación para industrias *HomePlug AV2*, la cual es ampliamente compatible con la IEEE 1901 [25].

Este artículo revisa aspectos importantes de MIMO PLC comparándolo con el MIMO inalámbrico clásico [25]. Los sistemas SISO PLC carecen de cobertura para largos enlaces en casas grandes, por lo que el sistema MIMO ha sido fuertemente investigado para aumentar las tasas de datos y la fiabilidad de comunicación [25].

El uso de técnicas MIMO en el hogar es posible debido a un cable de tierra de protección que está presente en las tomas de corriente. Las soluciones de hardware MIMO comerciales están empezando a estar disponibles y se espera que la adición de procesamiento de señales MIMO se convierta en un factor clave para aumentar la satisfacción del usuario al conectarse a la red PL [25].

HomePlug AV2

A los productos basados en *HomePlug AV* y las especificaciones *HomePlug AV2* se pueden conectar dispositivos tales como televisores inteligentes y reproductores multimedia de alta definición a Internet a través de una conexión con el router de casa, así como ampliar la cobertura de una red Wi-Fi [26].

La figura 3.1 muestra características de *HomePlug AV2*, hace uso del espectro de frecuencias (de 30 a 86 MHz) más allá de la frecuencia utilizada para *HomePlug AV*, lo que aumenta significativamente el rendimiento. El espectro adicional también mejora los datos pico de las tasas de rendimiento y es esencial para lograr un alto rendimiento a través de la línea eléctrica. También incorpora MIMO, lo que ofrece una mejor cobertura en toda la casa. MIMO permite a los dispositivos *HomePlug AV2* transmitir en tres hilos que incluyen a tierra. Esto permite una velocidad máxima de datos mejoradas significativamente y el rendimiento. La mayoría de casas en nuestro país no tienen el tercer cable que se requiere para implementar MIMO; sin embargo, *HomePlug AV2* automáticamente cambia al funcionamiento normal de una sola entrada y salida única (SISO) cada vez que el tercer hilo no esté disponible. Proporciona tasas en PHY de 1300 Mbps, con velocidades de datos resultantes entre 550 Mbps y 500 Mbps sobre UDP TCP [26].

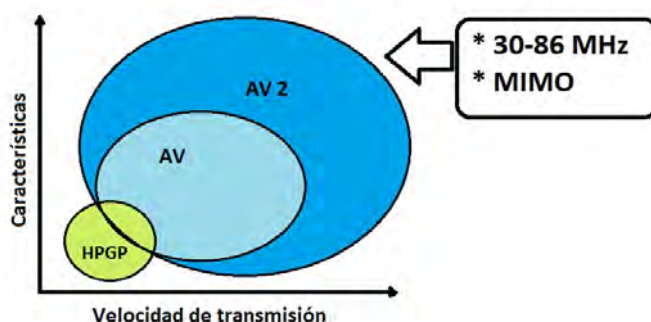


Figura 3.1.: Características clave en *HomePlug AV2*.

Modulaciones en Narrowband de bajo costo

Los autores en [27] propusieron el diseño de un modem usando espectro ensanchado FSK, para transmisiones hasta 1200 bps en las bandas de 9 kHz a 95 kHz, implementaron un modem con el integrado, el MTC-3058 que es un controlador de línea/receptor especialmente diseñado para aplicaciones PLC. Aunque específicamente diseñado para el intercambio de datos entre la red eléctrica inteligente y el proveedor de servicios públicos, el dispositivo ofrece la suficiente flexibilidad para ser usado en las comunicaciones domésticas u otros sistemas, que también utilizan la transmisión PLC (por ejemplo, los autobuses de automatización del hogar, etc.).

Este circuito integrado viene conectado a un MTC-30585 (modem PLC SFSK) que provee una velocidad máxima de 1200 bps en *half duplex* y su portadora de 5 kHz a 90 kHz. Estos circuitos integrados son compatibles con las normas IEC 1334.

Otro intento de transmitir en la red PL [28] hace uso de sistemas de línea de módems de alimentación (PLM), esto permite a los diferentes homólogos comunicarse. Los requisitos típicos de una PLM son: bajo consumo de energía el consumo, bajo costo microprocesador, gran número funciones implementadas, de la compatibilidad con un número de protocolos de comunicación, trabajan a bajas velocidades y en *Narrowband*. Integra un ST7538 que es un transceptor de línea de alta tensión. Tiene velocidad de transmisión programable hasta 4800 bps, recepción de sensibilidad hasta 250 μ Vrms, y es adecuado para la aplicación de conformidad con la norma CENELEC EN 50065. Es un modem FSK y se utilizó una portadora de 40 kHz.

Otra propuesta interesante en el uso de PLC la encontramos en el monitoreo de paneles solares [29], se realiza un monitoreo constante e individual por cada panel, lo que permite encontrar fallas en el lugar exacto. Se hace uso de controladores de propósito general MC2M (*Double Core Multipurpose Controller*) que son controladores de doble núcleo. Trabaja con la norma Europea CENELEC EN 50065, instalaciones eléctricas de baja tensión, frecuencia de 3 kHz a 148,5 kHz, velocidad de transmisión de hasta 16 Kbps.

Una propuesta usando el espectro ensanchado por secuencia directa DS-CDMA (acceso múltiple por división de código en secuencia directa)[6], plantea una transmisión PLC obviando los acopladores y colocando en su lugar un FET. Se obtuvo un transmisor con un costo de \$2 dólares pero la tasa de transmisión es de 5 bps sobre una portadora de 10 kHz.

3.3. Apreciaciones finales

Se ha ido mencionando las características y la evolución que ha tenido PLC a través de los años, en la literatura hallada no deja de mencionarse las ventajas que presentan las redes PLC y también sus debilidades frente a ruidos y otros problemas. Es necesario un modelamiento de canal de acuerdo al entorno donde se desea transmitir pues las características de cada canal son muy variables. También se mencionan avances, estándares y una visión que va integrando PLC a lo que en la actualidad está tomando fuerza: Smart Grid e IoT.

En general, podríamos resumir la clasificación sobre categorías de tecnologías PLC como se muestra en el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2.: Clasificación de tecnologías PLC.

Categoría	Banda de frecuencias	Velocidad típica de transmisión	Modulación usada
Ultra Narrow Band (UNB)	0.3 - 3 kHz	100-120 bps	ASK
Narrowband (NB)	3 - 500 kHz	<ul style="list-style-type: none"> ■ Low Data Rate (LDR): pocos Kbps ■ High Data Rate (HDR): hasta 500 Kbps 	<ul style="list-style-type: none"> ■ LDR: FSK, S-FK ■ HDR: OFDM
Broadband (BB)	1.8 - 250 MHz	Hasta varios cientos de Mbps	OFDM

Las tasas de transmisión para *Narrowband* son muy bajas, llegan hasta los 16 Kbps con modulaciones como OFDM que tienen un costo significativo de implementación, los intentos de comunicaciones a bajo costo implican transferencia de datos por debajo de los 5 Kbps, usando en su mayoría de casos modulación FSK. En *Broadband* se alcanzan tasas de transferencia mayores del orden de cientos de Mbps, también usando modulación OFDM.

El presente trabajo busca alcanzar una transmisión de datos mayor a 180 Kbps, a bajo costo. Se usó la modulación FSK pero no en *Narrowband*, sino en *Broadband*. Se implementó con microcontroladores, circuitos integrados y componentes electrónicos de bajo costo y asequibles en el mercado.

4. Diseño de la solución

En este capítulo se detalla el diseño de transceptor de comunicaciones de bajo costo. El diseño será validado utilizando señales de audio enviadas en una comunicación digital.

4.1. Diseño de la sección de acoplamiento

Elección de un filtro paso-alto como acoplador a la red eléctrica

El acoplador es elemento interfaz entre la red domiciliar BT (220VAC) y la entrada/salida de circuitos utilizados en el transceptor. El acoplador es necesario para estudiar el canal PLC y realizar la transmisión y recepción de datos, por lo que este debe ser diseñado cuidadosamente.

Para reducir costos en el acoplador se optó por el diseño de un filtro pasivo paso-alto, estos filtros pasivos son fáciles de diseñar, se encuentran en cualquier tienda electrónica y sobre todo son baratos de implementar.

En la figura 4.1 se muestra el esquemático del filtro (paso-alto) analizado de primer orden que servirá a nuestros propósitos.

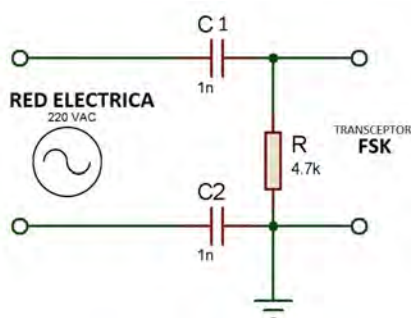


Figura 4.1.: Filtro pasivo RC como acoplador a la red PL.

El diseño del filtro fue realizado de tal manera que la señal de la red eléctrica de 60 Hz y Vrms de 220 VAC sea menor a 0.5 Vrms a la salida que va conectada a nuestro transeptor.

De la figura 4.1 donde $c1 = c2 = c' \Rightarrow C = c' / 2$ se tiene en la siguiente ecuación la función de transferencia del filtro pasivo de primer orden:

$$H(S) = R / (R + 1/CS) = sRC / (sRC + 1) \tag{4.1}$$

Las figuras 4.2 y 4.3 muestran los resultados teóricos y simulados respectivamente que corresponden a un acoplador con los valores calculados: $R = 4.7 \text{ kohm}$ y $C = 0.5 \text{ nF}$, nos brindan un amplio rango de trabajo para poder estudiar el canal de la red eléctrica eliminando esta componente de 60 Hz, donde la frecuencia de corte $f_c = 1 / (2\pi RC)$ en MATLAB® y en *Proteus Design Suite* (© *Labcenter Electronics Ltd*) está en 67.725 kHz. Estos resultados muestran una atenuación de más de 60 dB para 60 Hz.

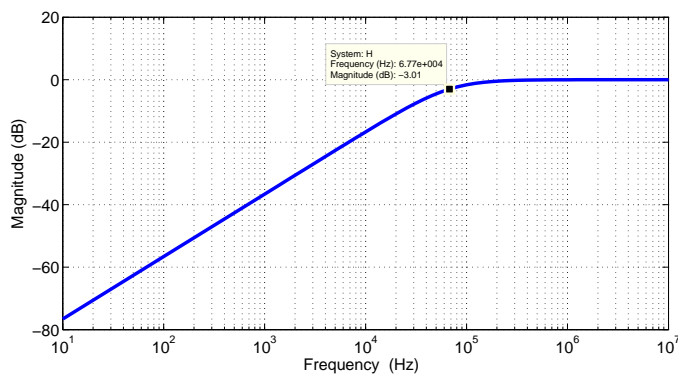


Figura 4.2.: Función de transferencia teórica del acoplador diseñado.



Figura 4.3.: Función de transferencia del acoplador simulada en *Proteus*.

4.1 Diseño de la sección de acoplamiento

La figura 4.4 muestra la función transferencia medida a la salida (bornes de la resistencia de 4.7 kohm - Figura 4.1) del acoplador implementado, para una entrada medida de 230 Vrms (VAC) y una salida de 0.48 Vrms se tiene una atenuación en voltaje de aproximadamente 53 dB.

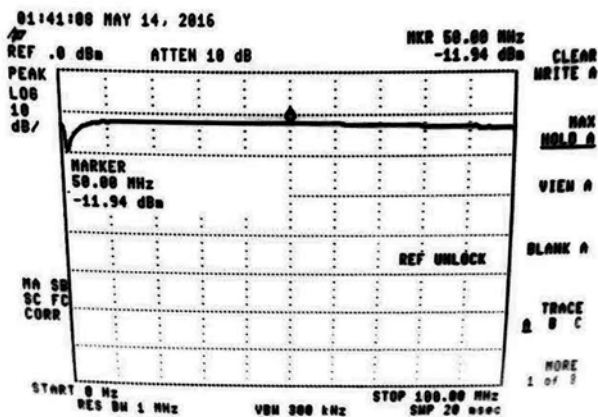


Figura 4.4.: Función de transferencia medida del acoplador diseñado (sin conexión a la red eléctrica).

