

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PLC (POWER LINE COMMUNICATIONS) PARA EL CONTROL DE CARGAS ELÉCTRICAS NO CRÍTICAS.

Eddie Alejandro Porras Niño
Jose Luis Camargo Acevedo

Universidad industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas
Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Bucaramanga

2013

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PLC (POWER LINE COMMUNICATIONS) PARA EL CONTROL DE CARGAS ELÉCTRICAS NO CRÍTICAS.

Eddie Alejandro Porras Niño

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electronico

Jose Luis Camargo Acevedo

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electronico

Director

PhD. Rodolfo Villamizar Mejía

Codirector

Gabriel Ordoñez

Universidad industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2013

DEDICATORIA

A Aquel cuya muerte en la Cruz me trajo vida y un nuevo amanecer para hacer Su voluntad.

Jose L. Camargo

A Jehová mi Dios, por haberme ayudado poderosamente en el día de mi miseria y fracaso, y haberme regalado este logro.

Eddie A. Porras

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque me dio el aliento a través de su Espíritu Santo y su Palabra, y su misericordia día a día. A mi madre Edilia Acevedo, porque su esfuerzo y abnegación en todos estos años produjeron en mí un ejemplo a seguir sabiendo que la felicidad no es un fin, es un camino. A mis hermanos Edwin Rolando y Cinar Eduardo por darme ánimo en cada etapa de mi carrera. A mi novia y amor, mi flaquita Sandra M. Gallego por sus consejos y cariño en todo momento. A mi abuelita María de Jesús Garavito por su sonrisa en días buenos y malos. A mi compañero de proyecto Eddie Alejandro Porras por la perseverancia en contra de las adversidades.

Jose L. Camargo

A mi abuelita Eloísa Mariño, que aunque ya no la tengo a mi lado tengo la tranquilidad que se encuentra escrita en el libro de la vida del Todopoderoso, mi abuelita por todo el amor que me brindó fue y es una gran fuente de ánimo en mi mente y corazón día a día.

A mi madre hermosa Luz Alba Niño, por su incondicional apoyo y sacrificio por sus hijos. A mi familia por la ayuda constante cuando los necesito.

Eddie A. Porras

Gracias damos en común a todos aquellos que nos ayudaron en el desarrollo del presente trabajo de grado, al profesor Rodolfo Villamizar Mejía por su paciencia y apoyo en cualquier momento que lo solicitamos, al profesor Glenn Hernández quien nos asesoró en muchas ocasiones y nos brindó su experiencia en el tema de PLC, al profesor Efrén Darío Acevedo en su asesoría de medios de transmisión, al profesor Gabriel Ordoñez por su apoyo, al profesor Jorge Hernando Ramón y Daniel Alexander Velasco por su paciencia, y de manera muy especial al personal que administra los laboratorios del edificio de Alta Tensión, a Jairo Pabón y Lilitiana Quiñonez a la que hicimos salir tarde en varias ocasiones por nuestra investigación.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	18
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
1. GENERALIDADES Y ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA POWER LINE COMMUNICATIONS	21
1.1 HISTORIA	21
1.2 ARQUITECTURA PLC	22
1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	24
1.4 ESTADO ACTUAL Y AVANCES	25
1.4.1 PLC en Colombia	25
1.5 REGLAMENTACIÓN	26
1.6 FUNCIONAMIENTO DE PLC	26
1.6.1 Capa física	27
1.6.1.1 Modulaciones empleadas en PLC	27
1.6.2 Capa de enlace	28
1.7 MEDIO DE TRANSMISIÓN	29
1.7.1 Modelos del medio de transmisión	30
1.7.2 Ruido	31
1.8 DEMODULACIÓN	33
1.9 PROTOCOLO X-10	33
1.10 SMART GRID	35
2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA TECNOLOGÍA PLC	37
2.1 Modelado de la línea de transmisión	38
2.2 Análisis de atenuación, frecuencia y distancia	42
2.2.1 Pruebas de transmisión y recepción con forma de onda rectangular	43
2.2.2 Pruebas de transmisión y recepción con forma de onda sinusoidal	47

2.3 Diseño del sistema de control PLC por modulación ASK y FSK	49
2.4 Implementación del Sistema de Control PLC por modulación ASK	52
2.4.1 Circuito Transmisor ASK	53
2.4.1.1 Fuente dual para transmisor ASK	53
2.4.1.2 Fuente de 5 Volts DC para la tarjeta Arduino UNO	54
2.4.2 Señal de control del transmisor ASK	54
2.4.3 Oscilador y amplificador	55
2.4.4 Acople a la red eléctrica	56
2.4.5 Demodulador ASK	57
2.4.5.1 Filtro pasa banda del demodulador ASK	60
2.4.5.2 Etapas de amplificación de demodulador ASK	60
2.4.5.3 Demodulador LM 567	61
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	66
REFERENCIAS	67
ANEXOS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema PLC de acceso	22
Figura 2. Tipos de acopladores, izquierda-capacitivo, derecha-inductivo	23
Figura 3. Modem de cabecera o Gateway	23
Figura 4. Esquema PLC Domiciliaria	23
Figura 5. Diagrama esquemático de un PLL	33
Figura 6. Trama de datos de protocolo X-10	34
Figura 7. Esquema de conexión interna del tablero trifásico	39
Figura 8. Montaje de equipos para prueba de reflectometría	40
Figura 9. Prueba de circuito abierto de reflectometría	40
Figura 10. Prueba de corto circuito de reflectometría	41
Figura 11. Prueba de cargas balanceadas de reflectometría	41
Figura 12. Señal de 60 Hz atenuada	42
Figura 13. Señal de salida del transmisor a 50KHz acoplada a la red y espectro	43
Figura 14. Señal de 50KHZ modulada en el receptor a 2 metros del transmisor y Espectro	44
Figura 15. Señal de 50KHZ modulada en el receptor a 6 metros del transmisor y espectro.	44
Figura 16. Señal de salida del transmisor a 150KHz acoplada a la red y espectro	45
Figura 17. Señal de 150KHZ modulada en el receptor a 2 metros del transmisor y espectro	45
Figura 18. Señal de 150KHZ modulada en el receptor a 6 metros del transmisor y espectro	46
Figura 19. Comparación del comportamiento de la señal de llegada a distintas frecuencias y distancias	46
Figura 20. Señal sinusoidal 500KHz en los bornes del receptor y espectro en Fourier	47
Figura 21. Señal sinusoidal 500KHz filtrada y espectro en Fourier	48
Figura 22. Señal sinusoidal 1MHz en los bornes del receptor y espectro en Fourier	48
Figura 23. Señal de la red eléctrica en los bornes del receptor	48

Figura 24. Señal en los bornes del receptor de forma de onda rectangular	49
Figura 25. Etapas del sistema de control	49
Figura 26. Señal de modulación sobre la señal de 60Hz	51
Figura 27. Señal ASK en el receptor	52
Figura 28. Circuito modulador ASK	53
Figura 29. Fuente dual para el oscilador	53
Figura 30. Tarjetas Arduino UNO (abajo) y Arduino Ethernet Shield	54
Figura 31. Interfaz para activar el transmisor desde una dirección IP	54
Figura 32. Interfaz del router CISCO DPC2425 para asignar dirección IP a la tarjeta Arduino Ethernet Shield	55
Figura 33 Señal sinusoidal generada en el oscilador	56
Figura 34 Etapa de acople a la red eléctrica del transmisor ASK	56
Figura 35. Señal ASK insertada en la red eléctrica	57
Figura 36. Circuito demodulador ASK	57
Figura 37. Red LC del demodulador ASK	58
Figura 38. Señal en los bornes del demodulador ASK	59
Figura 39. Filtro pasabanda del demodulador ASK	60
Figura 40. Señal de salida del filtro pasa banda	60
Figura 41. Etapa de amplificación del demodulador ASK	60
Figura 42. Señales de salida de las etapas de amplificación	61
Figura 43. Demodulador LM 567	62
Figura 44. Señal de salida del LM 567	62
Figura 45. Fenómeno de Jitter en el LM 567	62
Figura 46. Configuración para incremento de la sensibilidad	63
Figura 47. Montaje del transmisor con acceso con acceso a red LAN para la activación de cargas	63
Figura 48. Montaje del sistema receptor	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del tablero trifásico

39

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. ESQUEMAS DE MODULACION	69
ANEXO B. CODIGO PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA TARJETA ARDUINO ETHERNET	77
ANEXO C. ESTUDIO DEL EDIFICIO CENTIC Y COTIZACIÓN DE EQUIPOS PARA CONTROL CORINEX	79
ANEXO D. CODIGO PARA ENVIAR PULSOS POR MEDIO DE ARDUINO	81

RESUMEN

Título: Análisis e implementación de la tecnología PLC (Power Line Communications) para el control de cargas eléctricas no críticas.*

Autores: Camargo Acevedo Jose Luis, Porras Niño Eddie Alejandro**

Palabras claves: PLC, Modulación, Medio de transmisión, Demodulación, Procesamiento, Activación, Desactivación, interfaz.

Mediante el presente trabajo de grado se estudió la tecnología PLC a partir de la revisión bibliográfica del estado actual de la tecnología PLC como alternativa de conectividad para la transmisión de datos, teniendo en cuenta las variables de modulación, medios de transmisión y demodulación. Una vez revisadas las principales características de ésta tecnología, se procede a la caracterización del medio de transmisión mediante una prueba de reflectometría en un punto fijo para determinar el comportamiento de una señal en dicho medio y la máxima frecuencia a la que puede ser enviada.

Posteriormente se presentó un estudio de los tipos de onda rectangular y cuadrada en el cual se expone su comportamiento en el medio de transmisión, la distancia de alcance y frecuencias utilizadas y recomendadas para el posterior sistema de control por medio de tecnología PLC. Después se realizó un montaje de la tecnología teniendo en cuenta los tipos de modulación, los elementos que la conforman para su generación, adecuación, inserción, transporte, extracción, demodulación, procesamiento y por último la activación y desactivación de una carga no crítica mediante el acceso a una dirección IP, por medio de una interfaz en la que se puede enviar una orden de encendido constante como el comportamiento de un interruptor o de un solo pulso como el de un pulsador, que es usado para la activación y desactivación de una cerradura.

* Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Director PhD. Rodolfo Villamizar Mejía.

ABSTRACT

Title: Analysis and Implementation of Power Line Communication (PLC) Technology to non-critical Loads Control. *

Authors: Camargo Acevedo Jose Luis, Porras Niño Eddie Alejandro. **

Keywords: PLC, Modulation, Transmission Network, Demodulation, Processing, Activation, Deactivation, Jitter, Bandwidth and Latency.

In this work the PLC technology was studied from the bibliographical review of books and articles to set the current state of the PLC technology as an option to data transmission, considering subjects such as modulation, transmission network and demodulation. After being checked the main characteristics, was proceeded the characterization of the transmission network through the reflectometry test on a fixed point to set the behavior of a signal on this network and the maximum frequency to send any kind information.

Subsequently was shown an study about two kind of wave forms, rectangular and sinusoidal, exposing his behavior on the transmission environment, distance reached, range of frequency used and suitable to the system control by PLC technology. Later was set a circuit of this technology taking account of the different modulation's schemes, the elements that comprise, adequacy, insertion, carry, extraction, demodulation, processing and at least the activation and deactivation of non-critical load through the access of and IP address, by an interface that can send two kinds of orders depending of the load. The first order is similar to the behavior of one switch, and its used by loads who needs a steady activation like a bulb, fan or engine. The second order is similar to the behavior of one button and its used to control loads who requires just one order, like a door lock

* Work of Degree

** Faculty of Physicist Mechanical Engineerings, School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineerings, Director, PhD: Rodolfo Villamizar Mejía.

INTRODUCCIÓN

La evolución en las tecnologías de la comunicación ha logrado que lo que décadas atrás parecía fantasía, hoy sea una realidad cotidiana y a la vez difícil de desprendernos de ella. En el campo de las telecomunicaciones se evidencia un gran crecimiento e innovación tecnológica, desde el desprendimiento del cable telefónico para dar origen a la telefonía móvil, rápidamente se desarrollaron equipos más compactos y con más prestaciones, que desplazaron la telefonía fija que ahora es un servicio más económico y de acceso ilimitado.

Con base en los avances en telecomunicaciones, se ha visto la necesidad de estar siempre en contacto con la sociedad y el medio que lo rodea, incluyendo el hogar y el sitio de trabajo, aprovechando los medios disponibles para acceder a servicios de internet y control de dispositivos con la menor complejidad de instalación y que ofrezca un servicio confiable y accesible en cualquier punto sin que se pierda la calidad del servicio. Es ahí donde se determinó que no hay una instalación más extendida sobre la cual pueda servir como punto de acceso en cualquier lugar como las líneas de energía eléctrica, surgiendo la tecnología Power Line Communications; sabiendo de antemano que han sido construidas para transmitir energía eléctrica y es un medio hostil dado que muchas de estas instalaciones datan de varias décadas y diversos dispositivos que se conectan a ella generan ruidos que son inyectados en el tendido eléctrico. Dados estos problemas se dio paso a nuevos métodos de inserción de otra señal en la red eléctrica para otros fines y un continuo avance en los servicios que puede prestar ésta nueva señal presente.

En este trabajo de grado se expone la necesidad de implementar esta tecnología de comunicación en el campus de la Universidad Industrial de Santander, como tecnología complementaria a otras ya instaladas. Es por esto que se propuso el presente proyecto de grado titulado “Análisis e Implementación de la Tecnología PLC para el Control de Cargas no Críticas” como un proyecto de investigación de la tecnología en las etapas que lo conforman y de implementación de un sistema diseñado para cumplir el objetivo de activar y desactivar cargas, en primera instancia no críticas, ofreciendo sus ventajas debido a la no necesidad de nuevo cableado o dispositivos complementarios y siendo compatible con otras tecnologías ya presentes. Así mismo el sistema presentado en este trabajo fue diseñado con una interfaz accesible desde una dirección IP para la activación de las cargas.