El canal de comunicaciones de nuestra red PL está compuesto por la red eléctrica y los acopladores. Para el estudio de su comportamiento es necesario conocer la función de transferencia del mismo. Se analizará el canal con los dos acopladores a los extremos en la parte transmisora y receptora. La figura 4.5 muestra el canal de la red PL con los acopladores instalados, la frecuencia de corte teórica se ha desplazado al doble del comportamiento de un solo acoplador $F_c = 2(67,725) = 135,45$ KHz.

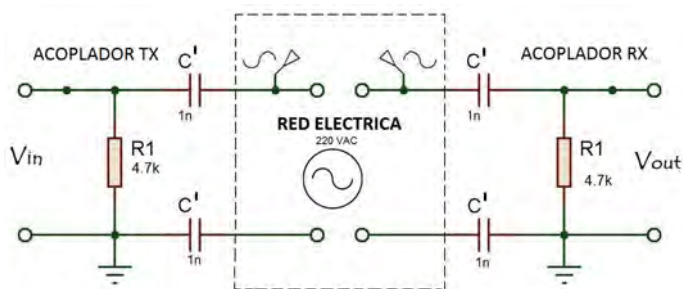


Figura 4.5.: Representación del canal para la transmisión de datos de la red eléctrica.

La función de transferencia que modela idealmente todo el canal de comunicación se muestra en la ecuación 4.2 y la figura 4.6 muestra la función de transferencia que modela idealmente todo el canal de comunicación, donde $C = c'/2$. Este resultado

sigue siendo favorable, la señal de 60 Hz tiene una atenuación mayor a 60 dB y podemos trabajar en bandas mayores a los 135 kHz.

$$H(S) = (V_{out}(S))/(V_{in}(S)) = sRC/(sRC + 2) \tag{4.2}$$

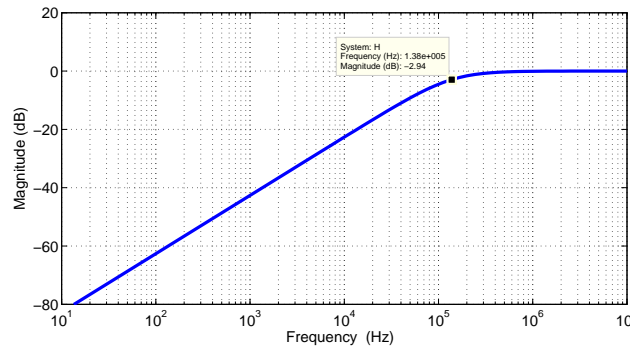


Figura 4.6.: Función de transferencia de los acopladores en cascada (ver figura 4.5 - sin conexión a la red eléctrica)..

4.2. Caracterización del canal

En el cuadro 4.1 se muestran las principales características del canal PLC donde se realizaron las pruebas y posteriormente la transmisión de datos.

Cuadro 4.1.: Características y condiciones del canal estudiado.

Tensión de red eléctrica	Monofásica 220 VAC
Horario de análisis del comportamiento de la red	Entre las 7:00 am – 11:30pm
Distancia entre puntos de prueba	16 m
Equipos conectados a la red eléctrica	Computadores, focos, taladros, artefactos eléctricos, laptop, cargador de baterías de equipos portátiles.

4.2.1. Recomendaciones para trabajar con una red de baja tensión (220 VAC)

Se siguieron las siguientes recomendaciones para evitar accidentes e incidentes en el momento de realizar las pruebas:

- Usar una llave termomagnética sensible entre la red y el acoplador como se muestra en la figura 4.7 para protección ante cortocircuitos y desconectarla cuando no se estén realizando pruebas.
- Utilizar un cableado de diámetro mínimo 18 AWG del tomacorriente a la llave termomagnética y de ésta al circuito acoplador. En las pruebas realizadas, cables de menor calibre son más susceptibles a fracturas y pueden generar problemas como corto-circuitos, o descargas al operador.
- Nunca conectar a la red eléctrica los terminales que corresponden al transceptor ni viceversa.
- No tener cables sueltos cerca del circuito acoplador y aislar los terminales de este para no sufrir descargas por contacto.
- No conectar a una red con voltajes mayores a la baja tensión (220 VAC), de hacerlo reajustar los valores del acoplador de acuerdo a cálculos de corriente y voltaje necesarios.

4.2.2. Ruido de fondo e interferencia

Para realizar la medición de interferencia y ruido en la red PL, se ha utilizado un analizador de espectros *Keysight N9000B CXA* conectado en cascada al acoplador implementado como se muestra en la figura 4.7.

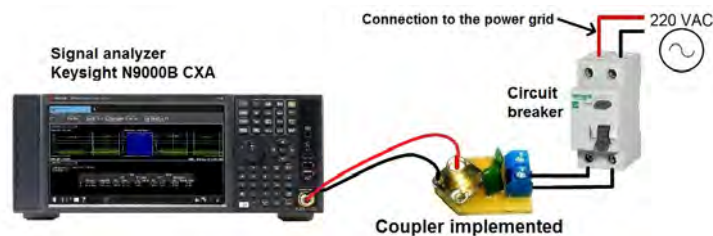


Figura 4.7.: Esquema utilizado para caracterizar la red eléctrica.

La figura 4.8 muestra el espectro de frecuencias de 1 Hz a 110 MHz del canal de comunicación PLC. Se observan varios tipos de interferencias, en color azul las diferentes fuentes de energía que afectan a la red [19]. Se observa un predominio de la interferencia conocida como ruido de banda angosta, la cual es generada por la inducción de señales de radiodifusión, AM, FM, red celular, etc. [20] [16]. En particular, en esta figura, se distingue fácilmente la interferencia producto de las radioemisoras FM.

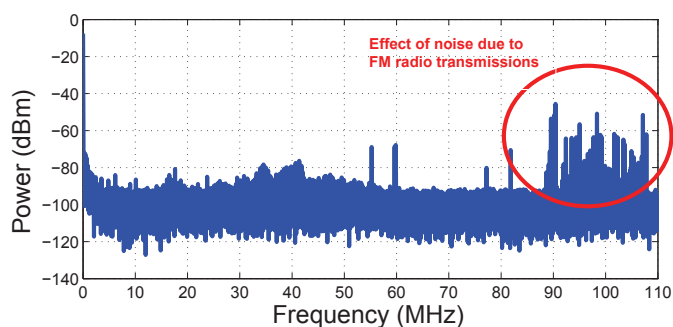


Figura 4.8.: Espectro de potencia medido en la red PL donde se observan varios tipos de interferencias.

Otras formas de ruido que afectan a una red PL se muestran en la figura 4.9. El ruido de color o ruido de fondo (en tono de color azul) y el ruido impulsivo debido al encendido de un grupo de 4 focos ahorradores (en color rojo). Este ruido impulsivo es ocasionado por eventos aleatorios de encendido y apagado, causado principalmente por la conmutación de fuentes de alimentación de electrodomésticos. Las frecuencias afectadas pertenecen a *Narrowband* y parte a *Broadband* [16]. Los resultados muestran que este ruido afecta una banda entre los 2 MHz a 20 MHz. Se puede observar que el incremento del ruido es notable en las bandas inferiores a 8 MHz incrementando más de 20 dB (100 veces mayor). Para bandas superiores el incremento es menor, pero aún considerable. Por lo tanto, este tipo de ruido es "perjudicial" para las comunicaciones en la red PL. Sin embargo, este tipo de ruido es transitorio y de muy corta duración ($\ll 1\text{ms}$).

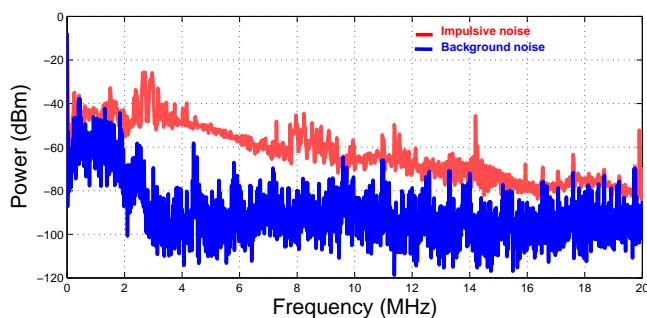


Figura 4.9.: Ruido producido por los efectos transitorios de encendido y apagado de focos ahorradores.

La figura 4.10 muestra el ruido producido por campos eléctricos intensos generados por motores conectados al canal PLC como licuadoras, taladros o cualquier otro electrodoméstico que posea un motor de corriente alterna. En estos resultados se muestra la influencia del conocido "motor universal de corriente alterna". Este motor

es muy comúnmente usado para electrodomésticos o herramientas de mano. Los resultados muestran que el ruido introducido por este tipo de motor afecta a la banda entre los 100 MHz a 350 MHz. Para frecuencias menores a 100 MHz no tuvo un efecto apreciable, por lo que no afecta las bandas *Narrowband* ni *Broadband* del canal PLC.

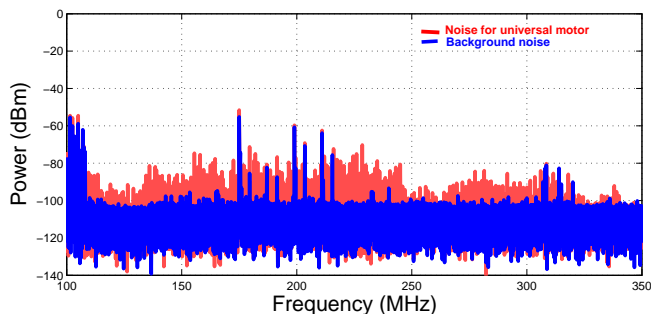


Figura 4.10.: Ruido introducido por un motor universal en la red eléctrica .

Se encontró que algunos cargadores de equipos portátiles generan una fuerte interferencia sobre el canal PLC. La figura 4.11 muestra el ruido introducido por el cargador de una computadora portátil (Sony Vaio Sve141d11u) conectado a un metro de distancia de nuestro acoplador. Este ruido afecta tanto a *Narrowband* como a *Broadband*, afectando significativamente el canal PLC en la banda de frecuencias aproximadamente desde los 10 MHz a 70 MHz. Para frecuencias cercanas a 50 MHz el ruido introducido tiene un incremento mayor a 40 dB, lo que imposibilitaría las comunicaciones en esta banda.

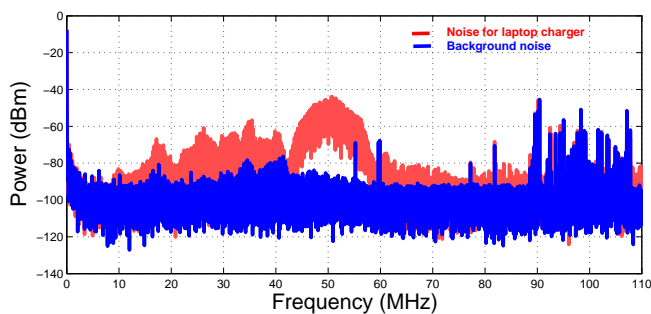


Figura 4.11.: Ruido introducido por un cargador de computadora portátil.

La figura 4.12 muestra en (a) la banda de 25MHz a 65MHz libre de ruido y en (b) con presencia del mismo. El ruido que se presenta en esta banda es de corta duración (alrededor de algunos segundos) y aparece "esporádicamente" en intervalos de algunos minutos.