El desarrollo del trabajo se divide en tres partes: la primera se refiere al estudio bibliográfico que incluye su funcionamiento, modulaciones, ventajas, desventajas y el estado actual de la tecnología PLC. En la segunda parte se expone un estudio para la implementación de un sistema de control de cargas y las pruebas de laboratorio en cada una de sus etapas de implementación y en la tercera parte se exponen las conclusiones y recomendaciones

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

OBJETIVO GENERAL

Estudiar y evaluar la tecnología *PLC* (Power Line Communications) como tecnología de comunicación complementaria en el contexto de una *Smart Grid* UIS, a partir de su implementación en el control de una carga específica no crítica de una edificación de la UIS.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la tecnología PLC en todas las etapas propias de su implementación, tales como: modulación, medio de transmisión y demodulación.
- Caracterizar el medio de transmisión para el control de una carga eléctrica no crítica dentro de una edificación de la UIS por medio de la tecnología PLC.
- Evaluar la adaptabilidad de PLC como tecnología de comunicación de última milla.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Ante el creciente interés por el manejo eficiente de la energía, ya que éste representa un beneficio tanto económico como de orden ecológico, se ha venido implementando en diversos entornos, sistemas que permitan monitorizar el consumo de energía en tiempo real, para determinar las horas de mayor consumo y la determinación de acciones que ayuden al decremento de dicho consumo de energía. En este orden de ideas, se ha venido hablando últimamente a nivel mundial de crear redes que abarquen la mayor cantidad de edificaciones, tales como barrios o ciudades enteras que integren de manera inteligente las acciones de los usuarios que se encuentren conectados a dicha red, tales como generadores, consumidores y aquellos que son ambas cosas a la vez, con el fin de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible que tiene por nombre Smart Grid [1].

Para poder ofrecer un suministro eléctrico eficiente es necesaria la activación y desactivación de ciertas cargas en determinadas horas del día en las que se aumenta el consumo de energía eléctrica, para asegurar un consumo constante. El problema de la activación y desactivación de las cargas eléctricas se ubica en el tramo de última milla, ya que se requiere el montaje de nueva infraestructura que abarque la carga a controlar.

En un ambiente típico de trabajo es común encontrar distintos tipos de infraestructura montada tanto para comunicaciones como para el servicio eléctrico y cada una de estas presenta ventajas y limitaciones. En el caso de las comunicaciones inalámbricas se presentan algunas falencias debido a las barreras físicas entre el transmisor y el receptor que se traduce en pérdida de la señal o en la necesidad de ubicar el receptor lo más cerca posible del transmisor.

En vista de las desventajas de los sistemas de comunicación inalámbrica y la necesidad de poder acceder a todas las cargas para poder controlarlas, se debe tener como alternativa el uso de una tecnología que aproveche un medio existente para transmitir datos, como lo es la red eléctrica, y que presente un alto grado de inmunidad a las interferencias de radio frecuencia tal como la tecnología PLC (Power Line Communications).

Dado que con la tecnología PLC se pueden enviar o recibir datos a través de la red eléctrica, es posible realizar un posterior control de cargas con fines de ahorro de energía eléctrica. Para poder realizar éste control, en el punto de acceso de cada carga se requiere de un equipo que reciba la señal de control proveniente del usuario y que ha viajado por el tendido eléctrico y se traduzca en una activación o desactivación de dicha carga.

Por tanto en este proyecto, se propuso como primera medida el estudio de una red eléctrica de un edificio dentro de la UIS, en el que se realizó la caracterización de la red eléctrica, con el fin de evaluar el funcionamiento de ésta tecnología, sin poner en riesgo los equipos conectados y examinar la viabilidad de su instalación a mayor escala, aprovechando sus ventajas y posibles adaptaciones con otras tecnologías de comunicación existentes que potencialmente podrían estar dentro del contexto de una futura Smart Grid como tramo de última milla.

1. GENERALIDADES Y ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA POWER LINE COMMUNICATIONS

En éste capítulo se exponen las principales características a tener en cuenta para el funcionamiento de la tecnología Power Line Communications desde una perspectiva global que abarque tanto sus inicios, modulación, transmisión y demodulación.

Desde que el hombre empezó a expandir sus dominios y ocupar grandes extensiones, siempre ha visto la necesidad de construir una infraestructura diseñada para llevar el suministro eléctrico a cada lugar donde éste habite, por lo que dicha infraestructura suele ser más robusta y de mayor alcance que la de otros servicios tales como los de comunicación. Aunque siempre se estimó que las líneas de transmisión eléctrica sólo servirían para tal fin, en las primeras décadas del siglo anterior se realizaron las primeras aplicaciones que involucraban el envío de datos por la red eléctrica aunque solo fue para la protección de algunos tramos de las líneas de tensión.

1.1 HISTORIA

La transmisión de datos por la red eléctrica en banda estrecha inició poco después de la expansión masiva del tendido eléctrico en Europa y en 1922 se implementaron los primeros sistemas de modulación en el rango de frecuencias de 15 a 500 KHz para sistemas de telemetría y en 1970 la empresa Tokyo Electric Power Co realizó experimentos que reportaron la transmisión bidireccional exitosa de paquetes de bits y uno de los primeros desarrollos comerciales fueron unas alarmas para el cuidado de bebés dentro de una casa alrededor de 1940 [2].

De ahí en adelante, con el surgimiento de algunas tecnologías de comunicación, incluida ADSL, que utiliza el cableado telefónico para la transmisión de datos, no se prestó mayor atención a PLC debido a sus problemas inherentes al uso de la red eléctrica, hasta que en 1997 se realizó en el Reino Unido una prueba con la que se suministró internet a unos 200 hogares en el tramo de baja tensión, lo que despertó el interés por parte de empresas como *Siemens* y *Ascom* para continuar el desarrollo de aplicaciones en PLC, pero dos años más tarde detuvieron los avances por motivos de la regulación y lento despegue. Las primeras aplicaciones de PLC estaban limitadas por un ancho de banda muy estrecho, cuyas aplicaciones fueron la localización de averías y lectura automática de contadores.

Posteriormente se realizaron avances significativos en la transmisión de datos llegando a los 3Mbps y el desarrollo de nuevas aplicaciones bidireccionales lo que despertó nuevamente el interés en la producción de dispositivos para la tecnología PLC, aunque con un nuevo inconveniente y fue la incompatibilidad

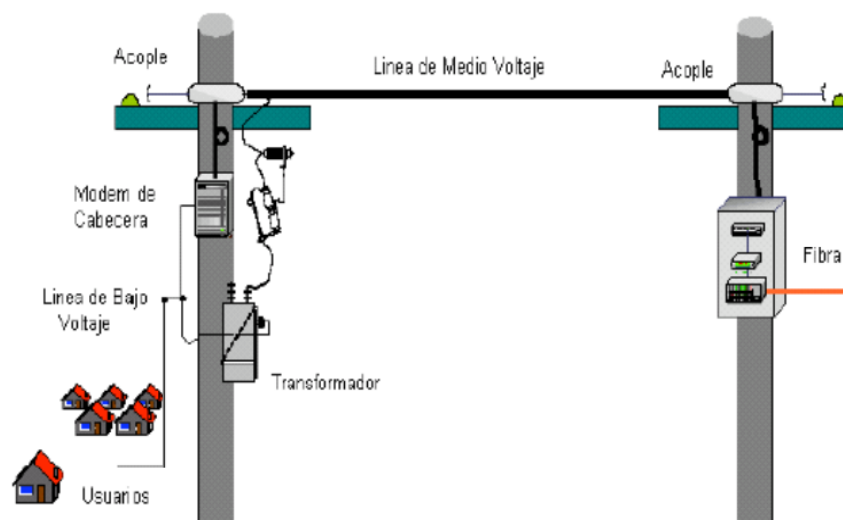
entre distintas marcas y otro tipo de dispositivos de otra tecnología por lo que surgieron nuevos estándares de comunicación tales como *IEEE*, *CENELEC*, *ITU* y *HomePlug*, siendo éste último el de mayor aceptación. Una vez normalizados los equipos, las empresas han puesto su esfuerzo en desarrollar dispositivos con mayores prestaciones, adaptables, confiables y económicos, como consecuencia de la competencia entre las mismas empresas, siendo el consumidor el más beneficiado al fin y al cabo.

1.2 ARQUITECTURA PLC

PLC de acceso

También conocido como *last mile*, sistema *outdoor* o última milla, comprende todos los equipos necesarios para poder suministrar el servicio a través de las líneas de media y baja tensión desde la subestación eléctrica donde se inyecta la señal a la línea de distribución hasta la acometida externa de los hogares, es decir el medidor de energía.

Figura 1. Esquema PLC de acceso



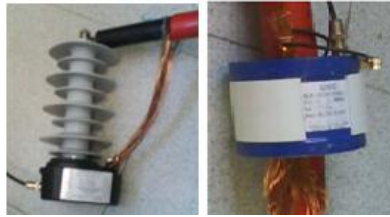
Fuente: [3]

Los componentes utilizados en esta topología son los siguientes:

Acoplador: Es el encargado de inyectar o extraer la señal; existen dos tipos de acopladores:

- **Capacitivo:** Pueden conectarse directamente a la línea de transmisión, generalmente son de alrededor de $0,1\mu\text{F}$ y de varios Kilo volts, lo que asegura un aislamiento y primer filtrado de la onda de tensión.
- **Inductivo:** Realiza un acople magnético, aprovechando el campo que se genera alrededor de la línea de transmisión.

Figura 2. Tipos de acopladores, izquierda-capacitivo, derecha-inductivo



Fuente: [4]

Modem de cabecera: Inyecta los datos a la red de media o baja tensión y también determina la frecuencia a la cual se inyectaran los datos.

Figura 3. Modem de cabecera o Gateway



Fuente: [5]

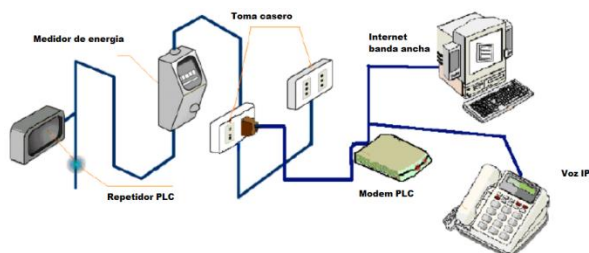
Repetidor: Extrae la señal proveniente de la red eléctrica que ha sido atenuada por largas distancias, y le asigna una nueva frecuencia de transmisión para evitar interferencias. La mayoría de módems PLC pueden ser usados como repetidores cambiando su configuración.

Adaptador PLC: Extrae la señal de datos y la envía al modem del usuario.

PLC domiciliaria

También conocida como *last inch*, sistema *indoor* o última pulgada, comprende todos los equipos utilizados después del contador de energía dentro de una residencia. El desarrollo tecnológico en este tramo incluye la adaptabilidad de PLC con otras tecnologías, aumentando así la interconexión y convirtiendo cada toma de la red eléctrica en un punto de acceso a internet banda ancha y otros servicios.

Figura 4. Esquema PLC Domiciliaria



Fuente: [3]

1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Ventajas

- Utiliza una infraestructura ya desplegada, convirtiendo cada toma en un acceso a la red, por lo que no depende la intensidad de la señal del distanciamiento del modem.
- El PLC de banda ancha es la red más extensa del mundo y alcanza actualmente velocidades de 45 Mbps, y llega a lugares donde no hay otro tipo de tecnología ni infraestructura disponible.
- La prestación del servicio es de 24 horas igual que el servicio eléctrico.
- Bajo costo de mantenimiento y operación.
- Permite ofrecer a las empresas prestadoras nuevos agregados tales como automatización, gestión de energía, telefonía VoIP, juegos en línea, redes LAN entre otros.
- Adaptabilidad con otras tecnologías existentes.
- La conexión es permanente por lo que las cuotas de conexión se fijan en un modelo de tarifa plana.
- No depende del crecimiento de un servicio particular en una zona de la ciudad como con otras tecnologías, debido a que ya está presente el medio de transmisión.

Desventajas

- Problemas por el mal estado de las líneas eléctricas, especialmente en residencias antiguas.
- El uso de repetidores por lo menos cada 100 metros por problemas de atenuación de la señal.
- Emisión de radiaciones parasitas pueden afectar sistemas de radiocomunicaciones cercanos, aunque alcanza un máximo de potencia de 1mW que es muy inferior a los 2W que causa la telefonía móvil.
- La señal de PLC puede ser distorsionada por electrodomésticos de uso común tales como licuadoras, taladros, y otros sobre todo que usan motores.
- Falta de estandarización, ya que varias empresas en el mundo están desarrollando equipos sin ningún estándar en común.

1.4 ESTADO ACTUAL Y AVANCES

Desde los primeros avances y aplicaciones en PLC, las compañías eléctricas así como las compañías de telecomunicaciones han visto en esta tecnología un mercado potencial, en algunos casos trabajando asociadamente y en otros, solo de las compañías eléctricas para poder sacar el mayor provecho a sus redes eléctricas. Entre las iniciativas más destacadas, se encuentra la empresa *ASCOM*, quien en julio del año 2000 realizó pruebas en Barcelona con 50 clientes conectados para proveer servicios de internet por la red eléctrica alcanzando velocidades de 3 Mbps; paralelamente la empresa *DS2* alcanzó velocidades de 12 Mbps en la ciudad de Sevilla-España.

En Alemania, la compañía eléctrica *RWE* comenzó a ofrecer servicios de internet por la red eléctrica con tecnología *ASCOM*, y para poder llevarla a cabo es preciso un pequeño modem; previo a éste avance se realizaron pruebas en 200 hogares y tras la aprobación por parte del gobierno alemán de la comercialización de éste tipo de dispositivos, se continúa el auge de PLC.

En Argentina, la empresa *Electrité* realizó pruebas en una escuela de Buenos Aires para suministrar internet por la red eléctrica en un proyecto denominado “*e-eléctrica*”. En muchas partes del mundo tales como Brasil con la compañía *Copel*, Malasia con *Fibrecomm* e *Inova Tech* en Japón también se realizan e implementan servicios de internet y agregados por PLC. Debido a este auge, empresas como *Cisco* adelantan investigaciones para soluciones en banda ancha, la empresa *Elcon* adelanta investigaciones en la adaptabilidad de PLC con conexiones LAN y USB, *Easyplug* es la primera compañía en EE.UU que desplegó los servicios de PLC en ese país.