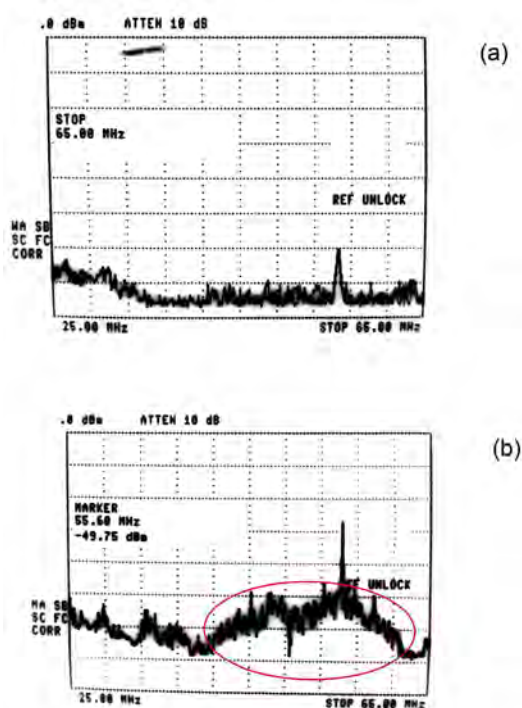


Figura 4.12.: Espectro de potencia 25 MHz a 65 MHz en condiciones de ruido esporádico. (a) Espectro de potencia sin presencia de ruido. (b) Espectro con ruido esporádico presente.

4.2.3. Identificación de bandas de frecuencias adecuadas para realizar la transmisión de datos.

Para la selección de la banda de frecuencias donde transmitiremos datos, se consideraron características del entorno descrito en el cuadro 4.1; estos resultados fueron tomados a diferentes horas del día (varios días en la semana) en la banda de 9 kHz a 1 GHz. Se utilizó el generador de señales *Rohde & Schwarz* SMT06 que ingresará la señal a través del acoplador (transmisor) a la red eléctrica. El analizador de espectros HP 8591A se conectó al acoplador del lado del receptor, se configuró para mostrar el máximo valor de la señal recibida, usando el esquema de conexión similar al de la figura 4.7.

Para la caracterización del canal PLC se introdujo una señal senoidal de 5 dBm variando su frecuencia entre 9 kHz a 1 GHz. De los resultados que se obtuvieron, la figura 4.13 nos muestra una primera banda adecuada para transmitir datos, en las frecuencias (6 MHz - 14 MHz), siempre y cuando esta no esté en contacto con una fuente de interferencia poco común (sólo un modelo de cargador presentó este ruido) como la que se muestra en la figura 4.11. Los resultados obtenidos de la caracterización del canal en esta banda muestran una relación de señal a ruido idónea para

enviar datos. Tenemos una potencia de la señal que se mantiene aproximadamente sobre los -40 dBm y el ruido está por debajo de los -60 dBm y en algunas zonas por debajo de -70 dBm.

La figura 4.13 (a) muestra el espectro de una señal enviada (en rojo) y el ruido de fondo (azul), la figura 4.13 (b) muestra la relación (en dB) de la potencia de la señal transmitida y del ruido de fondo. Se desea operar en una banda de baja frecuencia con un mínimo ruido de fondo, por lo que se ha elegido la banda 6 - 8 MHz como un canal que posibilita la comunicación.

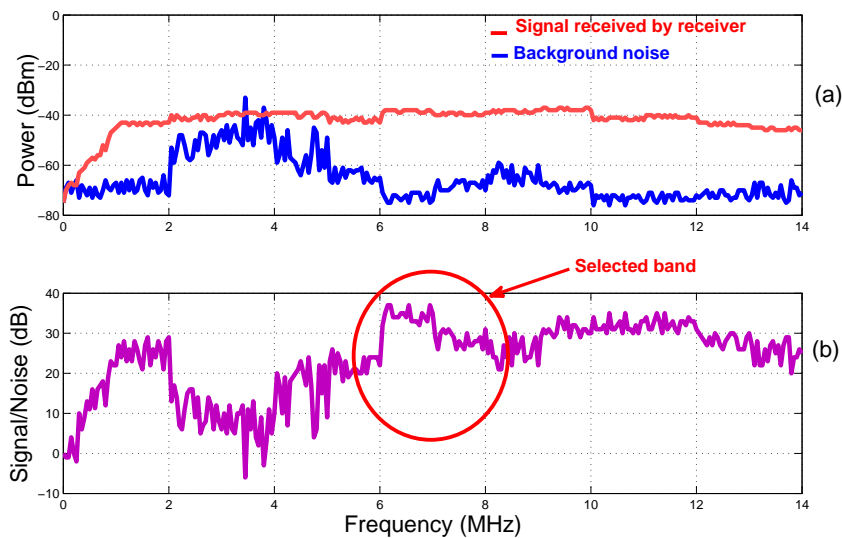


Figura 4.13.: Espectro de potencia para banda de 9 kHz a 14 MHz (a) En rojo la señal enviada y en azul el ruido en el canal. (b) Razón entre señal y ruido.

De 14 MHz a 35 MHz, el nivel de potencia de la señal recibida decae. Una segunda banda propuesta donde el nivel de potencia se mantiene sobre los -40 dBm está entre los 30 MHz a 60 MHz. La figura 4.14 muestra el nivel bajo de ruido que presenta esta banda, por debajo de los -60 dBm.

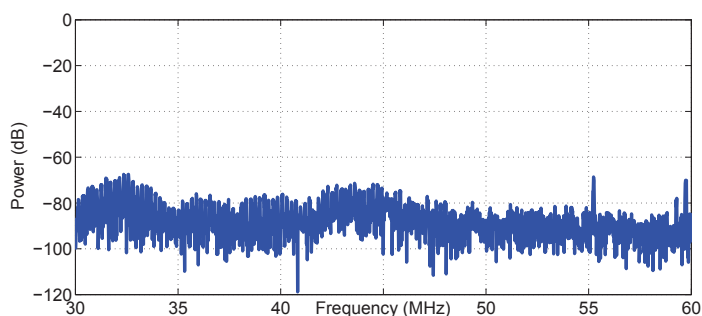


Figura 4.14.: Ruido presente en bandas de 30 MHz a 60 MHz.

4.2.4. Elección de la banda de trabajo para transmitir datos

En esta tesis se utilizó la primera banda clasificada (entre los 6 MHz y 14 MHz). A partir de los análisis realizados al canal, considerando los circuitos integrados en el mercado y el costo de adquirirlos, se ha elegido esta primera banda propuesta para la transmisión de datos (Figura 4.13).

4.3. Diseño del transceptor de comunicaciones

4.3.1. Conversión analógico-digital y digital-analógico

En este trabajo usaremos una transmisión de datos digitales para validar la comunicación a través de la red PL. Comenzaremos utilizando PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) y luego PCM (*Pulse Code Modulation*) para obtener los datos en forma serial.

La figura 4.15 muestra las etapas que seguirá nuestra señal de audio para su conversión de una señal analógica a una señal digital. La señal de entrada analógica será la señal de audio (música), el circuito integrado LM358 se encargará de adicionar un voltaje DC a la señal de audio para obtener una señal entre 0 a 5 V. El muestreo, retención, conversión analógico-digital y la salida a serie estará a cargo de un microcontrolador PIC12f675. En el lado receptor se tendrá la señal serie que será procesada por un PIC16F628A que se encargará de la decodificación y conversión de serie a paralelo de la señal digital. El circuito integrado DAC0808 (convertor digital a analógico) se encargará de la retención de la señal y pasará a un filtro pasa banda para luego obtener nuestra señal de audio.

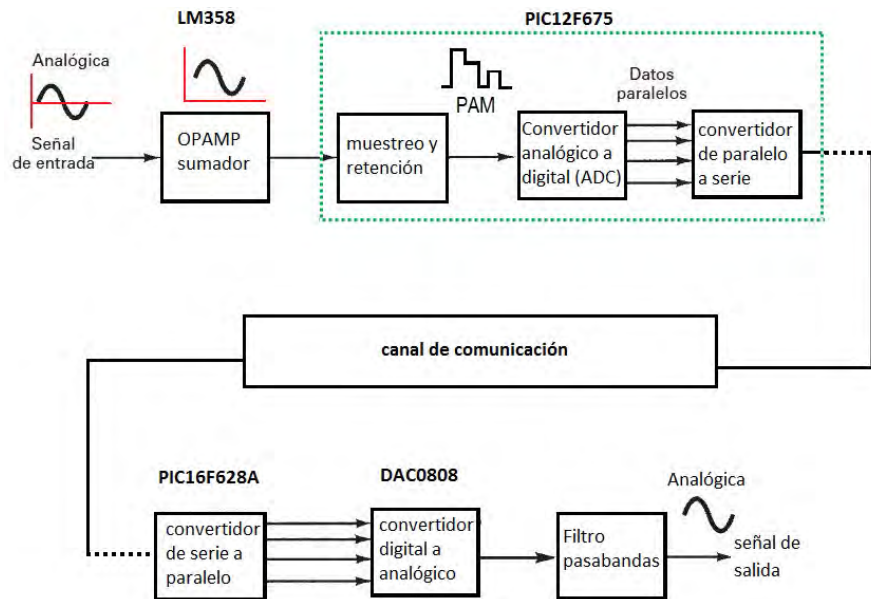


Figura 4.15.: Modulación PCM.

4.3.2. Muestreo de la señal

El teorema de muestreo de Nyquist:

$$f_s \geq 2f_a \quad (4.3)$$

Dónde:

f_s = Frecuencia mínima de muestreo de Nyquist (Hz).

f_a = Máxima frecuencia de audio que se debe muestrear.

La frecuencia de muestreo del audio está limitada por el tiempo de adquisición, conversión y programación del PIC12F675 configurado con un cristal de 20 MHz. Se ha utilizado lenguaje de bajo nivel *assembler* en los PIC para optimizar el uso de los recursos de hardware, por ejemplo para minimizar tiempos de comunicación. Las especificaciones del PIC12F675 indican que la operación de conversión será de $11 T_{ad}$ (unidad de tiempo de conversión, $1T_{ad} = 1.6 \mu s$) para obtener los registros donde se encuentran los valores convertidos del ADC. Los tiempos de la señal serial obtenida se muestran en la figura 4.16.

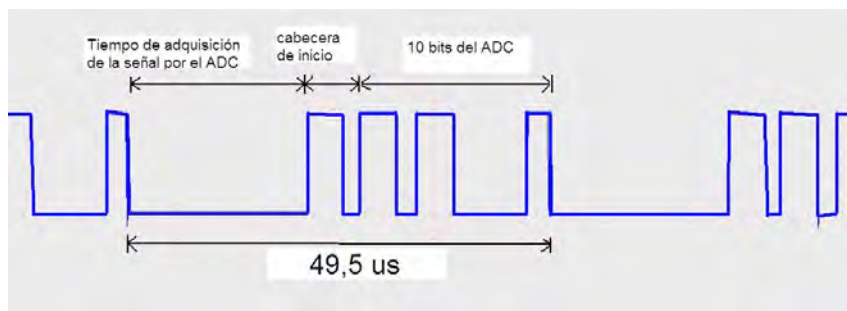


Figura 4.16.: Señal serial PIC.

La señal digital tiene cerca de $50\mu s$ de periodo, por lo que nuestra frecuencia de muestreo será $f_s = 20$ kHz, y la frecuencia máxima de audio que podremos representar será de 10 kHz (acorde con el teorema de Nyquist), que es mayor a la frecuencia utilizada en telefonía (aprox. 300 Hz - 3500 kHz). Sin embargo, esto limita la digitalización de audio de alta calidad (señales que contengan frecuencias superiores a los 10 kHz). La señal serial enviada tiene una cabecera que servirá para identificarla en el lado receptor por el PIC16F628A, se leerán 8 bits (de los 10 enviados por el transmisor) que serán enviados a un DAC0808, se descartan 2 bits debido a que el DAC0808 es un convertidor digital-analógico de 8 bits. Los 10 bits del ADC dividen los 5V DC en la entrada de lectura a 1024 valores, cada valor de $4,88mV$, los 2 bits descartados son los primeros dos menos significativos. Esto provocará un error de lectura en los niveles de voltaje de $\sim \pm 40mV$, pero que no generan distorsiones significativas en el proceso de recuperación de la señal analógica.

El PIC16F628A envía 13 bits, 10 del ADC más 3 de la cabecera de señalización, por cada $50\mu s$ resultando en una transferencia efectiva (13 bits) de 260 Kbps y *throughput* (11 bits) de 220 Kbps. Una manera de mejorar la tasa de transmisión de datos es usando microcontroladores más veloces que permitan procesar a más alta velocidad el muestreo y procesamiento de la señal analógica.

4.3.3. Modulación y demodulación

En este trabajo la señal serial es modulada utilizando FSK para enviar los datos a través de la red PL. Dicha modulación se implementa utilizando un PLL CD74HC4046A de Texas Instruments [30], que alcanza frecuencias de oscilación de hasta 18 MHz, lo cual permite utilizarlo en un amplio espectro de frecuencias incluyendo nuestra banda seleccionada. En las figuras 4.17 y 4.18 se muestran los diagramas de bloques del circuito integrado CD74HC4046A como modulador y demodulador FSK respectivamente.

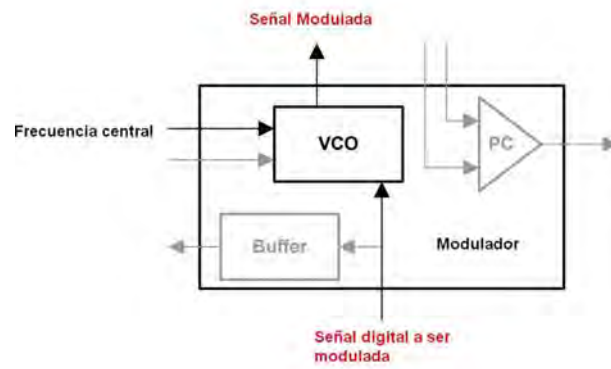


Figura 4.17.: Diagrama de bloques del CD74HC4046A como modulador FSK [30].

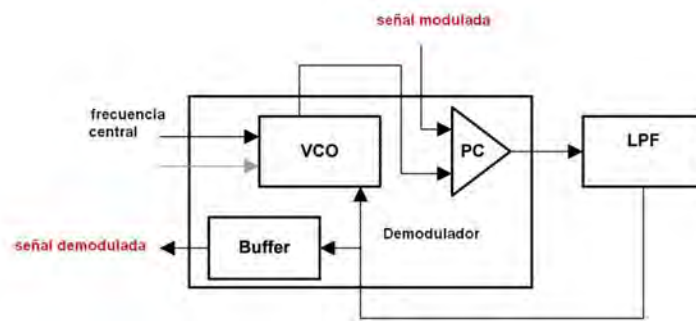


Figura 4.18.: Diagrama de bloques del CD74HC4046A como demodulador FSK [30].

Las figuras 4.19 y 4.20 muestran los esquemáticos del circuito integrado CD74HC4046A utilizado como modulador y demodulador para FSK.

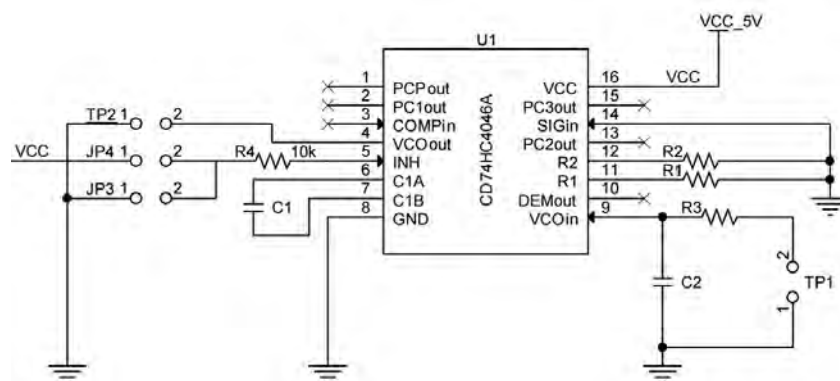


Figura 4.19.: Esquemático del modulador FSK utilizando el CD74HC4046A [30].

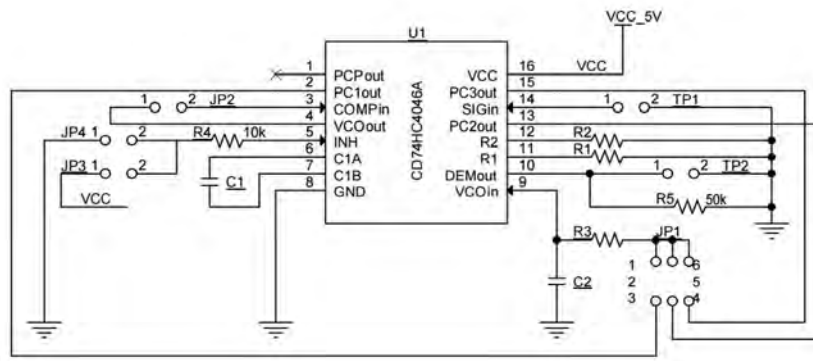


Figura 4.20.: Esquemático del demodulador FSK utilizando el CD74HC4046A[30].

Para cubrir los requerimientos técnicos del PLL CD74HC4046A, la señal digital debe ser acondicionada para obtener $1.0\text{ V} < VCO_{IN} < 0.9\text{ VCC}$. Para ello, se convertirán los niveles de tensión utilizando el circuito mostrado en la figura 4.21.

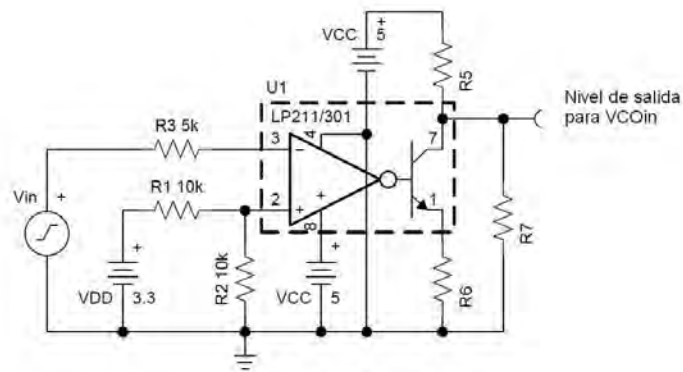


Figura 4.21.: Pre-acondicionamiento de la señal digital (previa a la modulación FSK) [30].

5. Implementación y resultados

5.1. Transceptor

La figura 5.1 muestra el diagrama de bloques del transceptor implementado, el cual se divide en dos etapas. La primera es la transmisora, que comprende desde la digitalización de la señal de audio hasta el acoplador a la red PL. La segunda etapa correspondiente a la receptora, comprende desde el acoplador de la red PL hasta la recuperación de la señal de audio.

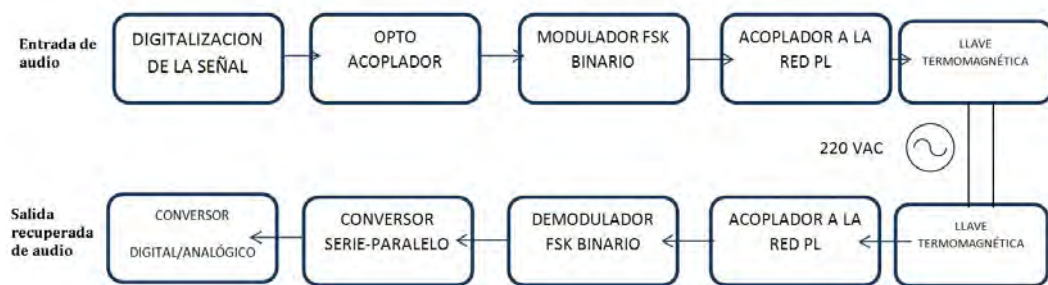


Figura 5.1.: Diagrama de bloques del transceptor.

5.1.1. Conversión analógica a digital

La figura 5.2 muestra el esquemático para realizar la conversión analógica - digital. La señal de entrada analógica será una señal de audio (música). El PIC12f675 se programó en código *assembler* para maximizar su eficiencia, es de bajo costo, puede ser configurado con un reloj de cristal externo de 20MHz, lo que hace que el tiempo de una instrucción en *assembler* (una instrucción por cada 4 ciclos de reloj) sea de 200ns y posee un ADC interno de 10 bits.

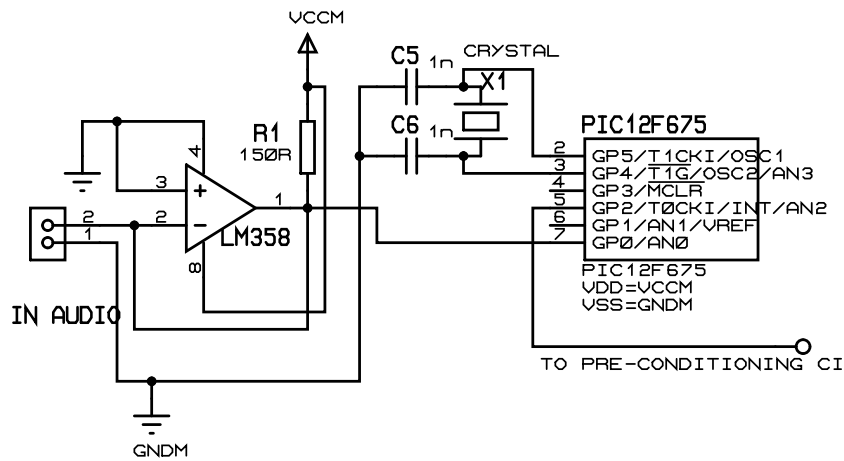


Figura 5.2.: Esquemático de la conversión analógico-digital.

Se enviará el dato tomado por el ADC de manera serial hacia un opto acoplador que protegerá nuestro circuito digitalizador. El dato serial enviado consta de una cabecera que es un bit de arranque de unos 4200 ns de nivel lógico alto y 1800 ns de nivel bajo. La cabecera tiene la función de sincronización de la transmisión de datos, nos indica en el lado receptor el momento en el cual se tiene una muestra lista (10 bits) para ser leída. La señal serial a la salida del PIC se muestra en la figura 5.3. La señal digital en este formato con cabecera (3 bits) y datos (10 bits) resulta en 260 Kbps, por lo que los datos enviados (excluyendo la cabecera) corresponden a 200 Kbps.

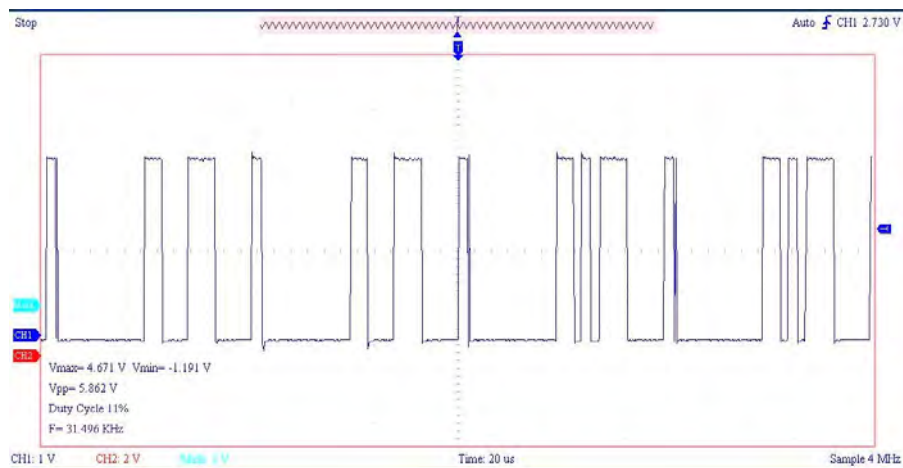


Figura 5.3.: Señal de audio digitalizada.