1.4.1 PLC en Colombia

En Colombia no se ha desplegado esta tecnología en forma masiva debido a que se considera como una tecnología en desarrollo. Por otra parte, en nuestra investigación se notó la escasa oferta de productos PLC tanto para prestación de banda ancha como para automatización del hogar. En el caso de servicios de banda ancha, la única empresa que tiene presencia en Colombia es *Corinex* en la ciudad de Bogotá, la cual ofrece y presta asesoría y la mayoría de sus ingresos han sido por parte de universidades en proyectos de investigación entre esas la Universidad Industrial de Santander quien adquirió unos módems *Corinex AV200* y unos acopladores capacitivos para analizar las ventajas y desventajas de PLC con respecto a Wireless LAN [6]. En el **Anexo C** se muestra una cotización realizada por *Corinex* a los autores del presente trabajo de grado, para controlar las lámparas externas del edificio CENTIC.

En el caso de PLC para servicios de automatización, el protocolo más usado es el X-10 [7], aunque es muy común en Europa y Estados Unidos, en Colombia

no se encuentra en exhibición y el argumento dado por las empresas es que este protocolo no está normalizado por la legislación Colombiana. Se realizaron contactos en Bucaramanga, Bogotá y Medellín sin resultados positivos de existencia de éstos equipos en sus vitrinas, por lo que se realizaron contactos con la empresa *Domótica Viva* de España, para poder adquirir equipos de domótica X-10, aunque no ofrecieron garantía del buen funcionamiento debido la diferencia en las especificaciones eléctricas (220 V - 50Hz).

1.5 REGLAMENTACIÓN

Tanto en Europa como en Norteamérica existen organismos y entidades reguladoras del uso de la red eléctrica como medio para el envío de datos, por lo que su uso se restringe a un ancho de banda determinado. Los principales organismos de reglamentación son la *UIT* (Unión Internacional de Telecomunicaciones), la *IEEE* (Institute of Electrical and Electronics Engineers), *CISPR* (Comité Internacional Especial de Perturbaciones Radioeléctricas), *IEC* (International Electrotechnical Commission), *ETSI* (European Telecommunications Standards Institute), *CENELEC* (European Committee for Electrotechnical Standardization) y *FCC* (Federal Communications Commission), la mayoría de estos fundados en Europa a excepción de la FCC de origen Norteamericano

En Latinoamérica la tecnología PLC no ha tenido buena acogida, ya que sistemas como el cable modem y DSL abarcan gran cantidad del mercado, ignorando el hecho de la instalación de mayor cableado y la limitación en servicios prestados. Sin embargo se han realizado pruebas en países como México, Chile, Brasil, Argentina y Costa Rica siendo el principal problema la inversión inicial requerida. El organismo que más ha tratado este tema es la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones, aunque no se ha definido ningún estándar para aplicación de esta tecnología de Latinoamérica incluido Colombia.

1.6 FUNCIONAMIENTO DE PLC

PLC es la tecnología que emplea las líneas de tensión como medio de transmisión de información, ya sea para servicios de banda ancha como también señales de información de monitorización de energía o de control para las aplicaciones de domótica. La tecnología ADSL, es otra que también utiliza líneas de tensión para transmitir información, aunque en este caso es necesario el despliegue de nuevos cables y la tensión cambia de acuerdo al estado de la línea telefónica, es decir, en reposo, en llamada entrante o con la bocina descolgada. En el caso de PLC, siempre utilizará la misma tensión de alimentación del sitio donde se conecte, ya que la señal de información viaja a través de la señal de voltaje alterno a través de un proceso llamado modulación para luego extraerse a través de la demodulación. La comunicación en PLC se

puede dividirse en dos capas principales, la capa física y la capa de acceso (MAC).

1.6.1 Capa física

Esta capa define el acondicionamiento de la señal y las técnicas de modulación, pero antes de eso es necesario tener en cuenta unos aspectos propios del canal a transmitir la información, estos aspectos son [8]:

- Alta atenuación por unidad de longitud.
- Baja impedancia por lo que se requiere altas potencias de emisión
- Variación de la impedancia debido a dispositivos no lineales conectados en la línea de transmisión.
- Reflexiones de la señal, debido a la variación de la impedancia no siempre se dispone de una red ideal.
- Rango de frecuencias desde 1.6 -30 MHz.
- Acceso incierto a tierra, aumentando más las posibilidades de ruido.

Una vez se tienen en cuenta estos aspectos, se ve la necesidad de acondicionar el medio tan hostil como lo es la red eléctrica, teniendo en cuenta que fue diseñada para transportar energía a una frecuencia de 50 o 60 Hz, mientras que los datos viajarán a una frecuencia superior a 1MHz, contando con la ventaja que entre ellas no se causa ninguna interferencia y pueden ser filtradas recíprocamente para cumplir el trabajo asignado, es decir, suministrar energía o transferencia de datos. En el tramo de última milla se encuentra este acondicionamiento, donde los datos provienen de fibra óptica o cable coaxial tipo banda ancha.

1.6.1.1 Modulaciones empleadas en PLC

El objetivo de cualquier sistema de comunicación es el envío y recepción de información. La información se propaga a través de un sistema de comunicaciones en forma de símbolos que pueden ser analógicos como la voz humana, o digitales (discretos) tal como el sistema de telégrafo usado hace más de doscientos años. El inconveniente más frecuente es que la información de la fuente no es adecuada para transmitirse en su forma original y debe convertirse en una forma más adecuada antes de ser transmitida. El símbolo binario más básico para transmitir es el bit, y se expresa la capacidad de transmitir información en bits por segundo, o bps. La capacidad de información es una función lineal de la amplitud de banda y del tiempo de transmisión y es proporcional a ambos. Diversos tipos de modulaciones han sido implementadas en el desarrollo de PLC, algunas usadas para control y otras para el envío de datos de banda ancha. En el **anexo A** se da una explicación más amplia de cada modulación.

- **Modulación ASK:** Es la técnica de modulación digital más sencilla y se define como una modulación de amplitud con portadora completa y doble banda lateral. A esta modulación se le conoce como manipulación por encendido-apagado ó OOK (*On-Off Keying*) ya que la portadora o está encendida o apagada, no hay más estados. No es muy utilizada en PLC debido al alto nivel de ruido presente en ella en el estado de “0” lógico.
- **Modulación FSK:** Es otro tipo de modulación digital relativamente sencillo muy usado para aplicaciones de control por medio de tecnología PLC pero de poca eficiencia para sistemas de comunicación de gran velocidad. La FSK binaria es una forma de modulación de ángulo, de amplitud constante, en la que la señal moduladora es una señal binaria que varía entre dos valores discretos de voltaje, y no es una forma de onda analógica que cambie continuamente.
- **Modulación MFSK:** Esta modulación es una expansión de la modulación FSK, en la que el término “*M*” antepuesto es un término derivado de la palabra binario (*M-ary en inglés*). *M* es un solo dígito que representa la cantidad de combinaciones o condiciones posibles para una cantidad de variables binarias. Al aumentar el número *M* se disminuye la calidad del ancho de banda.
- **Modulación PSK:** Es otra forma de modulación digital angular de amplitud constante. Son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia portadora. Una fase de salida representa el “1” lógico y otra fase de salida representa el “0” lógico. Cuando la señal cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre dos ángulos desfasados 180°.
- **Modulación MSK:** La modulación MSK consiste básicamente en una modulación FSK con control preciso de unos parámetros, como la frecuencia de la portadora, que ahora es de $\frac{1}{4}$ de la velocidad de transmisión, la fase de la portadora varía 90° durante cada periodo de transmisión y la amplitud de la señal es constante.
- **Modulación OFDM:** Es una técnica de modulación que se basa en la división del canal de comunicaciones en el dominio de la frecuencia en varios canales de menor amplitud y cada uno de estos transmite una subportadora. Cada subportadora en la que se transmite cada subcanal debe ser ortogonal entre sí asegurando un solapamiento entre ellas sin sufrir interferencia.
- **Modulación por códigos Reed Solomon:** Se aplican en diversos sistemas de comunicación como televisión digital y sistemas inalámbricos.

1.6.2 Capa de enlace

Esta capa comprende los protocolos que emplea PLC para la comunicación con otros dispositivos. El problema de esta capa es que cada fabricante desarrolló sus propios protocolos ante el auge desplegado sin tener ninguna

regulación. Existen tres protocolos de acceso al medio que son: *CSMA/CD*, *Token ring* y *OPERA (Open PLC European Research Alliance)*, aunque éste último ha sido el encargado de regular y estandarizar los protocolos y ha sido el más recomendado en cuanto a estudios de rendimiento y latencia [9].

1.7 MEDIO DE TRANSMISIÓN

El medio de transmisión de PLC son las líneas de tensión, medio que no fue diseñado para el transporte de datos a gran velocidad y cuyo comportamiento es variante en el tiempo. Estas fueron diseñadas para llevar tensiones y corrientes altas con frecuencias bajas.

El sistema eléctrico está compuesto por tres partes principales: generación, transmisión y distribución. La generación de energía eléctrica puede provenir de medios tales como centrales eléctricas de tipo térmico, hidráulico, eólico, nuclear y otros. La transmisión comprende los elementos necesarios para el transporte de potencia a una tensión superior a los 230Kv. Los elementos que la componen son subestaciones, transformadores y líneas de transmisión. También comprende la transmisión a 115Kv, denominada subtransmisión y se compone de los mismos elementos de la transmisión. Por último se encuentra la distribución, que se realiza a tensiones menores a 115Kv y se conforma por subestaciones de reducción, transformadores, líneas, etc.

Red de distribución Eléctrica: El objetivo de esta etapa es transportar la mayor cantidad de potencia con la menor pérdida posible; se divide en cuatro segmentos:

- **Red de Alta Tensión:** Es el tramo que une los centros de generación de energía hasta grandes áreas de consumo que puede ser una región, un país o entre países. Para minimizar las pérdidas se transporta la energía a una tensión entre 110Kv hasta 380Kv.
- **Red de Media Tensión:** Distribuye la tensión en un área determinada como una ciudad a una tensión entre 10Kv y 30Kv.
- **Red de Baja Tensión:** Distribuye la tensión a los usuarios finales, a una tensión entre 110v-380v, a la cual los usuarios pueden acceder sin necesidad de transformador.
- **Red de distribución domestica:** Abarca todo el cableado y tomas de acceso a energía dentro de un domicilio.

Los elementos que permiten el enlace entre los segmentos, su elevación, regulación y reducción son los siguientes:

- **Alimentadores Primarios de Distribución:** Llevan la energía eléctrica desde las subestaciones de potencia hasta los transformadores de distribución.
- **Transformadores de distribución:** Se encargan de elevar (de la central generadora a la red de transporte) o reducir la tensión para transportar la energía hasta el usuario a la tensión que ellos operan.
- **Alimentadores secundarios:** Distribuyen la energía desde los transformadores de distribución hasta las acometidas de los usuarios.
- **Acometidas:** Son todas las partes que unen todo el sistema de distribución con las instalaciones del usuario.

Colombia tiene un sistema bifásico con 220 V entre las fases y las cargas típicas se conectan entre una fase y el neutro a una frecuencia de 60Hz. Las cargas pesadas se conectan entre dos fases, y por lo general se conectan a un transformador de distribución de 5 a 20 casas.

1.7.1 Modelos del medio de transmisión

Uno de los aspectos que más se ha trabajado en la tecnología PLC es el medio de transmisión, ya que este no fue diseñado como medio para el transporte de datos a alta frecuencia, a diferencia de las líneas de transmisión de los sistemas de comunicación convencionales que presentan valores de capacitancia en paralelo, resistencia e inductancia fijas a lo largo de la línea de transmisión como la de un cable coaxial. La red eléctrica presenta fluctuaciones debido a los siguientes factores:

- Inserción de armónicos por encima de los 20Khz por los transformadores.
- Conexión y desconexión aleatoria de equipos a la red.
- Las bajas impedancias de algunos equipos conectados a la red eléctrica provocan atenuaciones en las señales de transmisión y recepción.
- Cambio de impedancia de impedancias ya conectadas como el caso de cargas no lineales.
- El cableado genera capacitancias que domina los efectos de propagación de la señal
- Atenuaciones de la señal desde 5dB a 25dB.
- Reflexiones de la señal ocasionadas por la diferencia de la impedancia característica.

Los modelos tratan de aproximar el comportamiento de la red ante la presencia de una señal de alta frecuencia. En el anexo C se explican con mayor profundidad el modelado de un medio de transmisión

- **Modelo de multitrayectoria en canales PLC:** Este modelo tiene en cuenta que al realizar un sistema de comunicación entre un transmisor y un receptor, la señal enviada no solo se desplaza directamente al receptor, sino que parte de ella se dispersa por diversas ramificaciones denominadas ecos [10].
- **Modelo de parámetros distribuidos:** Una línea de transmisión real puede moldearse con parámetros distribuidos con resistencias, inductancias, capacitancias y conductancias. Al aplicar una señal de voltaje a la entrada, las propiedades inductivas y capacitivas de cada sección actúan sobre la señal produciendo un retardo y debido a las propiedades resistivas, la señal reflejada presenta una atenuación proporcional a la resistencia de la línea.

Prueba de Reflectometría: Los medios de transmisión guiados pueden presentar problemas que reducen su desempeño. El punto en la línea donde se presenta un defecto, representa una discontinuidad de la señal haciendo que parte de ésta se refleje en lugar de continuar por el cable. Si no regresa energía se considera que la impedancia de la línea de transmisión y de la carga están perfectamente balanceadas y se considera de longitud infinita o termina en una carga resistiva igual a la impedancia característica de la línea. La reflectometría funciona de manera similar que un radar, se emite un pulso de corta duración que se propaga por el cable y se mide el tiempo en que regresa una parte de esa señal a la fuente. Al conocer la velocidad de propagación del medio se puede calcular la distancia exacta entre el defecto y la fuente con la siguiente ecuación [11]:

$$d = \frac{v*t}{2} \quad (1)$$

Siendo d = distancia de discontinuidad.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \text{velocidad de propagación}$$

ϵ_r =constante dieléctrica del material

1.7.2 Ruido

En el medio de transmisión entre el transmisor y receptor interfieren varias señales que no solo atenúan sino que también distorsionan la señal original a tal punto que es imposible reproducir en el receptor la señal original. A diferencia de otros medios de transmisión, el ruido presente en un canal PLC no puede ser representado únicamente como un ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) cuya densidad espectral es constante en todo el espectro de transmisión. La mayoría de fuentes de ruido son debidas a cargas conectadas, muchas de ellas son no lineales como fuentes conmutadas de computador. Otras son por el tipo de conductor y las muchas interconexiones presentes en

la acometida. Entre los equipos que generan ruido eléctrico y que son de uso común son los siguientes:

Dimmers: Luces controladas por triacs, producen grandes impulsos de 100 a 120 Hz.