5.1.2. Acoplador a la red eléctrica

Se implementó un par de acopladores para comenzar con la caracterización del canal. Se usaron acopladores de bajo costo y de sencilla implementación. La figura 5.4 muestra en conjunto nuestro canal PLC (red PL, llaves termomagnéticas y acopladores). Los acopladores que se utilizaron en las pruebas iniciales fueron conectores SMA de 50 Ohm.



Figura 5.4.: Esquema de conexión para los acopladores.

A continuación se describen los resultados obtenidos luego de diversas pruebas hechas en la red PL.

Cuando existe una transmisión de datos entre dos medios de diferentes impedancias, la señal (que se desea enviar) se refleja. Para garantizar una eficiente comunicación, el diseño del acoplador debe permitir un mínimo valor de reflexión (parámetro de reflexión) de nuestra señal. La figura 5.5 muestra el esquema de conexión usado para medir el parámetro de reflexión. Se utilizó un analizador de red *Agilent 8712ET RF*.

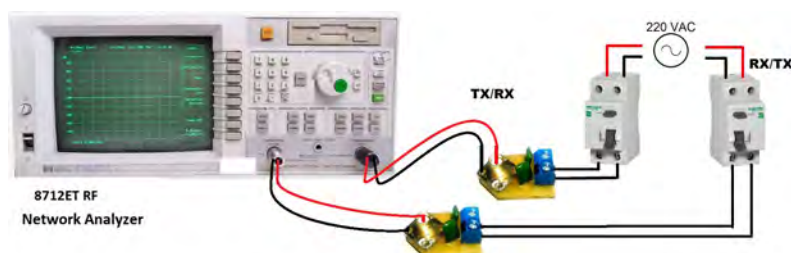


Figura 5.5.: Esquema para evaluar el parámetro de reflexión.

En la figura 5.6 se muestran el coeficiente de reflexión y la función de transferencia del canal PLC para un valor de $R1 = 50 \Omega$. Estos resultados permiten configurar el acoplador de tal manera que se tenga una menor cantidad de señal reflejada y una mayor transferencia de la señal que ingrese a la red eléctrica. De esta figura,

para una frecuencia de 11.068 MHz la potencia de la señal recibida a la entrada del demodulador ha decaído aproximadamente unos 4 dB (menos de la mitad del valor de potencia enviada) y la curva de reflexión muestra (para esta misma frecuencia) que la potencia de la señal reflejada en la entrada del acoplador (que va a la red eléctrica) tiene -18 dB de retorno, esto indica que menos de 1/40 de la potencia de señal es reflejada de la red eléctrica. Sin embargo, se nota que ambas curvas tienen un comportamiento inverso, mientras en una se tiene más pérdidas en la transferencia, la otra tiene menor valor de reflexión. Esto permite elegir una banda de frecuencias en las que es viable realizar la transmisión de datos. En este trabajo el modulador FSK trabajará en frecuencias mayores a 6 MHz pero menores a 11 MHz.

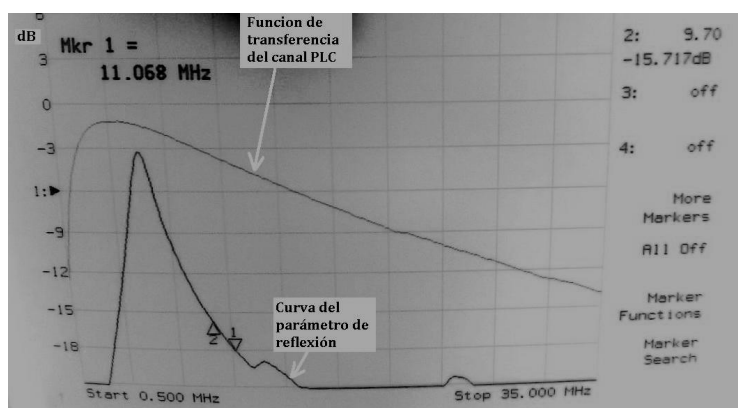


Figura 5.6.: Función de transferencia y parámetro de reflexión del acoplador implementado.

La figura 5.7 muestra la función de transferencia del canal PLC. Se obtienen curvas que corresponden a un filtro pasa banda con frecuencia de corte inferior aproximada a 1.5 MHz y frecuencia de corte superior aproximada a los 12 MHz. La resistencia que debe tener el acoplador (R_1) depende de los valores de impedancia de la red eléctrica y debe ser un valor que permita la máxima transferencia de potencia a la red. Sin embargo, dicho valor es desconocido y depende de las condiciones de la red PL. Para determinar un valor adecuado de R_1 se varió dicha resistencia y se evaluó la transferencia de potencia. Como se observa en la Figura 5.7, el valor de 220 Ohm es el que permite la transferencia máxima de potencia (al alcanzar 0 dB en el parámetro S_{21}). Además, el aumento de R_1 incrementa la frecuencia de corte superior del filtro pasabanda. La pendiente negativa que genera este comportamiento como un filtro pasa-banda está relacionada con la representación de la red eléctrica como una red de parámetros distribuidos (inductancia L , capacitancia C , resistencia R y conductancia G) [31].

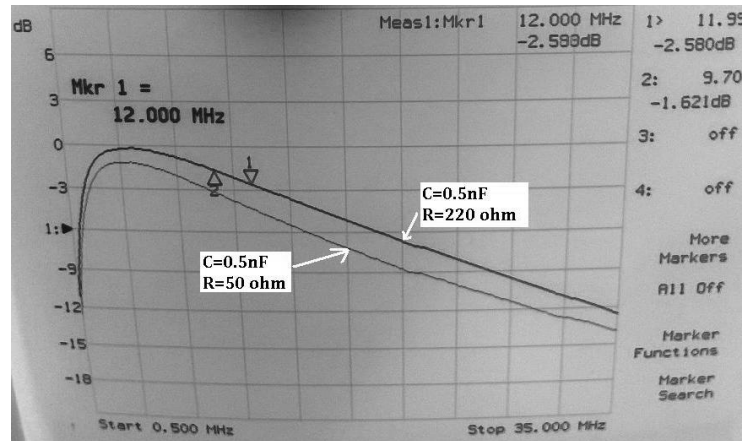


Figura 5.7.: Función de transferencia del canal PLC .

Otra consideración a tener en cuenta es que este acoplador ha sido sometido a pruebas con equipos que tienen salidas de impedancia de 50Ω . En el trabajo realizado, el modulador FSK no posee necesariamente este valor de impedancia a la salida, por lo que los resultados obtenidos son referenciales y nos ayudan a entender la importancia de tener un acoplador debidamente diseñado para trabajar en las bandas de frecuencia que se desea usar como canal PLC.

5.1.3. Modulador FSK binario

En esta etapa el voltaje que controla al VCO del PLL CD74HC4046A está a cargo de los valores de voltaje a la salida del opto acoplador (nivel bajo = 1.4 V y nivel alto = 4.3 V), de tal manera que nuestra señal modulada tendrá dos frecuencias: La frecuencia de espacio $f_s = 6,5$ MHz y la frecuencia de marca $f_m = 7,5$ MHz, con una frecuencia de corte de $f_c = 7$ MHz y $f_b = 200$ Kbps. El ancho mínimo de banda apropiado haciendo uso de las ecuaciones (2.2 y 2.3) es $B = 1,4$ MHz. Por lo tanto, éste es el ancho de banda necesario para poder realizar una comunicación modulada en FSK a 200 Kbps.

La figura 5.8 muestra el esquemático del modulador FSK, donde el pin 4 del PLL va al acoplador que está conectado a la red eléctrica.

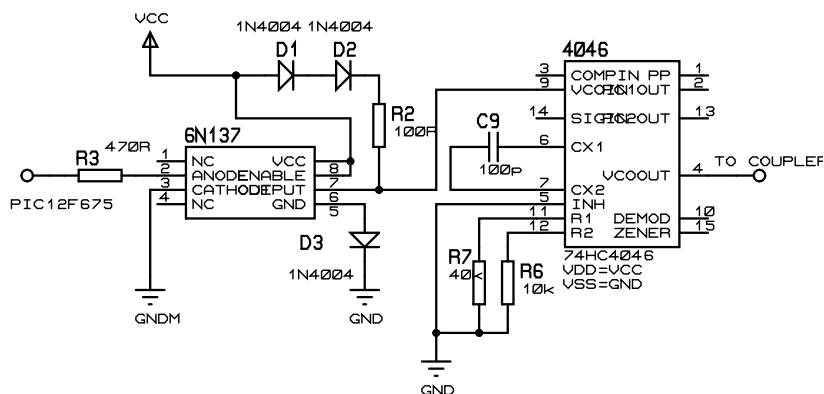


Figura 5.8.: Esquemático del modulador FSK.

5.1.4. Demodulador FSK binario

Para el demodulador se usó el circuito integrado PLL CD74HC4046A. La señal se obtiene de un acoplador conectado a la red eléctrica, esta señal pasa al PLL y obtenemos la señal demodulada. La figura 5.9 muestra el esquemático del demodulador FSK.

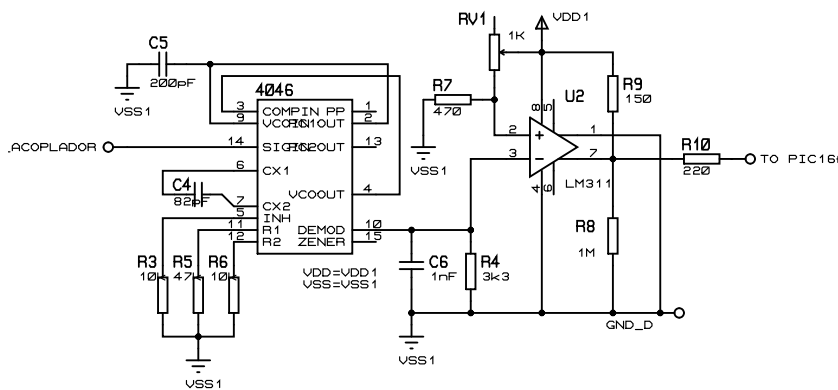


Figura 5.9.: Esquemático del demodulador FSK.

La figura 5.10 muestra el espectro de la señal FSK recibida, donde se observa las frecuencias de espacio y marca seleccionadas $f_s = 6,5$ MHz y $f_m = 7,5$ MHz. Note la similitud con la curva teórica indicada en el Capítulo 2 (figura 2.3).

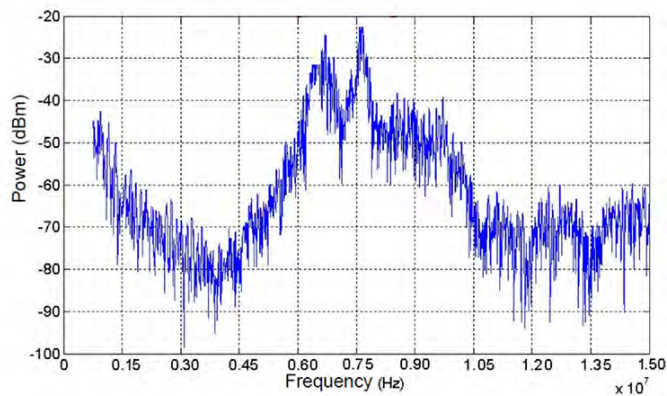


Figura 5.10.: Espectro de la señal FSK a la entrada del demodulador.

5.1.5. Recuperación de la señal analógica

La señal del demodulador pasa a un proceso de recuperación (a cargo del PLL) de los bits enviados, la figura 5.11 muestra la señal recuperada que ingresa al PIC16F628A.