Conmutación de fuentes de poder: Genera gran cantidad de armónicos desde 20 KHz hasta más de 1 MHz.

Citofonía sobre líneas de potencia: produce tensiones desde 3Vpp hasta 7Vpp desde 150 hasta 400 KHz.

Equipos con motores eléctricos: tales como secadores, taladros, aspiradoras, presenta repetición de altas ratas de impulsos.

Los tipos principales de ruido presentes en una línea de tensión son:

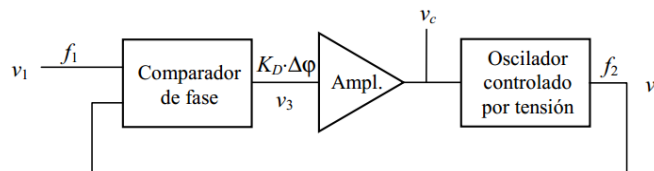
- **Ruido Impulsivo Periódico Síncrono a la Frecuencia Principal:** Son impulsos con una frecuencia de repetición que está entre los 50 y 100 Hz y son síncronos de la frecuencia principal de la línea eléctrica. Son de corta duración del orden de los microsegundos y su densidad espectral de potencia decrece con la frecuencia. Su causa es la operación de convertidores de potencia conectados al suministro eléctrico principal.
- **Ruido Impulsivo Asíncrono:** Son impulsos causados por conmutaciones en la red eléctrica y su duración va desde microsegundos hasta unos pocos milisegundos. Su densidad espectral de potencia puede alcanzar valores de más de 50 dB por encima del ruido de fondo, siendo la principal causa de error en las comunicaciones digitales sobre la red PLC.
- **Ruido de Fondo Multifrecuencia:** La densidad espectral de potencia es relativamente baja y se reduce con la frecuencia. Es producido por la superposición de numerosas fuentes de ruido de baja intensidad. Es muy dependiente de la frecuencia.
- **Ruido de Banda Angosta:** La forma de onda es tipo sinusoidal con amplitudes moduladas, ocupa varias bandas que son relativamente pequeñas y continuas sobre el espectro de frecuencia. Su origen es el ingreso de estaciones de radiodifusión como televisión, radio y transmisiones de onda corta sobre el medio. Su amplitud es variante con el tiempo y presenta mayor amplitud en las noches debido a que las propiedades reflectivas de la atmosfera son más fuertes.
- **Ruido Impulsivo Periódico Asíncrono a la Frecuencia Principal:** Presenta forma de impulsos que tienen una frecuencia de repetición entre 50 y 200 KHz. Este tipo de ruido es causado principalmente por el encendido y apagado del suministro de energía. Este ruido ocupa frecuencias que están muy cercanas entre si y forman espacios de frecuencia que usualmente se aproximan a bandas angostas de frecuencia.

Los dos primeros tipos de ruido varían en periodos de tiempo de microsegundos y milisegundos y se clasifican como ruido impulsivo debido a que su amplitud es relativamente alta y de corta duración y son la principal causa de error en la transmisión de alta frecuencia en un canal PLC. Por otra parte, los tres últimos tipos de ruido permanecen estacionarios sobre periodos relativamente largos, de segundos minutos o incluso horas, por esta razón se conocen como ruido de fondo generalizado.

1.8 DEMODULACIÓN

Después de la transmisión por la red a través de diversos tipos de modulación, es necesario recuperar la información, la mayoría en forma de valores discretos, es decir, la conversión analógica-digital de la información de interés. La demodulación es realizada por circuitos de lazo de fijación de fase (en inglés *phase locked loop PLL*). Este tipo de circuitos genera una frecuencia cuya fase se mantiene acotada con respecto a una señal de entrada. Para hacer esto posible el circuito es realimentado para comparar la fase de las dos señales y actúa modificando la frecuencia de la oscilación generada. En la **Figura 5** se ilustra el principio de funcionamiento de los PLL's.

Figura 5. Diagrama esquemático de un PLL



Fuente: [12]

En la primera etapa, el comparador de fase, se produce una señal $K_D \Delta \varphi$ proporcional a la diferencia de fase entre la señal de entrada v_1 con frecuencia f_1 la señal generada por el oscilador controlado por voltaje (en inglés *Voltage Controlled Oscillator VCO*) v_2 con frecuencia f_2 que varía linealmente por el voltaje v_c . Si la señal $K_D \Delta \varphi$ que se aplica al VCO hace que éste oscile a la frecuencia de entrada f_1 , el sistema se encontrará en equilibrio, por el contrario si $f_1 \neq f_2$ habría una diferencia de fase entre las dos frecuencias, aplicándose un voltaje en el VCO que genere una frecuencia que iguale la de la entrada produciendo una diferencia de fase cero.

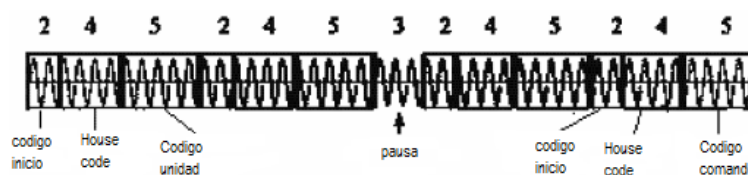
1.9 PROTOCOLO X-10

Este protocolo fue desarrollado como un experimento para controlar un dispositivo electrónico de forma remota entre los años 1976 a 1978 en Escocia por los ingenieros de *PICO Electronics Ltda.* y la empresa de sistemas de audio

BSR, que produjo un protocolo que se ha convertido en un estándar internacional. Las especificaciones de este protocolo son [13]:

- Permite la transmisión de datos a baja velocidad por las líneas de baja tensión.
- Las señales de control se sincronizan en el cruce por cero de la señal de tensión.
- Las señales de control que representan la información digital se transmiten en ráfagas de pulsos de 120 KHz.
- Un 1 lógico es la presencia de una ráfaga de pulsos de 120 KHz durante un milisegundo del semiciclo positivo y la ausencia del semiciclo en el semiciclo negativo.
- Un 0 lógico es la presencia de una ráfaga de pulsos de 120 KHz durante un milisegundo del semiciclo negativo y la ausencia de la ráfaga en el semiciclo positivo.
- Los bits 0 y 1 tienen en común la presencia y ausencia de ráfagas en los semiciclos de la onda de 60 Hz y se diferencian en los tiempos de envío de las ráfagas de pulsos.
- Para enviar un comando se genera una trama que contenga el código de inicio, el identificador de modulo y el número de la llave.
- El código de inicio se transmite a través de ráfagas especiales que informan a todos los módulos que se va a enviar información.
- Los comandos llegan a todos los módulos conectados pero solo activa aquellos a los cuales va dirigida la información mediante un comparador de bits en la trama "house code".
- En el espacio de la trama de comando se envían las órdenes de encendido, apagado, reducir, aumentar, apagar todo y encender todo.
- La trama tiene 22 bits y se transmite dos veces, por lo que se requiere enviar 44 ráfagas de pulsos de 120 KHz para transmitir un comando de control a los módulos. El tiempo de demora de la transmisión es de 16,66 milisegundos.

Figura 6. Trama de datos de protocolo X-10.



Fuente: [13]

Esta tecnología ha sido la base para la fabricación de alarmas, interfaces de computador, dimmers, contestadoras, etc. que son compatibles con dicho

protocolo y varias compañías de productos domóticos trabajan con este protocolo. Las ventajas y desventajas de usar protocolo X-10 son:

Ventajas

- Dispositivos Plug and Play.
- Reducción de costos asociados a construcción y adecuación de infraestructura.
- Modularidad
- Optimización de recursos.
- Grandes distancias de transmisión.

Desventajas

- Bajas tasas de transmisión de datos.
- Solo se aplica para control
- La limitación en el ancho de banda de los pares de cobre.

1.10 SMART GRID

El termino Smart Grid no tiene una definición estándar, aunque la Plataforma Tecnológica Europea de Smart Grids la define como una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella –generadores, consumidores y aquellos que realizan las mismas acciones- con el fin de distribuir de forma eficiente y segura el suministro eléctrico desde el punto de vista sostenible y económico [1].

La tecnología Smart Grid se concibió de la necesidad por controlar el consumo de energía a través de medidores y sistemas de monitorización. Es necesario mantener una constante comunicación y el control en tiempo real lo que sirve para la creación de sistemas inteligentes de ahorro de energía en las casas. De las primeras aplicaciones de Smart Grid se conoce como demanda pasiva, que determina las variaciones de la prestación de energía, para ajustar el ciclo de trabajo de elementos como aires acondicionados, heladeras y calefactores evitando las horas pico de consumo de energía tales como la franja nocturna para evitar sobrepicos en el sistema de abastecimiento eléctrico. Italia fue uno de los primeros escenarios en implementar una Smart Grid con más de 27 millones de hogares provistos de medidores inteligentes conectados a través de una línea de comunicación.

En el contexto de una Smart Grid, el uso de PLC ha sido de gran importancia en procesos de monitorización y sincronización de redes para analizar

anomalías en la calidad de la energía a través de sensores, sobre todo como tecnología de comunicación de última milla y complementaria a otras como Zig Bee y wireless LAN, que transportan los datos sensados por el elemento más importante dentro de una Smart Grid: el Smart Meter o medidor inteligente que además de su desempeño como dispositivo de medición, es compatible con las tecnologías anteriormente mencionadas.

2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA TECNOLOGÍA PLC

Para la implementación de la tecnología PLC en el control de cargas, se tiene en cuenta varios aspectos a fin de determinar la mejor opción considerando aspectos como tipo de aplicación, escalabilidad, comportamiento frente al ruido, distancia de alcance de la señal y costos, que garanticen el cumplimiento del presente proyecto.

Análisis del problema: En primera instancia se desea controlar una carga eléctrica no crítica dentro de las instalaciones del campus universitario. El control a realizar es en primera medida un control on-off abierto con sistema de comunicación simplex, el cual se puede acceder por medio de una interfaz de computador y compatible con wireless LAN. Tal como ocurre al interior de la Universidad Industrial de Santander donde existen equipos sin ningún tipo de control remoto tales como sistemas de iluminación, aires acondicionados, control de salas de computo e incluso sistemas de descalcificación de agua para escenarios de gran afluencia de personas, es necesaria la implementación de sistemas de control que requieran poca instrumentación debido al difícil acceso y el costo elevado de estos, pero de gran eficiencia aprovechando el tendido eléctrico que suministra la energía a estos sistemas. Además el sistema posteriormente podría ser adaptable con un módulo adicional respectivo para interactuar con dispositivos de medición como los Smart Meters (Ethernet, RS232, Wi-Fi, Zig Bee), para el control remoto de las cargas en base a la lectura realizada por éstos y posteriormente automatizarlos. El problema no especifica ninguna carga en particular, ya que ésta es activada por un sistema de potencia que puede ser con relés convencionales o de estado sólido, que aíslan la etapa de control de la de potencia asegurando la protección de los equipos.

Análisis de los esquemas de modulación: Una vez dadas las características de cada esquema de modulación, y en vista del problema planteado, se tienen diversos tipos de modulación y se incluye el protocolo X-10 debido a su aplicación en domótica, por lo que se presenta a continuación los esquemas de modulación a analizar:

- **ASK:** Es una modulación muy sencilla, se transmite una sola frecuencia, la detección de ésta es interpretada como "1" lógico y la ausencia como un "0" lógico (para la forma de onda OOK), Suele ser susceptible al ruido, por lo que requiere el uso de filtros pasa-banda para su implementación. Los equipos necesarios para su implementación es de bajo costo.
- **FSK:** Ha sido una de las modulaciones más usadas en telemetría, control y protección de líneas de transmisión. Aunque la velocidad de datos es baja, es suficiente para el control de cargas [2]. Es vulnerable al ruido aunque con las frecuencias adecuadas y el posterior filtrado pasa banda puede ser

una buena opción si el estado de la red es aceptable. Los equipos necesarios para su implementación son de bajo costo.

- **MFSK:** Es igual a la anterior con un mayor número de frecuencias ($M > 2$), lo que resulta útil para controlar distintos tipos de cargas, aumentando el ancho de banda y es necesario más demoduladores PLL y filtros pasa banda. Su implementación es algo más costosa que FSK.
- **PSK:** Después de FSK, se considera PSK como un sistema de modulación más inmune al ruido. Es necesario tener en cuenta la sincronización de las fases para su correcto funcionamiento, aunque los últimos módems PLC con modulación PSK resuelven este problema.
- **DSSS:** Fue usado para la primera generación de PLC de banda ancha, logrando velocidades desde 1 a 4 Mbps, aunque para ello se usa un ancho de banda mucho mayor de la señal original. Es compleja de realizar y con gran ancho de banda, por lo que es sobreestimado para el control de cargas.
- **OFDM:** Es una de las modulaciones más robustas y ofrece una alta inmunidad al ruido, pero su implementación es costosa.
- **PROTOCOLO X-10:** Ha sido uno de los sistemas más usados para el control de cargas, debido a su simplicidad y que puede controlar hasta 256 dispositivos. Lamentablemente en Colombia hay poca oferta de esta tecnología debido a la falta de reglamentación, por lo que las empresas de servicios de domótica los han retirado del mercado, lo que obliga a la importación, pero la mayoría de equipos X-10 son fabricados con un voltaje de operación de 220 V-50 Hz, y no garantizan el correcto funcionamiento a 110 V-60 Hz. Cada equipo receptor X-10 tiene un costo elevado por lo que la adición de cargas a controlar eleva considerablemente la implementación con este sistema.

De acuerdo con este análisis las dos mejores opciones para la implementación son las modulaciones ASK (OOK) y FSK. Para facilidad del análisis de este sistema de control PLC por medio de modulación ASK y FSK, se determinó el segundo piso del edificio Eléctrica Antigua o también llamado Laboratorio de Alta Tensión del campus de la universidad, por la disposición de equipos de medición y la posibilidad de investigaciones posteriores a este trabajo de grado.

2.1 MODELADO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

El escenario para la implementación del sistema es analizado con el fin de determinar su comportamiento, para esto se realizaron pruebas de reflectometría, que consiste en aplicar un pulso sobre la línea de transmisión previamente desconectada del sistema eléctrico, para determinar las propiedades de la línea de transmisión. El laboratorio de alta tensión está ubicado en la parte noroccidental de la universidad; es una edificación de dos

niveles, en el segundo nivel se ubican dos baños y seis laboratorios. Este edificio posee diversidad de cargas que abarca motores, transformadores, salas de cómputo y laboratorios de electrónica. El lugar de prueba para la reflectometría es el tablero trifásico ubicado en el pasillo del segundo piso y se alimenta mediante conductores de fase #4 Cu THW (cable con aislamiento termoplástico resistente al calor y al agua), neutro #6 THW y dos conductores de tierra #6 siendo uno un tipo THW y el segundo desnudo, todos por tubería de 2" [14].

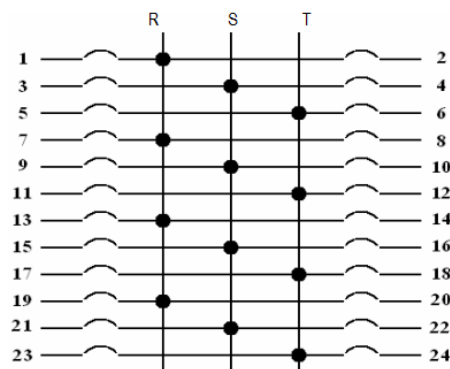
El tablero trifásico consta de 24 puestos con conductores calibre #12 THW de alambre, el cual presenta barraje de neutro aislado y en el cual se implementa el punto de equipotencialización de la caja como punto de conexión para los conductores de tierra de los equipos. Las especificaciones del tablero son:

Tabla 1. Características del tablero trifásico

Ubicación:	Laboratorio alta tensión pasillo 2do piso					
Nombre:	TAB	Fases:	3	R	A	Az
Fabricante:	LUMINEX		Num cqtos:	24		
Barraje puesta a tierra:	No		Tapas:	Si		

Fuente: [14]

Figura 7. Esquema de conexión interna del tablero trifásico



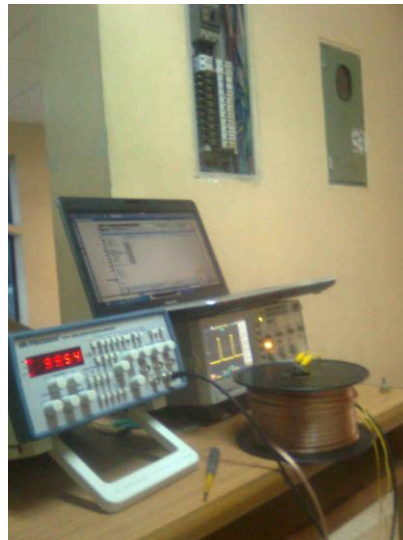
Fuente: [14]

Para éste montaje se utilizaron los siguientes elementos:

- Osciloscopio marca Gw-instec modelo gds 2062 con resistencia de entrada de 1 MΩ y 16pF de capacitancia.
- Generador de señales marca BK Precision modelo 4040 con resistencia de entrada de 50Ω
- Multímetro digital marca BK modelo 66B2660

Antes de realizar la conexión es necesario el corte del suministro eléctrico en la mayoría de tableros del edificio, para garantizar la calidad de la prueba sin interferencia en las fases, por lo que ésta prueba fue posible un solo día con permiso del personal que administra los laboratorios. Se escogió el Interruptor o “breaker” 21, que se encuentra conectado a la fase S y que suministra energía eléctrica al laboratorio de electrónica 206, sobre el cual se realizará la implementación del sistema PLC. En busca de una mayor distancia, se añadieron 80 metros de cable dúplex calibre 16, con el fin de poder analizar el comportamiento del sistema a mayor distancia para cargas ubicadas lejos de la interfaz. El montaje realizado fue el siguiente:

Figura 8. Montaje de equipos para prueba de reflectometría.



Fuente: Autores.

Se realizaron las pruebas de circuito abierto, corto circuito y carga equilibrada, en la cual se conecta una resistencia variable en los terminales de la línea de transmisión a fin de determinar el mínimo reflejo de la onda incidente debido al balanceo de cargas. Las imágenes tomadas fueron las siguientes:

Figura 9. Prueba de circuito abierto de reflectometría

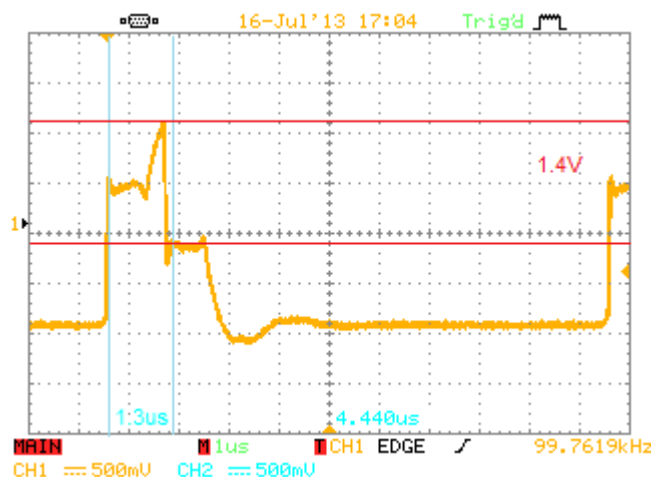


Figura 10. Prueba de corto circuito de reflectometría

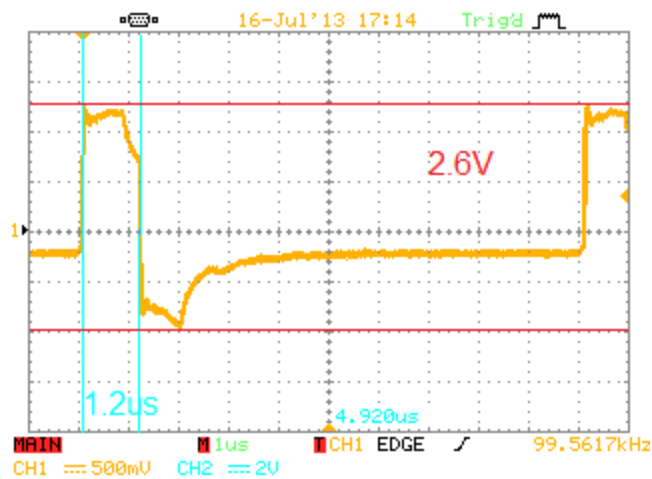
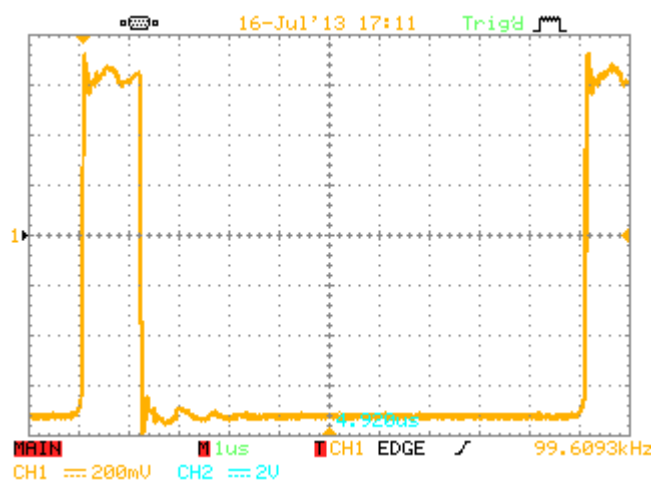


Figura 11. Prueba de cargas balanceadas de reflectometría



Fuente: Autores.

ANÁLISIS DE PRUEBA DE REFLECTOMETRÍA

De acuerdo los datos suministrados por las **Figuras 9, 10 y 11** tomadas de la prueba de reflectometría, se aprecia el retardo ocasionado por los elementos capacitivos e inductivos del medio de transmisión, y la atenuación de la señal revela el parámetro resistivo del mismo. Al variar la resistencia de carga, se determinó un valor aproximado de 96Ω en el que se apreció el menor reflejo posible, concluyendo que cercano a éste valor las cargas se consideran equilibradas deduciendo así que Z_0 es próximo a 96Ω .

Según las recomendaciones dadas en [11], el retardo producido por el medio es aproximadamente $1,3 \mu\text{s}$, por lo que el mínimo ancho de pulso de la señal debe ser 2 o 3 veces menor a éste retardo. El periodo de las señales para

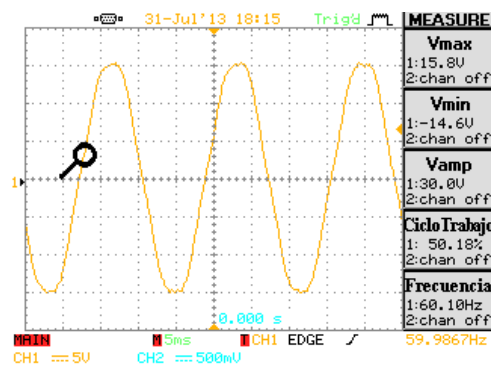
modulación FSK debe ser mayor al retardo, por lo que se concluye que la frecuencia máxima a utilizar es **768 KHz**.

2.2 ANÁLISIS DE ATENUACIÓN, FRECUENCIA Y DISTANCIA

Una vez analizado el medio de transmisión y la frecuencia máxima de operación, se procede a aplicar pruebas sobre la línea de tensión a la cual se inyecta la señal modulada en frecuencia y se examina su comportamiento en los bornes del receptor sin ningún filtrado o amplificación. De acuerdo con el estándar CENELEC 50061-1 que aplica a sistemas PLC de banda estrecha, esto es, sistemas que normalmente solo usan una portadora modulada en FSK o BPSK, solo se permite inyectar en la red eléctrica señales que van desde 3 KHz hasta 148 KHz, aunque solo permite inyectar niveles de tensión de 1.2 Vpp, considerando los bajos niveles de ruido eléctrico presentes en una vivienda, pero es un nivel muy bajo para un ambiente tan hostil como el edificio de alta tensión, por lo que se determinó una tensión de 10 Vp. Dado que en Colombia no rigen estándares para la aplicación de PLC, se realizaron tres pruebas adicionales fuera del estándar CENELEC 50061-1, a fin de determinar el comportamiento de la señal a frecuencias de 200 KHz, 250 KHz y 300 KHz.

Las medidas de atenuación son comparadas con la señal de salida de 10 Vp. Al incrementar la frecuencia, la forma de onda de la modulación se deforma debido al acople con la red y la respuesta del transistor de potencia en altas frecuencias, pero su amplitud se mantiene constante. Para proteger el osciloscopio se conectaron la fase y neutro de la línea a los bornes de valor fijo de un potenciómetro de 1 MΩ. Entre el borne variable del potenciómetro y uno fijo se conectó el terminal positivo de la sonda de la sonda y el negativo respectivamente. A simple vista, la señal de 60 Hz parece libre de ruido, por lo que es necesario hacer un acercamiento en tiempo y amplitud.

Figura 12. Señal de 60 Hz atenuada.



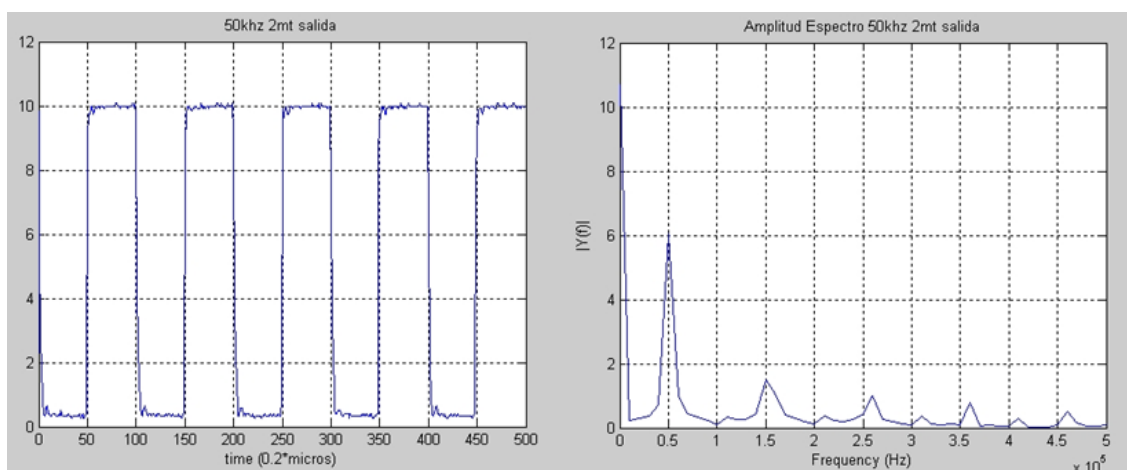
Fuente: Autores

Según la lectura del osciloscopio de la **Figura 12**, $V_{max}=15.8$ V; ésta señal es una réplica atenuada de la señal original por un factor de 10,75 $\left(\frac{170}{15.8}\right)$ y todas las señales que se modulen así como el ruido tienen el mismo factor de atenuación. El ruido presente en la red eléctrica es variante en el tiempo y por distintas fuentes explicadas anteriormente. El nivel y clases de ruido son determinantes en la calidad de transmisión de la tecnología PLC, por esta razón se realizaron tomas de la señal de 60Hz con acercamiento para determinar el ruido presente en la red. En la jornada diurna se presenta la mayor cantidad de ruido debido a la activación de motores trifásicos en el laboratorio de máquinas eléctricas, fuentes conmutadas, computadores y aires acondicionados. En la jornada nocturna no se activan estos motores, las cargas más comunes son la iluminación fluorescente en pasillos y salones, computadores y aires acondicionados.