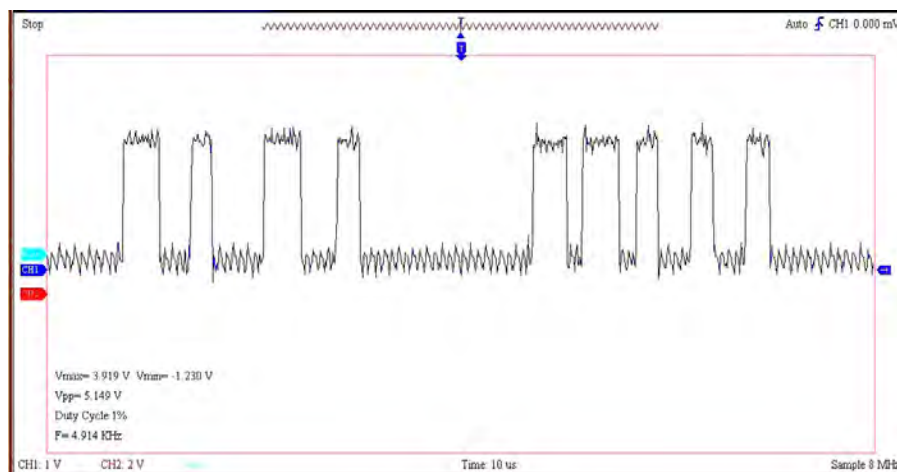


Figura 5.11.: Datos seriales recuperados

El PIC16F628A se encargará de la decodificación y conversión de serie a paralelo de la señal digital (programado en *assembler*). El DAC0808 procesará 8 bits de los 10 enviados, se encargará de la retención de la señal y pasará a un filtro pasa banda para luego obtener nuestra señal de audio. La figura 5.12 muestra el esquema de la conversión digital a analógica.

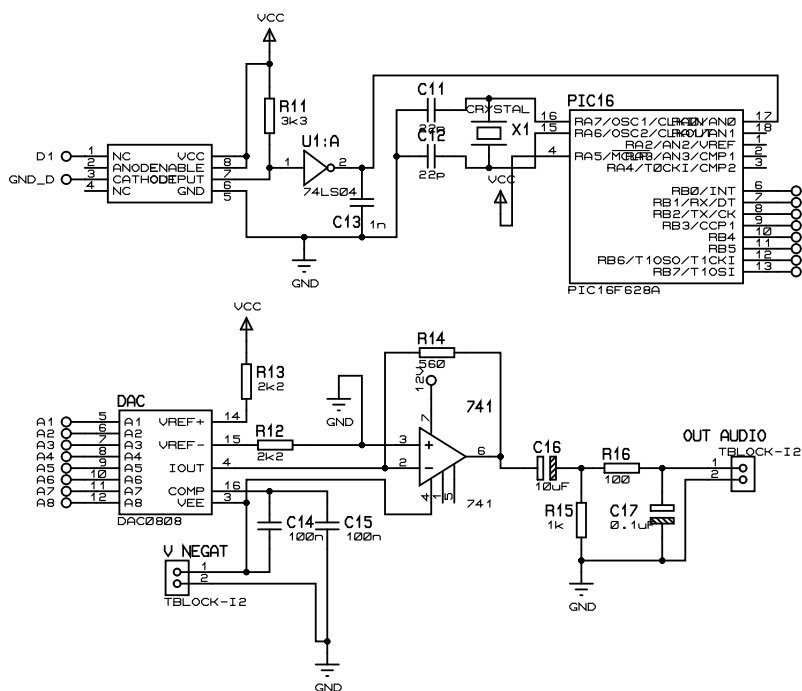


Figura 5.12.: Esquemático de la conversión de la señal serie recibida a analógica.

5.1.6. Transceptor implementado

La figura 5.13 muestra el transmisor implementado. Se observa una fuente de audio (*source*) que va conectado a un amplificador (OPAMP - *operational amplifier*), esta señal amplificada ingresa a la etapa de digitalización y al resto de etapas descritas en el capítulo 4.

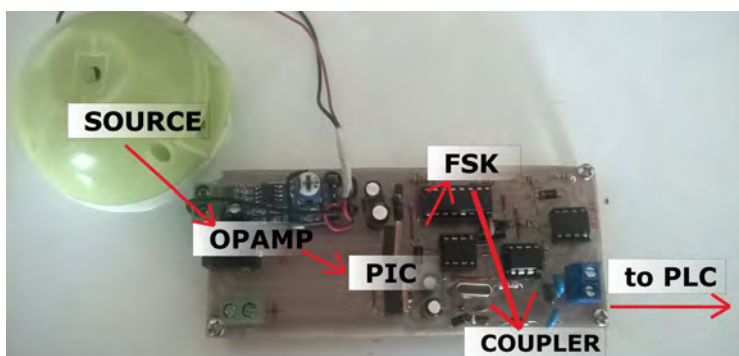


Figura 5.13.: Transmisor implementado.

5.1 Transceptor

La figura 5.14 muestra el receptor implementado, se observa nuevamente un OPAMP a la salida del DAC, para amplificar la señal recuperada y un parlante para escuchar esta señal de audio enviada del transmisor. Para el receptor se utilizaron dos fuentes adicionales de voltaje necesarias para la configuración del DAC. El PCB (*Printed Circuit Board*) para el transmisor y el receptor fueron implementados en fibra de vidrio.

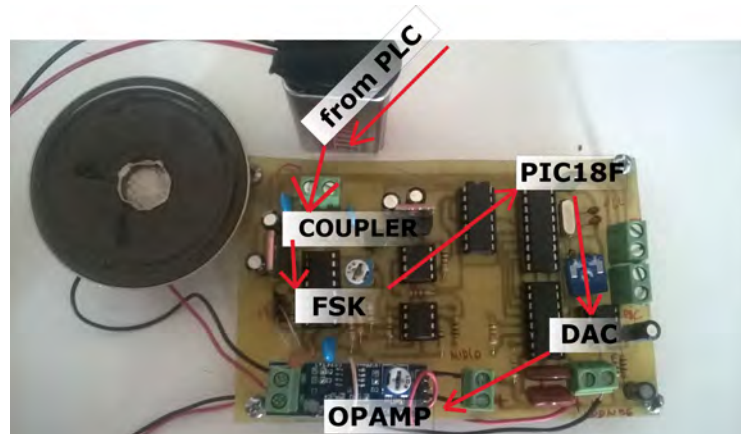


Figura 5.14.: Receptor implementado.

La figura 5.15 muestra la señal de audio original que fue enviada por el transmisor, y la señal de audio recuperada que atraviesa el canal PLC. En esta figura se ha introducido un desplazamiento (*offset*) vertical para facilitar la comparación y observar que el audio recuperado es similar al original.

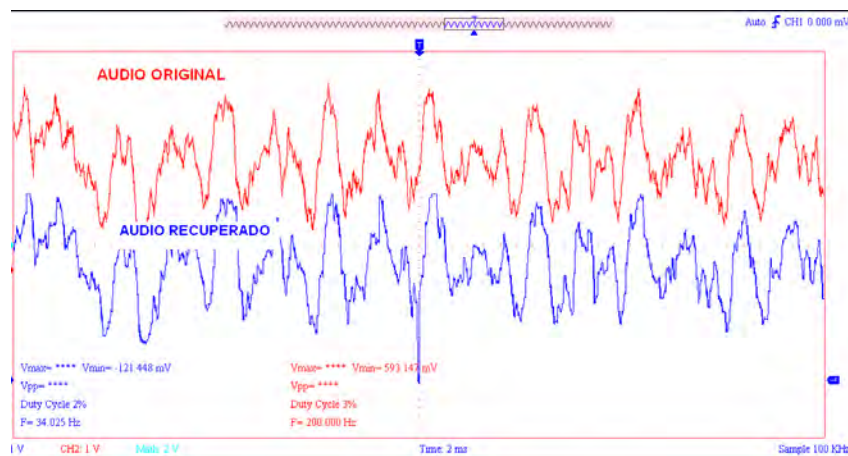


Figura 5.15.: Señales de audio transmitida y recibida.

5.2. Costo del prototipo

El cuadro 5.1 muestra el costo del transceptor (componentes), detallando las etapas implementadas, se obtuvo un costo menor a \$13.00. Este cuadro no considera los costos de diseño del transceptor, ni de la construcción de placas impresas. Los productos comerciales requieren de un empaque, dichos costos tampoco se han considerado en este cuadro. A pesar de estas diferencias se debe resaltar que los productos comerciales utilizan producción en masa, lo cual abarata sus costos de fabricación. Además, se considera que el diseño que se ha realizado no es complejo y por tanto implementable en algunas horas hombre de un técnico electrónico. Finalmente estos costos se pueden reducir utilizando componentes SMD (*Surface Mount Device*) y en compras por mayores cantidades.

Cuadro 5.1.: Costo de implementación del transceptor.

Etapas	Dispositivo	Precio (\$)
Digitalización de la señal	PIC12F675	0.5
	LM358	0.1
	Optoacoplador 6N137	0.22
	Resistencias, regulador de voltaje, capacitores.	1
Modulación / demodulación FSK	PLL CD74HC4046A (x2)	2.2
	Comparador LM311	0.2
	Compuerta NOT 74LS08	0.2
	Resistencias, regulador de voltaje, capacitores (x2).	1.1
Recuperación de la señal de audio	PIC16f628a	1.2
	DAC0808	1.0
	Op amp LM741	0.12
	Resistencias, regulador de voltaje, capacitores.	1.2
Acoplador	Capacitores y resistencias	3.7
	TOTAL	12.74

6. Conclusiones y discusiones

6.1. Conclusiones

- Un estudio adecuado de la red PL permite elegir los componentes electrónicos adecuados para diseñar, implementar y validar un transceptor PLC a bajo costo. La modulación FSK se ha implementado a un bajo costo. Permitió enviar audio de manera digital con una transferencia efectiva de 200 Kbps. Esto demuestra que es posible enviar una cantidad de datos superior a las implementadas en *Narrowband* y sin hacer uso de OFDM. También esta tasa de transferencia efectiva puede mejorar con el uso de microcontroladores más veloces pero con un incremento del costo.
- La red PL presenta una variedad de ruidos e interferencias del medio al que está sometido: Interferencia ingresada por dispositivos conectados a esta red y fuentes de ruido de banda angosta. Estas redes PL son variables en el tiempo y varían de acuerdo a la topología de la red PL.
- Este trabajo caracteriza la influencia de diferentes tipos de ruido que afectan el canal PLC y de las bandas útiles para transmitir datos través de este canal.
- El acoplador diseñado como un filtro pasa alto (ideal) al formar parte del canal junto con la red eléctrica, presenta un comportamiento del canal como un filtro pasa banda limitando el ancho de banda para la comunicación.

6.2. Discusiones y trabajos futuros

- La importancia del acoplamiento en una red PL: Este acoplamiento debe estar diseñado para captar el mayor ancho de banda posible según nuestro interés de trabajo. Es posible realizar trabajos a futuro en este tema tan complejo y delicado para maximizar la eficiencia de una transmisión de datos sobre la red PL.
- La atenuación del canal PLC es directamente proporcional a la distancia que existe entre el transmisor y receptor, por lo tanto para incrementar la distancia se debe incrementar la potencia. Esto podría resolverse utilizando un amplificador de potencia a la salida del PLL (antes del acoplador).
- En la red PL existe un gran ancho de banda disponible que se podría utilizar para incrementar la tasa de transferencia de datos. En este trabajo se ha

hecho uso de 1.4 MHz de ancho de banda, transmitiéndose audio digital a 200 Kbps. Por el teorema de Nyquist, la velocidad máxima de transmisión en bits por segundo para un canal sin ruido y con dos niveles de voltaje es: $C = 2 * B$, donde: C = capacidad de canal (bps) y B = ancho de banda (Hz). Tendríamos una transmisión máxima de 2.8 Mbps (idealmente), esto nos abre las puertas a seguir desarrollando PLC en base a este trabajo. Un ejemplo, al cambiar el microcontrolador PIC12F675 por el PIC18f4550 se podría obtener más del doble de la velocidad alcanzada en los resultados de este trabajo con un costo adicional de \$2 dólares. La adquisición de componentes en SMD y al por mayor reducirían el costo del producto final. También un cambio de modulación (modulación M-ari FSK) y el desarrollo de mejores acopladores mejorarían la capacidad real del canal para su aprovechamiento.