2.2.1 Pruebas de transmisión y recepción con forma de onda rectangular

Una de las formas más sencillas de acoplar la señal a la red es por medio de condensadores cerámicos de baja capacitancia y alto voltaje. La señal proveniente del modulador es amplificada por un transistor de potencia TIP-41, entre el emisor y tierra se conecta una resistencia de potencia. Entre los bornes de la resistencia se conectan los dos condensadores cerámicos. Experimentalmente se comprobó una alta atenuación tal que a distancias mayores de 6 metros la señal enviada no se podía distinguir del ruido presente en la red. La señal de salida del transmisor y la llegada al receptor son analizadas a continuación:

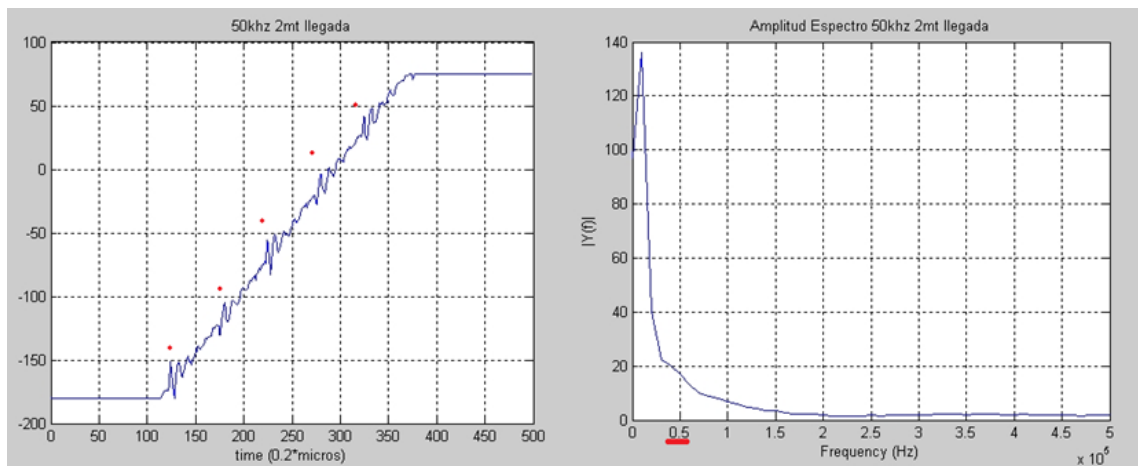
Figura 13. Señal de salida del transmisor a 50KHz acoplada a la red y espectro.



Fuente: Autores.

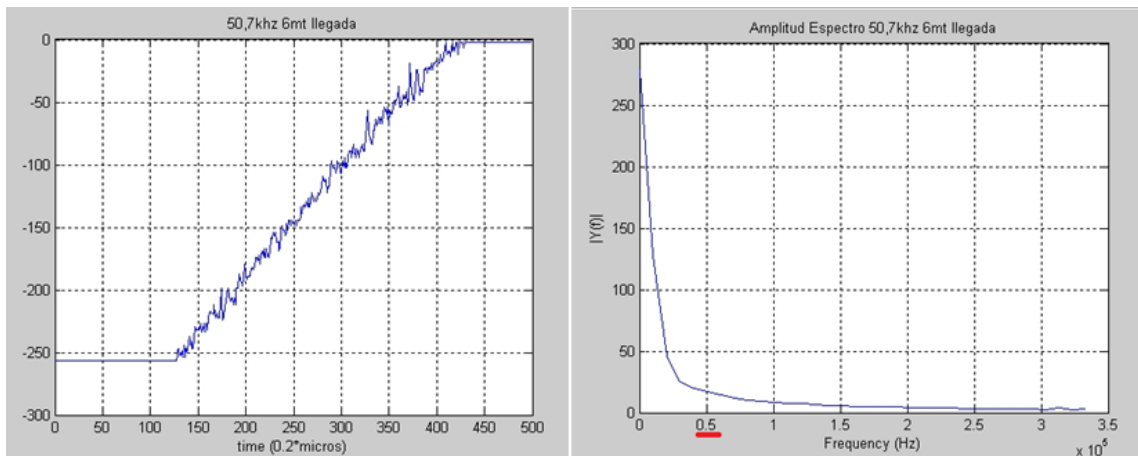
La **Figura 13** muestra el espectro de la señal de salida, en éste, el nivel de DC presenta la mayor componente de amplitud a los 10 V de la señal, el primer armónico corresponde a la frecuencia de la señal, a 50 KHz con una amplitud aproximada a la mitad de la amplitud de la señal de salida. Existen otros armónicos en la señal como consecuencia de la distorsión por el acople capacitivo. Las señales medidas en el receptor ubicado a 2 metros y 6 metros se analizan a continuación.

Figura 14. Señal de 50KHZ modulada en el receptor a 2 metros del transmisor y espectro.



Fuente: Autores.

Figura 15. Señal de 50KHZ modulada en el receptor a 6 metros del transmisor y espectro.



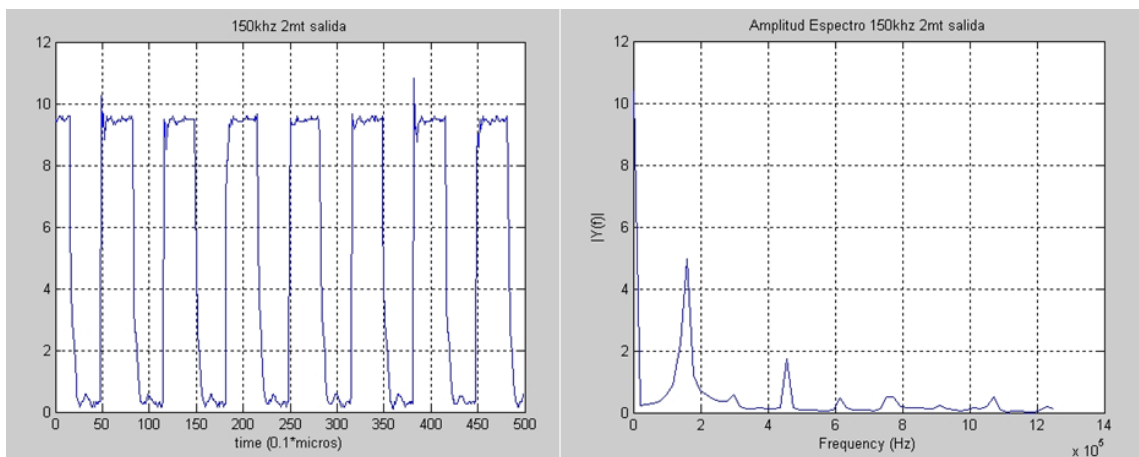
Fuente: Autores.

Las **Figuras 14** y **15** muestran las señales de llegada a 2 y 6 metros respectivamente. En la **Figura 14** se puede apreciar visualmente los picos de amplitud a la frecuencia de transmisión, mientras que en la **Figura 15** estos picos se confunden con el ruido. La diferencia entre los espectros de la señal recibida a 2 y 6 metros es la amplitud del espectro a la frecuencia de 50Khz,

presentándose una mayor relación de señal a ruido en la **Figura 17**. Las dos señales recibidas presentan un elevado nivel de ruido, esto se refleja en la forma de onda de los espectros. Idealmente deberían tener una forma de onda como la de la **Figura 15**, de tal manera que pueda ser filtrada y posteriormente demodulada.

Tomando como limite la frecuencia superior de la norma CENELEC 500061-1, se realizó la prueba de transmisión y recepción de la señal a 150 KHz con puntos de recepción a 2 y 6 metros respectivamente como en el análisis anterior.

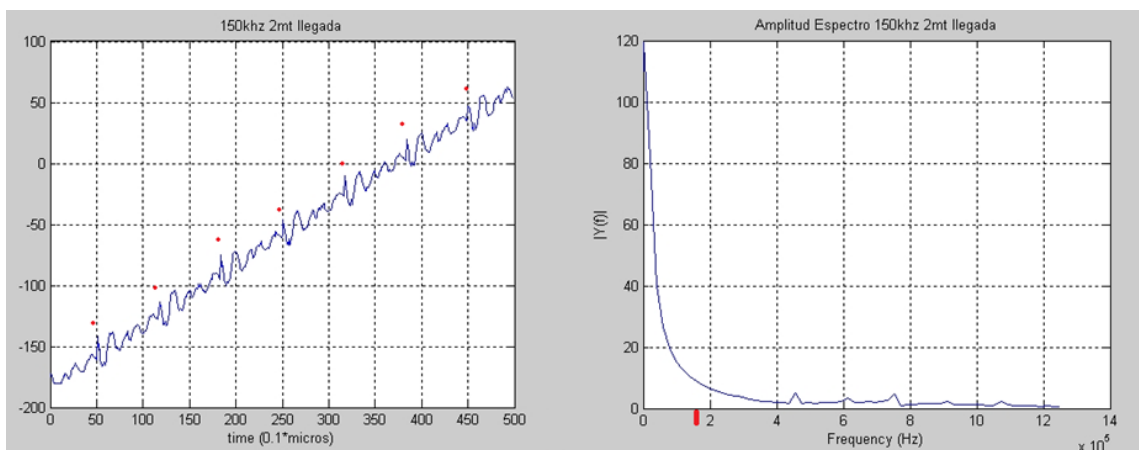
Figura 16. Señal de salida del transmisor a 150KHz acoplada a la red y espectro.



Fuente: Autores.

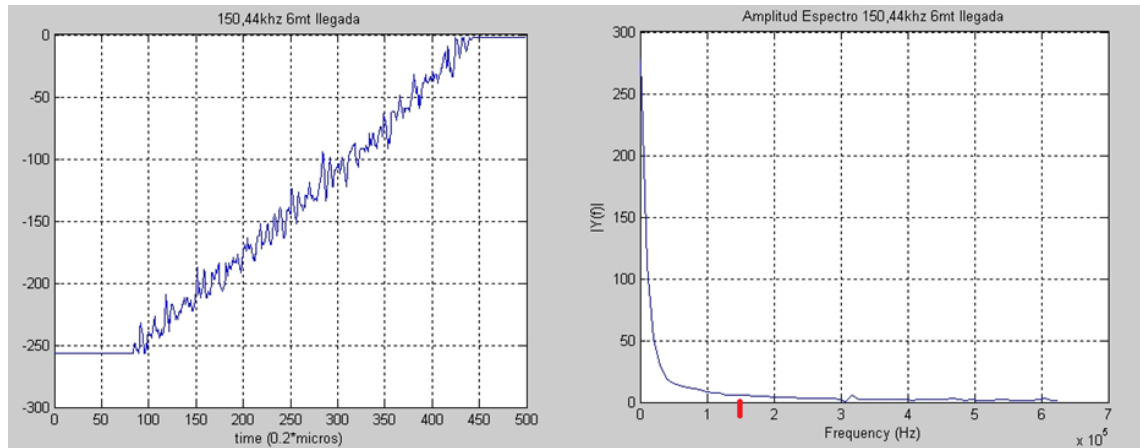
Al igual que la **Figura 13**, el espectro en la señal de salida presenta su mayor amplitud en la componente de corriente continua y su primer armónico a la frecuencia del transmisor aunque con menor amplitud debido a las distorsiones sufridas en el acople capacitivo.

Figura 17. Señal de 150KHZ modulada en el receptor a 2 metros del transmisor y espectro.



Fuente: Autores.

Figura 18. Señal de 150KHZ modulada en el receptor a 6 metros del transmisor y espectro.

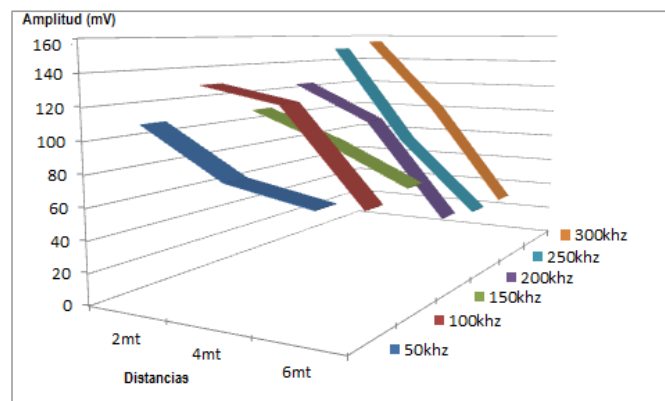


Fuente: Autores.

El comportamiento de la señal a 150KHz es muy parecido a 50KHz, aunque de manera más lineal pero la amplitud de la señal respecto al ruido es menor. La señal a otras frecuencias entre 50 KHz y 300KHz presentaron el mismo comportamiento.

Analizando los datos de las gráficas anteriores, se puede establecer la amplitud de los picos de la señal y compararlos con las otras frecuencias usadas en la investigación. El sistema de acople por capacitancias de la señal de transmisión denota la pérdida de casi toda su potencia y su atenuación proporcional a la distancia, aunque a distancias cortas presenta mayor amplitud a altas frecuencias su decrecimiento es más abrupto. La señal que presenta mejor comportamiento es la de 150 KHz, ya que se comporta de manera lineal a las distancias medidas, por lo que podría modelarse su comportamiento según la distancia y amplitud inicial.

Figura 19. Comparación del comportamiento de la señal de llegada a distintas frecuencias y distancias.



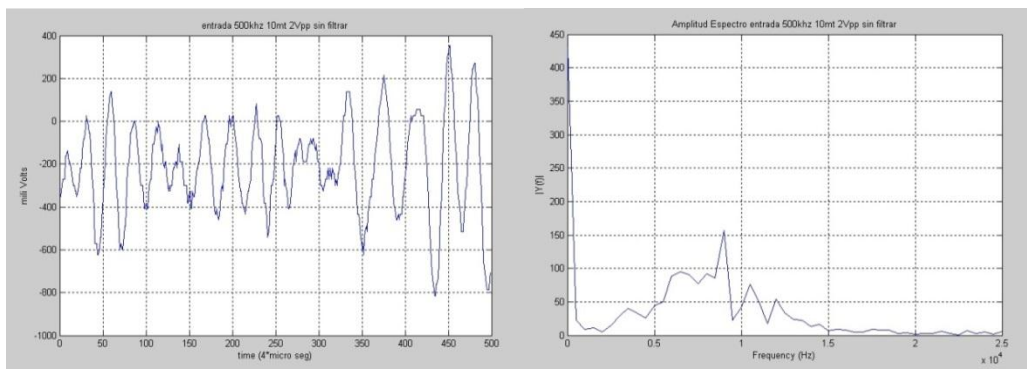
Fuente: Autores.

En el análisis anterior se apreció la pérdida de energía de la señal en los primeros armónicos de la señal con forma de onda rectangular, al analizar la señal extraída de la red con niveles menores a 10Vp, era casi imperceptible en el receptor, por lo que el aumentar la tensión de salida del transmisor conlleva a un mayor consumo de potencia del mismo.

2.2.2 Pruebas de transmisión y recepción con forma de onda sinusoidal

Una vez analizado el comportamiento de la señal de información con forma de onda rectangular, se procede a analizar el envío y recepción de señal con forma de onda sinusoidal. Previamente en el laboratorio se comprobó que a una menor amplitud de voltaje la señal es capaz de alcanzar mayores distancias, por lo que con una señal de salida de amplitud 2Vpp la señal tuvo un alcance mayor a 30 metros. El comportamiento de la señal puede ser reproducido a mayores distancias considerando constante el medio de transmisión. Experimentalmente se comprobaron niveles muy bajos e imperceptibles de la señal sinusoidal en el rango de 50KHz a 300Khz, seguramente debido al elevado nivel de ruido presente en los laboratorios de Alta Tensión. Al expandir el rango de frecuencias se apreció un nivel significativo que pudo ser posteriormente procesado a 500KHz en forma de onda sinusoidal.

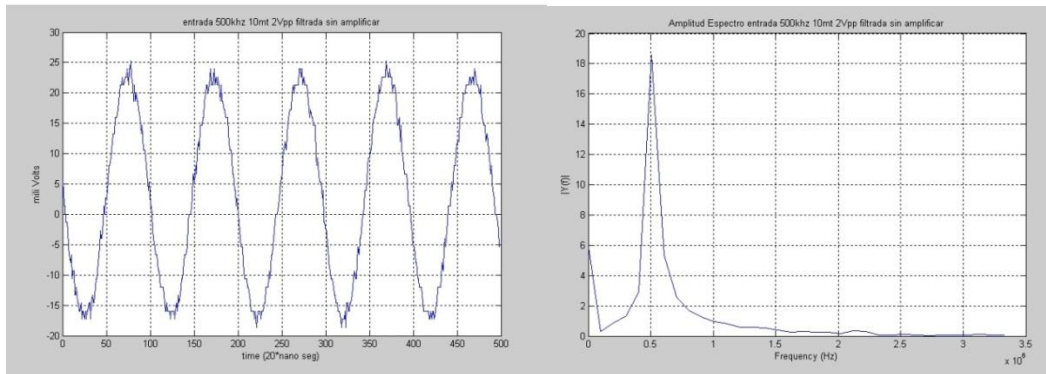
Figura 20. Señal sinusoidal 500KHz en los bornes del receptor y espectro en Fourier



Fuente: Autores.

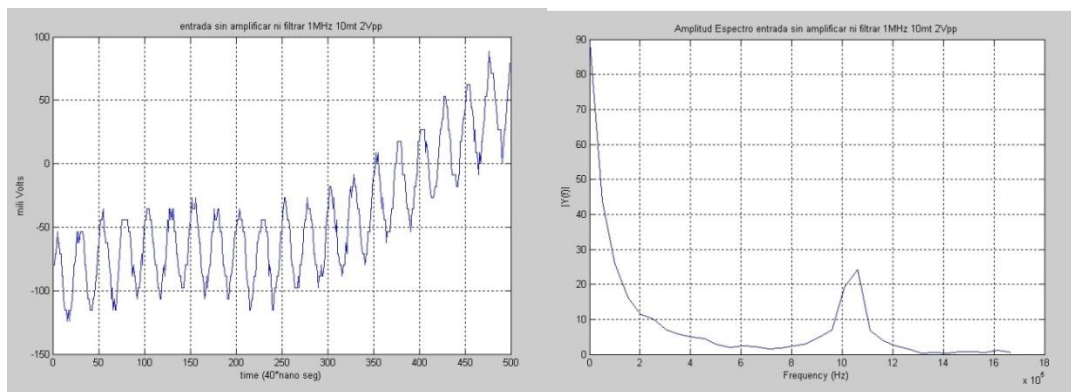
En la **Figura 20** puede apreciarse la señal en los bornes del receptor y su respectivo análisis en Fourier, aunque no se aprecia un pico en la frecuencia de 500KHz producto de la resolución del instrumento de medida, dicha señal pudo ser amplificada, filtrada y demodulada posteriormente. A diferencia de la señal rectangular que requiere una amplitud de 10Vp, la señal sinusoidal requiere solamente 2Vpp.

Figura 21. Señal sinusoidal 500KHz filtrada y espectro en Fourier



Fuente: Autores.

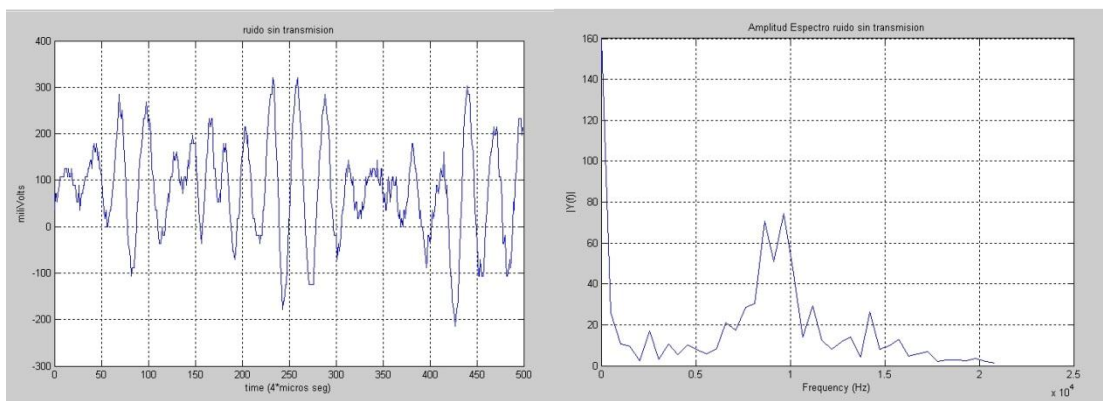
Figura 22. Señal sinusoidal 1MHz en los bornes del receptor y espectro en Fourier



Fuente: Autores.

Al incrementar la frecuencia el comportamiento de la señal es más inmune al ruido, tal como puede apreciarse en la **Figura 22** donde el instrumento de medida pudo detectar la frecuencia de 1MHz para su posterior análisis en Fourier. Para poder determinar la mejor opción para la transmisión de datos a través de la red, se requiere analizar el medio sin la señal de transmisión, aunque dicho comportamiento difiere en el tiempo.

Figura 23. Señal de la red eléctrica en los bornes del receptor

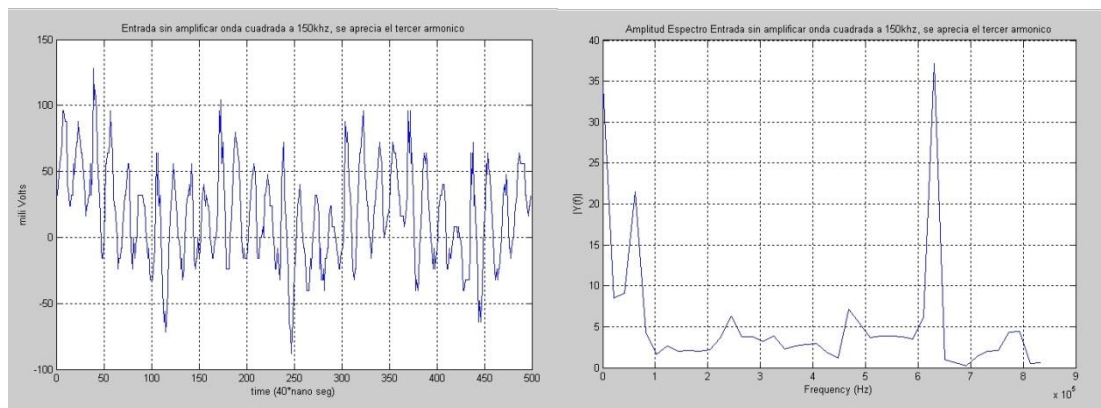


Fuente: Autores.

En el análisis de Fourier de la **Figura 23** se aprecian varios componentes de frecuencias del ruido presente en la red, por lo que la forma de transmisión de datos es más dependiente de la forma de onda que de la frecuencia a utilizar

Por último, se apreció un aspecto importante en la transmisión de datos por onda rectangular, y es el reconocimiento de su tercer armónico en el espectro de Fourier, el cual puede procesarse y demodularse posteriormente, aunque el voltaje de salida del transmisor tuvo que ajustarse a un valor superior a los 12Vpp para su generación.

Figura 24. Señal en los bornes del receptor de forma de onda rectangular



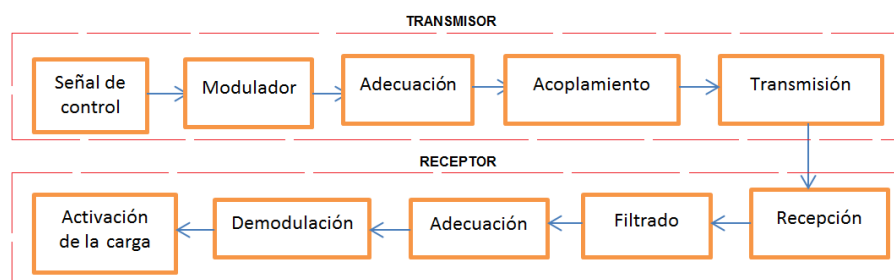
Fuente: Autores.

Dado el anterior análisis, se concluye que la mejor forma de transmitir los datos es en forma de onda sinusoidal en frecuencias mayores a 500KHz ya que se puede transmitir a menor amplitud de voltaje de salida del transmisor y alcanza mayores distancias.

2.3 Diseño del sistema de control PLC por modulación ASK y FSK

El diseño del sistema se puede dividir en varias etapas, las cuales presentan consideraciones importantes para el correcto funcionamiento del sistema, estas etapas son:

Figura 25. Etapas del sistema de control



Fuente: Autores

Señal de control: Para el sistema se utilizó como interfaz la tarjeta Arduino UNO como generador de la señal de control que es basado en comandos de código ASCII para la señal de activación y desactivación. Para la conexión a una red Ethernet se utilizó la tarjeta Arduino Ethernet Shield que contiene un microcontrolador ATmega 328, con 14 entradas y/o salidas digitales, 6 entradas analógicas, un cristal oscilador de 16 MHz, un conector RJ 45, una ranura para tarjeta SD y un plug de conexión USB para la alimentación.

Modulador: El circuito modulador para FSK es el XR-2206, un generador de funciones monolítico, capaz de producir señales sinusoidales, triangulares, cuadradas y pulsos con gran estabilidad y precisión. Entre sus aplicaciones se encuentran la generación de formas de onda, generación de modulaciones AM y FM, conversor voltaje-frecuencia y generador de modulación FSK. El rango de frecuencias es desde 0.01 Hz hasta 1 MHz. Las frecuencias de espacio y marca se generan a partir de una formula sencilla ($1/R_{M,S} * C$) Siendo $R_{M,S}$ resistencias conectadas a los pines 7 y 8 respectivamente y C un condensador entre los pines 5 y 6 del circuito integrado.

Para el modulador ASK, se utilizó un circuito diseñado por los autores que consiste en un oscilador con el amplificador operacional TL084, que es accionado por un transistor BJT el cual se acciona con la señal proveniente del microcontrolador.

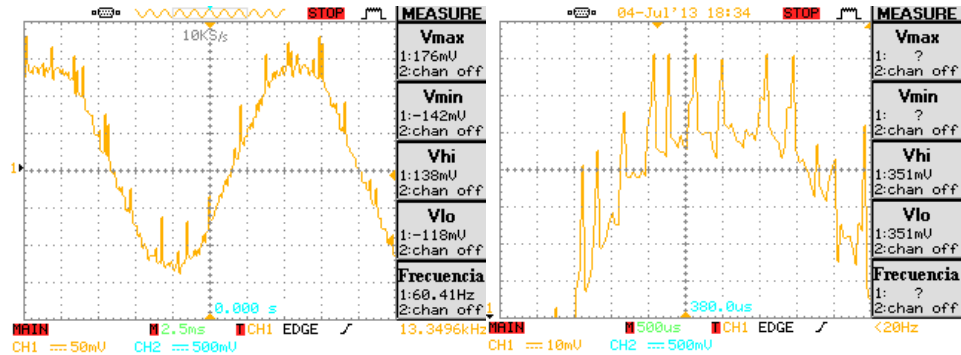
Adecuación: Para la etapa de adecuación de señal se utilizó el circuito integrado CD4050, un buffer no inversor que recibe la señal proveniente del modulador XR-2206 y la amplifica y convierte en una señal cuadrada a la amplitud de la alimentación del Buffer. Por otra parte la etapa de potencia se encarga de aislar las etapas anteriores y añadir la corriente necesaria para la inserción de la señal a la red eléctrica. Se tiene dos tipos de transistores, los MOSFET y los BJT. Por eficiencia de conmutación los BJT presentan mayor desempeño, menor señal de alta frecuencia que genera ruido adicional al presente en la red dificultando la demodulación.

Acoplamiento: Para poder acoplar de forma segura la onda modulada a la red eléctrica, se usa un arreglo de condensadores de 0,1 microfarads en lugar de bobinas de acople debido al incremento en los retardos y la tasa de error total (TER) [6], y una resistencia de 15Ω y 20 Watts de potencia entre el emisor y tierra del circuito, asegurando un paso de corriente suficiente del circuito a la red eléctrica sin retornos.

Transmisión: Una vez acoplado el circuito a la red eléctrica se procedió a la inserción de la señal modulada, y verificar el transporte de ésta por la red eléctrica. Para poder visualizar la señal se utilizó el osciloscopio Gwinsteck gds 2062 sin conectar el terminal de tierra, teniendo previamente identificada la fase y neutro de la línea de transmisión, de esta manera es posible usar el

osciloscopio en modo flotante. Para visualizar la señal modulada en la red eléctrica es necesario un divisor de tensión, por lo cual la señal visualizada es una réplica a escala de la señal de 120 V. La señal modulada superpuesta a la señal de 60 Hz es la siguiente:

Figura 26. Señal de modulación sobre la señal de 60Hz



Fuente: Autores

En las imágenes de la **Figura 26** se puede apreciar la onda de voltaje de 60 Hz y los picos mostrados en la derecha de la señal de información, dichas pruebas fueron realizadas a una frecuencia cercana a los 5 KHz para verificar la transmisión de datos por la red.