- Finalmente se puede tomar los resultados obtenidos de este trabajo para abordar temas como el acceso al medio u otras modulaciones como la misma OFDM o sus variantes que permitan compararlas para medir su inmunidad al ruido presente en un canal tan hostil como PLC.

Reconocimientos

A Dios fuente de toda sabiduría, a mi familia por el apoyo constante e incondicional y a mi asesor Efraín Zenteno por compartir sus conocimientos y experiencia para alcanzar el objetivo de este trabajo.

A. Anexo

A.1. Programa: Digitalización del audio con el PIC 12F675

;En el presente programa, modificar la instrucción NOP por la cantidad

;de veces que se indica entre paréntesis.

;Ejm. NOP(x3) =

; NOP

; NOP

; NOP

PROCESSOR 12F675 RADIX DEC EXPAND

list p=12f675 #include "p12f675.inc"

__CONFIG __CPD__OFF & __CP__OFF & __BODEN__ON & __MCLRE__OFF & __PWRTE__ON
& __WDT__OFF & __HS__OSC

#define LED GPIO,2 ;

V_w_temp EQU 0x20 ;

V_status_temp EQU 0x21 ;

r3 EQU 0x29

BAJO EQU 0x30

ALTO EQU 0x31

,*****

ORG 0x000

goto START

,*****

ORG 0x004

,*****

BANCO0 MACRO

BCF STATUS,RP0

BCF STATUS,RP1

ENDM

BANCO1 MACRO

BSF STATUS,RP0

```
BCF STATUS,RP1
ENDM
START
BANCO0
movlw b'00000000'
movwf ALTO
movwf BAJO
movlw 0x07
movwf CMCON
BANCO1
movlw B'00100001'
movwf ANSEL
movlw B'00111011'
movwf TRISIO
movlw B'10001000'
BANCO0
movlw B'10000001'
movwf ADCON0
clrf TMR0
movlw B'00000000'
movwf INTCON
INICIO
BSF ADCON0,GO ; Comenzamos a tomar el dato de la entrada analógica
ESPERA BTFSC ADCON0,GO
GOTO ESPERA
BANCO1
MOVF ADRESL,0
MOVWF BAJO
BANCO0
MOVF ADRESH,0
MOVWF ALTO
CABECERA_DE_INICIO
,*****
BSF GPIO,2
CALL Retardo_4micros
BCF GPIO,2
```

```
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
N0
BTFSC BAJO,0
GOTO N0_ON
GOTO N0_OFF
N0_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N1
N0_OFF BCF GPIO,2
NOP
NOP
N1
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC BAJO,1
GOTO N1_ON
GOTO N1_OFF
N1_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N2
N1_OFF BCF GPIO,2
NOP
NOP
N2
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC BAJO,2
GOTO N2_ON
GOTO N2_OFF
N2_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N3
```

```

N2_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
N3
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC BAJO,3
GOTO N3_ON
GOTO N3_OFF
N3_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N4
N3_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
N4
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC BAJO,4
GOTO N4_ON
GOTO N4_OFF
N4_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N5
N4_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
N5
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC BAJO,5
GOTO N5_ON
GOTO N5_OFF
N5_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N6

```

```
N5_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
N6
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC BAJO,6
GOTO N6_ON
GOTO N6_OFF
N6_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N7
N6_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
N7
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC BAJO,7
GOTO N7_ON
GOTO N7_OFF
N7_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N8
N7_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
N8
,*****
,
NOP (x4)
,*****
,
BTFSC ALTO,0
GOTO N8_ON
GOTO N8_OFF
N8_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO N9
```

```
N8_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
N9
;*****
;
NOP (x4)
;*****
;
BTFSC ALTO,1
GOTO N9_ON
GOTO N9_OFF
N9_ON NOP
BSF GPIO,2
GOTO FIN
N9_OFF BCF GPIO,2
NOP (x2)
FIN
NOP (x8)
BSF GPIO,2
BCF GPIO,2
BSF GPIO,2
BCF GPIO,2
GOTO INICIO
;*****
;
Retardo_4micros
movlw 0x05
movwf r3
Retardo_4micros_0
decfsz r3, f
goto Retardo_4micros_0
return
END
```

A.2. Programa: Conversión serie-paralelo con el PIC16F628A

```

processor 16f628A
include <p16f628A.inc>

__CONFIG_CP_OFF & _DATA_CP_OFF & _LVP_OFF & _BOREN_OFF & _MCLRE_ON
& _WDT_ON & _PWRTE_ON & _HS_OSC

W_Temp equ 0x0D ; Registro para guardar temporalmente W
STATUS_Temp equ 0x0E ; Registro para guardar temporalmete STATU
;Declaración de registros especiales
;STATUS EQU 0X03
;PORTB EQU 0X06
;TRISB EQU 0X86
;PORTA EQU 0X05
;TRISA EQU 0X85
;CMCON EQU 0X1F
;**** Inicio del Micro ****

Reset

org 0x00 ; Aquí comienza el micro.-
goto START ; Salto a inicio de mi programa.-
;**** Vector de Interrupción ****
org 0x04 ; Atiendo Interrupción.-
goto INTERR ; Si existe una interrupción iremos a la etiqueta INTERR
;; **** Programa Principal ****

org 0x05
;*****
START
BANCO0 MACRO
BCF STATUS,RP0
BCF STATUS,RP1
ENDM
BANCO1 MACRO
BSF STATUS,RP0
BCF STATUS,RP1
ENDM
;DECLARACION DE VARIABLES

```

```

BYTE EQU H'20'
#define B0 BYTE,0
#define B1 BYTE,1
#define B2 BYTE,2
#define B3 BYTE,3
#define B4 BYTE,4
#define B5 BYTE,5
#define B6 BYTE,6
#define B7 BYTE,7
;CONFIGURACION DE PUERTOS
BANCO1
MOVLW B'00000000'
MOVWF TRISB
BSF TRISA,0 ; entrada A0
BANCO0
MOVLW 0X07
MOVWF CMCON
CLRF PORTA
CLRF PORTB
CLRF BYTE
BCF INTCON,GIE ; Deshabilitamos interrupciones
;#####
INICIO
;*****
; goto VUELCO
;*****
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
OK ;CONFIRMAMOS CABECERA DE INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0

```

```

GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSS PORTA,0
GOTO INICIO
NOP (x5)
BTFSC PORTA,0
GOTO INICIO
BTFSC PORTA,0
GOTO INICIO
;vamos a obviar los dos primeros bits menos significativos para obtener solo 8 bits
,*****
NOP (x29)
,***** Código *****
B_0 BTFSS PORTA,0
GOTO OFF_0
ON_0 NOP
BSF B0
NOP
GOTO B_1 OFF_0 BCF B0
NOP
NOP
NOP
,*****
B_1
NOP (x4)
BTFSS PORTA,0
GOTO OFF_1
ON_1 NOP
BSF B1
NOP
GOTO B_2

```

OFF_1 BCF B1

NOP (x3)

B_2

NOP (x4)

BTFSS PORTA,0

GOTO OFF_2

ON_2 NOP

BSF B2

NOP

GOTO B_3

OFF_2 BCF B2

NOP (x3)

B_3

NOP (x4)

BTFSS PORTA,0

GOTO OFF_3

ON_3 NOP

BSF B3

NOP

GOTO B_4

OFF_3 BCF B3

NOP (x3)

B_4

NOP (x4)

BTFSS PORTA,0

GOTO OFF_4

ON_4 NOP

BSF B4

GOTO B_5

OFF_4 BCF B4

NOP (x2)

B_5

NOP (x4)

```
BTFSS PORTA,0
GOTO OFF_5
ON_5 NOP
BSF B5
NOP
GOTO B_6
OFF_5 BCF B5
NOP (x3)
,*****
,
B_6
NOP (x4)
BTFSS PORTA,0
GOTO OFF_6
ON_6 NOP
BSF B6
NOP
GOTO B_7
OFF_6 BCF B6
NOP (x3)
,*****
,
B_7
NOP (x4)
BTFSS PORTA,0
GOTO OFF_7
ON_7 NOP
BSF B7
GOTO VUELCO
OFF_7 BCF B7
GOTO VUELCO
,*****
,
VUELCO
MOVF BYTE,0
MOVWF PORTB
GOTO INICIO
INTERR
END
```

A.3. Esquemático del transmisor

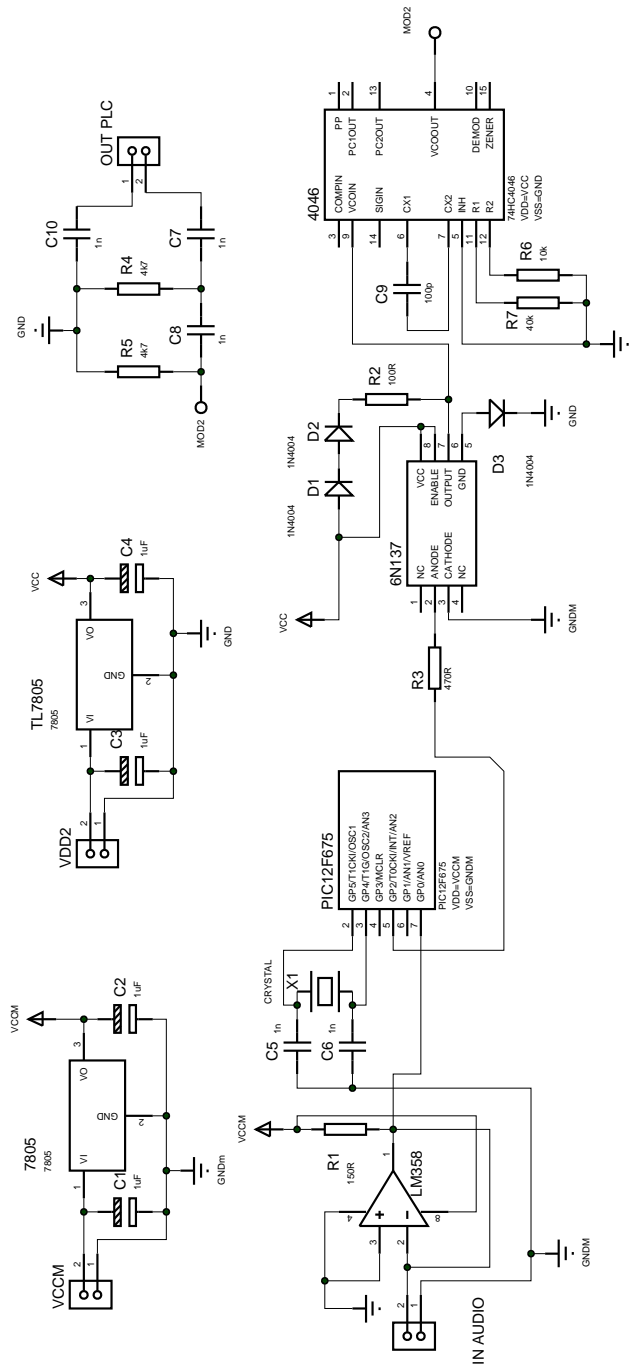


Figura A.1.: Esquema circuital del transmisor (modulador FSK).

A.4. Esquemáticos del receptor

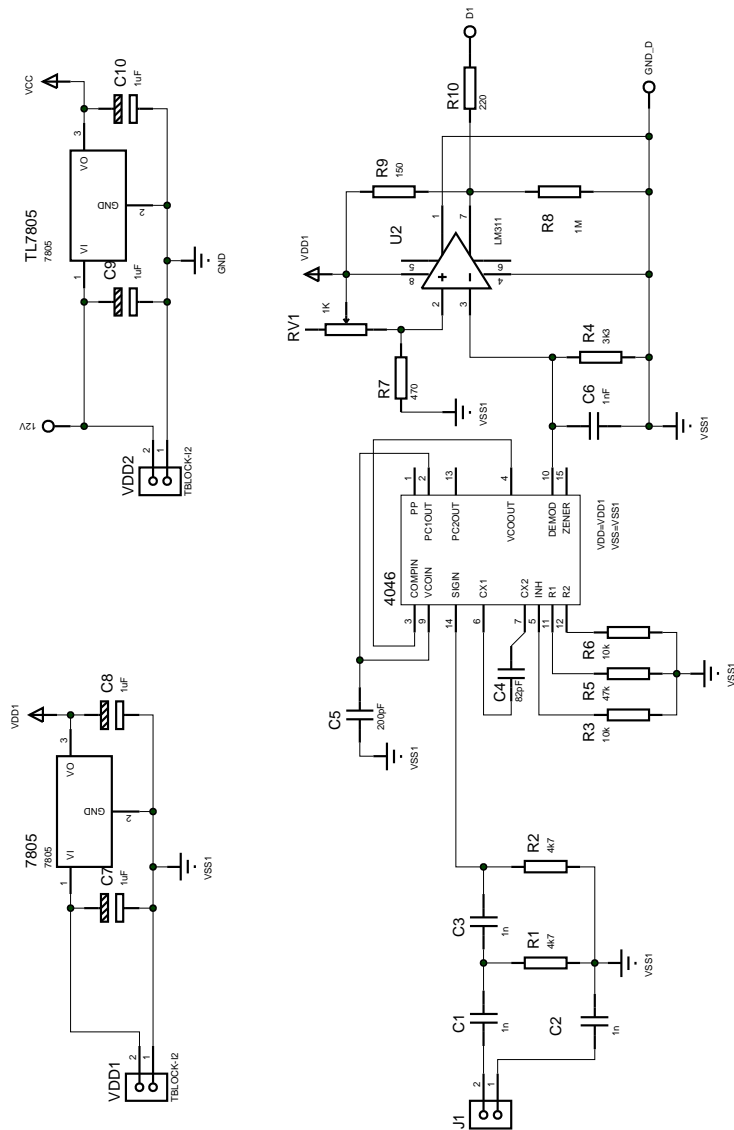
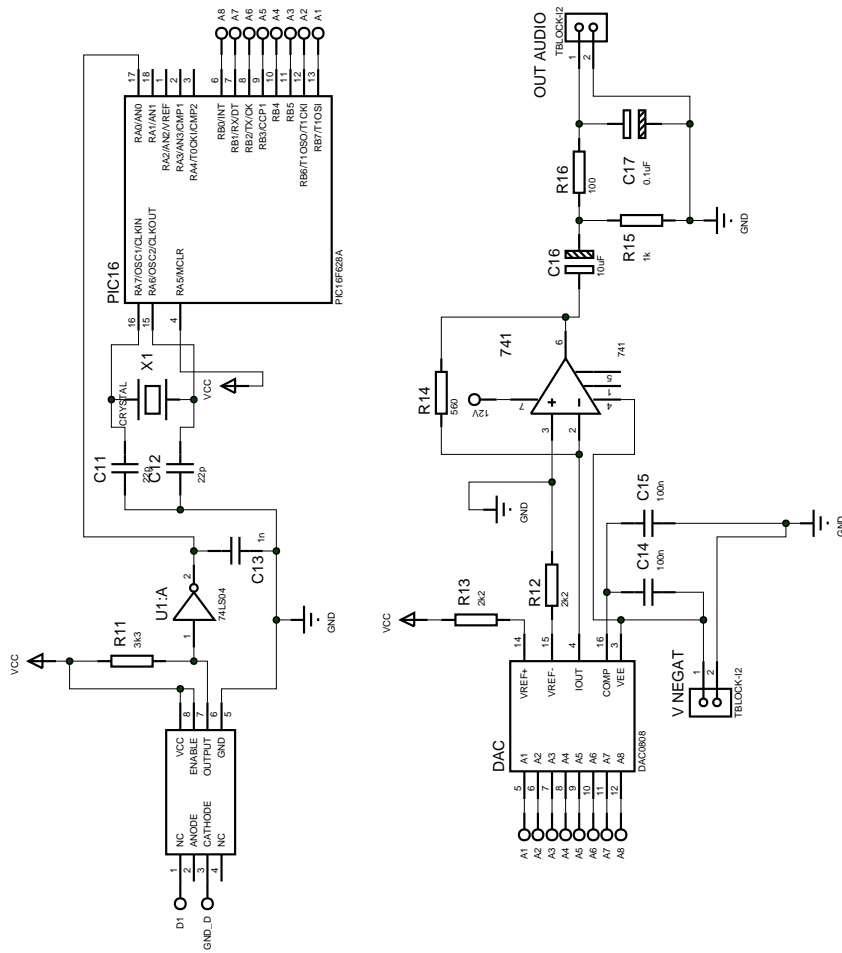


Figura A.2.: Esquema circuitual del receptor (demodulador FSK).



Bibliografía

- [1] K. M. Dostert, “Telecommunications over the power distribution grid - possibilities and limitations,” fecha de acceso 05 Nov. 2017. [Online]. Available: http://rhythmetadyne.com/wp-content/uploads/2016/07/Telecommunications-over-the-Power-Distribution-Grid-0563_001.pdf
- [2] S. Galli and O. Logvinov, “Recent developments in the standardization of power line communications within the IEEE,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 7, pp. 64–71, Jul. 2008.
- [3] N. Pavlidou, A. J. H. Vinck, J. Yazdani, and B. Honary, “Power line communications: state of the art and future trends,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 4, pp. 34–40, Apr. 2003.
- [4] J. N. Hendrik C. Ferreira, Lutz Lampe and T. G. Swart, *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications Over Power Lines*. JOHN WILEY & SONS INC, 2010.
- [5] V. Apaza-Mamani and E. Zenteno-Bolaños, “High-speed audio communications in domestic power line channels,” in *Proc. Electrical Engineering and Computing (INTERCON) 2017 IEEE XXIV Int. Conf. Electronics*, Aug. 2017, pp. 1–4.
- [6] H. Nosato, Y. Kasai, E. Takahashi, and M. Murakawa, “A very low-cost low-frequency PLC system based on DS-CDMA for DC power lines,” in *Proc. 16th IEEE Int Power Line Communications and Its Applications (ISPLC) Symp*, Mar. 2012, pp. 398–403.
- [7] Coolbox, “Kit adaptador nano powerline av200,” fecha de acceso 05 Nov. 2017. [Online]. Available: <https://www.coolbox.pe/adaptadores/4151-tp-link-kit-adaptador-nano-powerline-av200.html>
- [8] Aliexpress, “Power line Mini Adapter Extender 200mbps wired,” fecha de acceso 30 Sep. 2016. [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com/item/Tenda-P200-Pair-Power-line-Mini-Adapter-Extender-No-Wiring-No-Drilling-/200mbps-wired-connection-Chinese/1352173930.html?spm=2114.10010108.1000023.8.6e5eb1a8BZYKqR>
- [9] Amazon, “Linksys plek500 homeplug av2 powerline kit,” fecha de acceso 05 Nov. 2017. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Linksys-PLEK500-Homeplug-AV2-Powerline/dp/B00HRO2CH6>
- [10] MINEM, “Código nacional de electricidad,” fecha de acceso 30 Sep. 2016. [Online]. Available: <http://intranet2.minem.gob.pe/web/cafae/Pdfs/CNE.PDF>

-
- [11] MTC, “Plan nacional de atribución de frecuencias (pnaf),” fecha de acceso 30 Sep. 2016. [Online]. Available: https://www.mtc.gob.pe/comunicaciones/autorizaciones/servicios_privados/documentos/pnaf_act_feb08.pdf
- [12] W. Tomasi, *Electronic Communications Systems*. Reading, MA: PRENTICE HALL, 2001.
- [13] N. Sagar, “Powerline communications systems: Overview and analysis,” Master’s thesis, Program in Electrical and Computer Engineering - New Brunswick, New Jersey, 2011.
- [14] K. H. Zuberi, “Powerline carrier (plc) communication systems master of science in internetworking,” Master’s thesis, Department of Microelectronics and Information Technology, IMIT Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Sweden, 2003.
- [15] M. Zimmermann and K. Dostert, “Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 1, pp. 249–258, Feb. 2002.
- [16] L. D. Bert, P. Caldera, D. Schwingshackl, and A. M. Tonello, “On noise modeling for power line communications,” in *Proc. IEEE Int Power Line Communications and Its Applications (ISPLC) Symp*, Apr. 2011, pp. 283–288.
- [17] H. Gassara, F. Rouissi, and A. Ghazel, “Statistical characterization of the indoor low-voltage narrowband power line communication channel,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 1, pp. 123–131, Feb. 2014.
- [18] M. D. Piante and A. M. Tonello, “Characteristics of the PLC channel: Reciprocity, symmetry and port decoupling for impedance matching,” in *Proc. Int. Symp. Power Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Mar. 2016, pp. 93–97.
- [19] M. Nassar, K. Gulati, Y. Mortazavi, and B. L. Evans, “Statistical modeling of asynchronous impulsive noise in powerline communication networks,” in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2011)*, Dec. 2011, pp. 1–6.
- [20] M. Gotz, M. Rapp, and K. Dostert, “Power line channel characteristics and their effect on communication system design,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 4, pp. 78–86, Apr. 2004.
- [21] M. Z. I. Velásquez and C. Medina, “Redes eléctricas de interiores como canal de comunicación,” *Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá*, 2014.
- [22] G. S. Sánchez, “Medición del ruido en la línea de transmisión eléctrica generado por electrodomésticos, para aplicaciones de plc,” Master’s thesis, Departamento de computación, electrónica y mecatrónica -Universidad de las Américas Puebla, 2009.

- [23] G. Bumiller, L. Lampe, and H. Hrasnica, "Power line communication networks for large-scale control and automation systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 4, pp. 106–113, 2010.
- [24] T. S. Steven Gorshe, Arvind R. Raghavan, *Broadband Access: Wireline and Wireless - Alternatives for Internet Services*. JOHN WILEY & SONS INC, 2014.
- [25] L. Berger, A. Schwager, P. Pagani, and D. Schneider, "MIMO power line communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 106–124, 2015.
- [26] HomePlug, "Homeplug av2 technology," fecha de acceso 30 Sep. 2016. [Online]. Available: http://www.homeplug.org/media/filer_public/2c/32/2c327fc8-25bb-409e-abf7-c398534c24dc/homeplug_av2_whitepaper_130909.pdf
- [27] B. Goffart, P. Desneux, T. Verbeure, P. Gonthier, and R. Cermeno, "An s-FSK power line carrier modem for utility amr applications," in *Proc. Ninth Int Metering and Tariffs for Energy Supply Conf. (Conf. Publ. No. 462)*, Aug. 1999, pp. 81–85.
- [28] R. Cappelletti and A. Baschiroto, "A versatile low-power power line FSK transceiver," in *Proc. CICC Custom Integrated Circuits Conf the IEEE 2000*, 2000, pp. 323–326.
- [29] F. J. Sánchez-Pacheco, P. J. Sotorrio-Ruiz, J. R. Heredia-Larrubia, F. Pérez-Hidalgo, and M. S. de Cardona, "Low cost DC lines PLC based photovoltaic plants parameters smart monitoring communications and control module," in *Proc. Int Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG) Conf*, May 2011, pp. 1–6.
- [30] T. Instruments, "Implementation of fsk modulation and demodulation using cd74hc4046a," SLAA618 - November, Tech. Rep., 2013.
- [31] E. I. E. Rivas, "Estudio del modelo del canal de comunicación de redes plc domésticas considerando el caso no uniforme," Master's thesis, Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica, Sección de estudios de posgrado e investigación, instituto politécnico nacional, México DF, 2011.