Recepción: Una vez verificada la transmisión es necesario probar el sistema a una mayor frecuencia para determinar el límite superior de envío de datos y es muy dependiente de la etapa de potencia y el ruido presente en el medio de transmisión.

Filtrado: El objetivo de esta etapa es eliminar todas las frecuencias que se encuentren fuera de las utilizadas en la modulación FSK y ASK. Dichas frecuencias son el producto de diversos tipos de ruidos y son nocivas para el correcto funcionamiento del demodulador. Se optó por un filtro pasivo pasa banda LC con ganancia 1.

Adecuación: La adecuación de la señal es el resultado del óptimo filtrado pasa banda, y es amplificada en tres etapas conectadas en cascada cada una con un valor de amplificación de 10. El amplificador operacional utilizado es el TL084.

Demodulación: Esta etapa es una de las más importantes, y es realizada por medio del circuito integrado XR-2211 para la modulación FSK, que es usado en aplicaciones como identificador de llamadas, sincronizador de datos, decodificador de tonos, detector de FM y demodulador FSK. Demodula señales con frecuencias desde 0.01 Hz hasta 300 KHz, a una amplitud desde 10mV

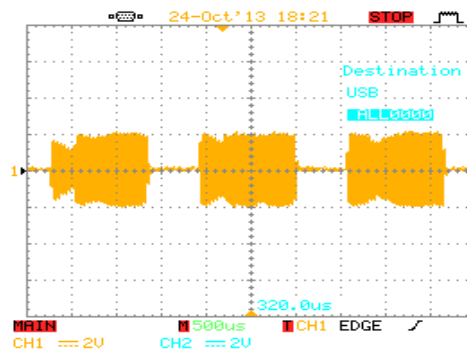
hasta 20 V. Un aspecto importante en el diseño son los baudios que puede procesar el XR-2211 ya que se ha diseñado el sistema a una velocidad de 4800 Baudios, mucho mayor que los baudios que puede procesar los dispositivos de protocolo X-10.

La demodulación ASK es realizada por el circuito integrado LM567, cuyo principio de funcionamiento es el de los PLL's.

Activación de la carga: Las frecuencias demoduladas pasan a ser datos que son interpretados por un microcontrolador ATmega 328 que los convierte en señales digitales de activación si dichos datos de entrada cumplen con la programación del microcontrolador. La señal de salida tiene valores de 0 y 5 V que se utilizan para la activación de una etapa de potencia.

Una vez puestos en prueba ambos esquemas de modulación se tuvo un limitante en el modulador FSK, debido a la frecuencia máxima de operación del demodulador XR2211 que es de 300KHz, [15] lo cual limita el uso de la forma de onda sinusoidal para frecuencias mayores a 500KHz, por lo que la modulación ASK presenta un mejor desempeño a altas frecuencias. Al realizar las pruebas de transmisión y recepción del modulador ASK se puede apreciar la señal demodulada.

Figura 27. Señal ASK en el receptor



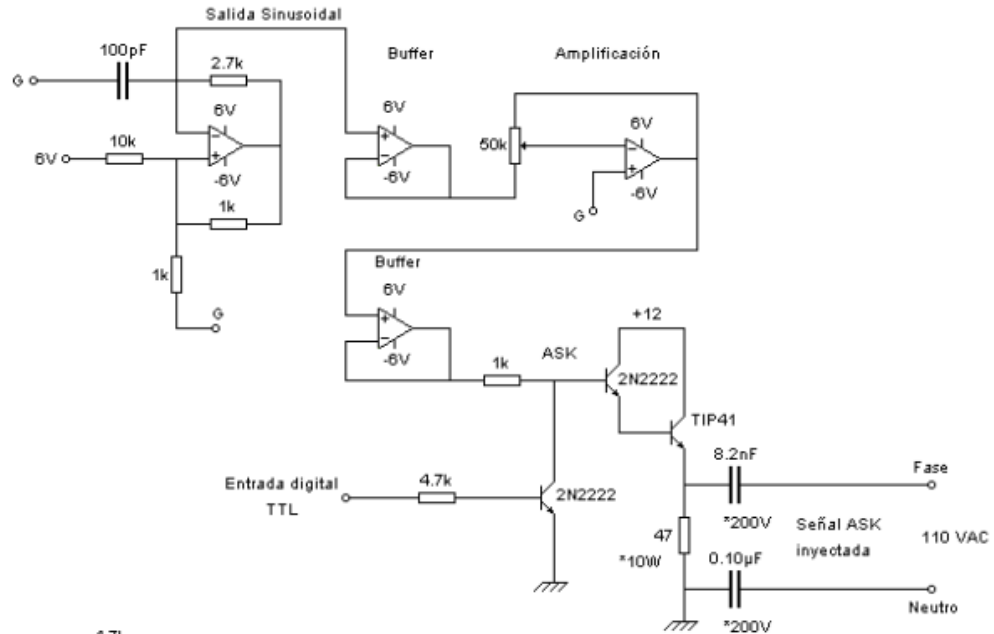
Fuente: Autores

2.4 Implementación del sistema de control PLC por modulación ASK

Una vez expuestas las partes del sistema de control y los dos esquemas de modulación puestos a prueba, se procede al montaje del sistema de control con los elementos seleccionados. El sistema implementado fue primeramente instalado en el laboratorio 206 del edificio de LAT.

2.4.1 Circuito Transmisor ASK

Figura 28. Circuito modulador ASK



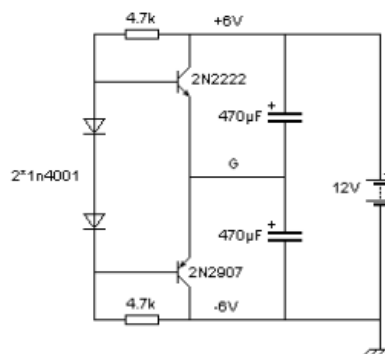
Fuente: Autores

Para el circuito transmisor ASK se construyeron dos fuentes de voltaje, una dual para la alimentación del amplificador operacional TL084 y una de 5 Volts para alimentar la tarjeta Arduino UNO.

2.4.1.1 Fuente dual para transmisor ASK

Para poder alimentar correctamente el amplificador operacional, se utilizó una configuración de transistores NPN (2N2222) y PNP (2N2907), diodos rectificadores 1N4004, resistencias de 4,7 Kilo-ohm y condensadores electrolíticos de 470 uF -16 Volts que crean una tierra virtual (G) entre los bornes de la alimentación principal y según su construcción puede resultar en una fuente simétrica o asimétrica dependiendo de los valores de las resistencias.

Figura 29. Fuente dual para el oscilador



Fuente: Autores

2.4.1.2 Fuente de 5 Volts DC para la tarjeta Arduino UNO

La tarjeta Arduino UNO requiere una alimentación de 5 Volts DC para su correcto funcionamiento, y la tierra del circuito debe ser la misma que la de la tarjeta Arduino UNO, es por eso que se utilizó un regulador LM7805 para su construcción. Éste es capaz de regular la tensión de salida a 4,87 Vdc con un voltaje de entrada superior a 6,2 Vdc.

2.4.2 Señal de control del transmisor ASK

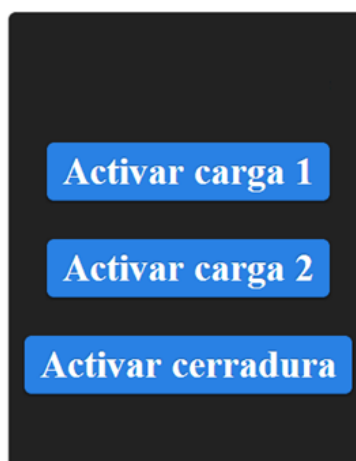
El circuito transmisor puede ser activado con una señal digital, dicha señal es proveniente de la tarjeta Arduino UNO que a su vez se accede a ella mediante una dirección IP por medio de la tarjeta Arduino Ethernet Shield. está basada en el chip ethernet Wiznet W5100 . El Wiznet W5100 provee de una pila de red IP capaz de TCP y UDP. Soporta hasta cuatro conexiones de sockets simultáneas

Figura 30. Tarjetas Arduino UNO (abajo) y Arduino Ethernet Shield



Fuente: Autores

Figura 31. Interfaz para activar el transmisor desde una dirección IP

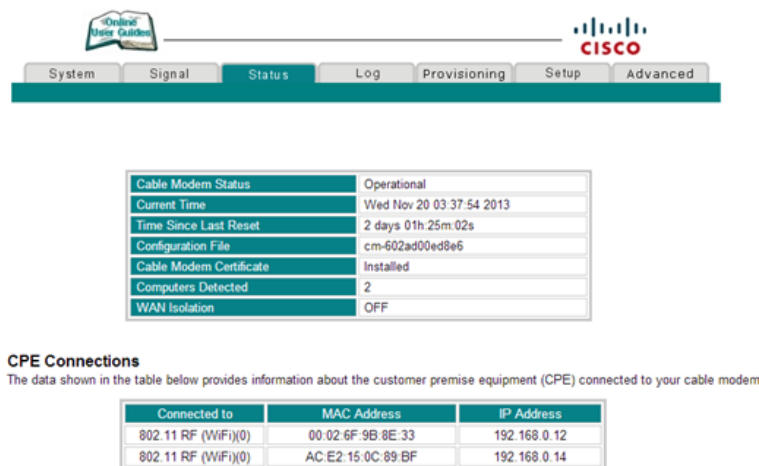


Fuente: [17]

La interfaz mostrada en la **Figura 29** comprende tres links, dos de ellos activan el transmisor de manera continua como el comportamiento de un interruptor normal y el tercer link “Activar cerradura” manda un pulso de corta duración que activa por un breve periodo de tiempo el transmisor; este comportamiento es análogo al de un pulsador. Ésta interfaz junto con la librería para el compilador de Arduino están disponibles en el link mostrado en [17].

Para poder asignar una dirección IP a la tarjeta Arduino Ethernet Shield mediante la cual se pueda acceder desde una red LAN, se conectó un router CISCO DPC2425 y se accedió a él mediante la dirección IP 192.168.0.1. La página muestra las características del router así como los dispositivos que se encuentran conectados a éste ya sea inalámbricamente o por cable UTP. **En el Anexo B** se muestra el código usado para programar las tarjetas Arduino, en el código se especifica la dirección IP para la tarjeta, la única condición es que no coincida el primer octeto con el de otro dispositivo conectado al mismo router.

Figura 32. Interfaz del router CISCO DPC2425 para asignar dirección IP a la tarjeta Arduino Ethernet Shield



Fuente: Autores

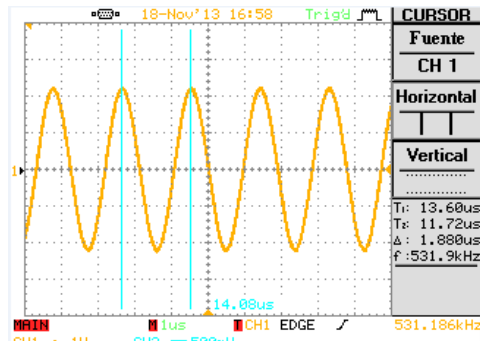
2.4.3 Oscilador y amplificador

El modulador ASK es básicamente un oscilador ajustado a la frecuencia de operación de 531 KHz y cuya activación es debida a la señal digital de las tarjetas Arduino. La etapa que genera esta onda sinusoidal es una configuración *Schmitt Trigger* que genera una onda triangular y redondeada en los extremos, y luego el condensador la convierte en sinusoidal.

Para evitar la sobrecarga entre etapas de la señal, se implementaron etapas intermedias de *Buffers*, que aíslan la etapa anterior conservando su amplitud pero sin requerir corriente de etapas anteriores, lo que asegura que la señal no se distorsione a lo largo del circuito modulador ASK.

Para poder determinar la presencia de la señal fuera de los laboratorios de electrónica se añadió potenciómetro de 50 Kilo-ohm y un diodo LED el cual ilumina proporcionalmente a la amplitud de la sinusoidal generada en el oscilador. En la **Figura 31** se observa la señal generada por el oscilador.

Figura 33 Señal sinusoidal generada en el oscilador.

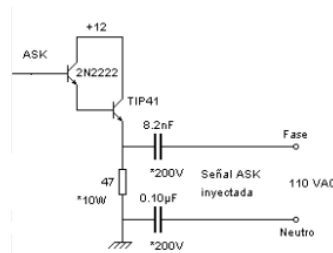


Fuente: Autores

2.4.4 Acople a la red eléctrica

Para poder acoplar el transmisor a la red eléctrica se utilizó una configuración de transistores *Darlington* para poder tener una gran ganancia de corriente impidiendo que cualquier componente de la señal de 60 Hz pueda afectar la señal sinusoidal para la transmisión.

Figura 34 Etapa de acople a la red eléctrica del transmisor ASK

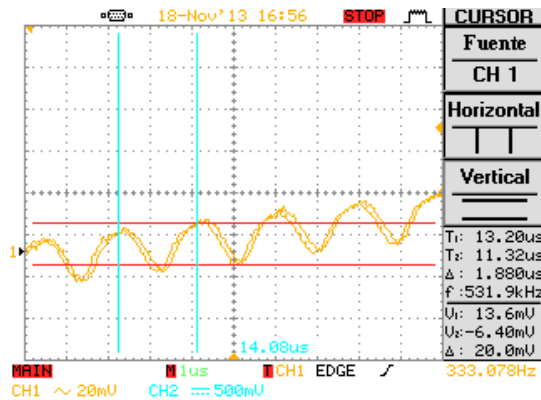


Fuente: Autores

Los dos condensadores actúan como un filtro pasa banda de alta frecuencia, suprimiendo la amplitud de la señal de 60 Hz y permitiendo el paso de la señal generada a la red. La resistencia de potencia permite el paso de la corriente generada por los transistores en configuración Darlington, lo que le da más potencia a la señal generada y que sea menos afectada por el ruido.

La señal inyectada a la red es posible visualizarla si se conecta un potenciómetro de 1 Mega-ohm en los bornes de la fase y neutro y el extremo de la sonda se ubica en el terminal variable del potenciómetro. El factor de atenuación es de 10, por lo que los valores de amplitud vistos en la **Figura 35** se deben multiplicar por 10 para determinar la amplitud a la cual viaja la señal ASK.

Figura 35. Señal ASK insertada en la red eléctrica

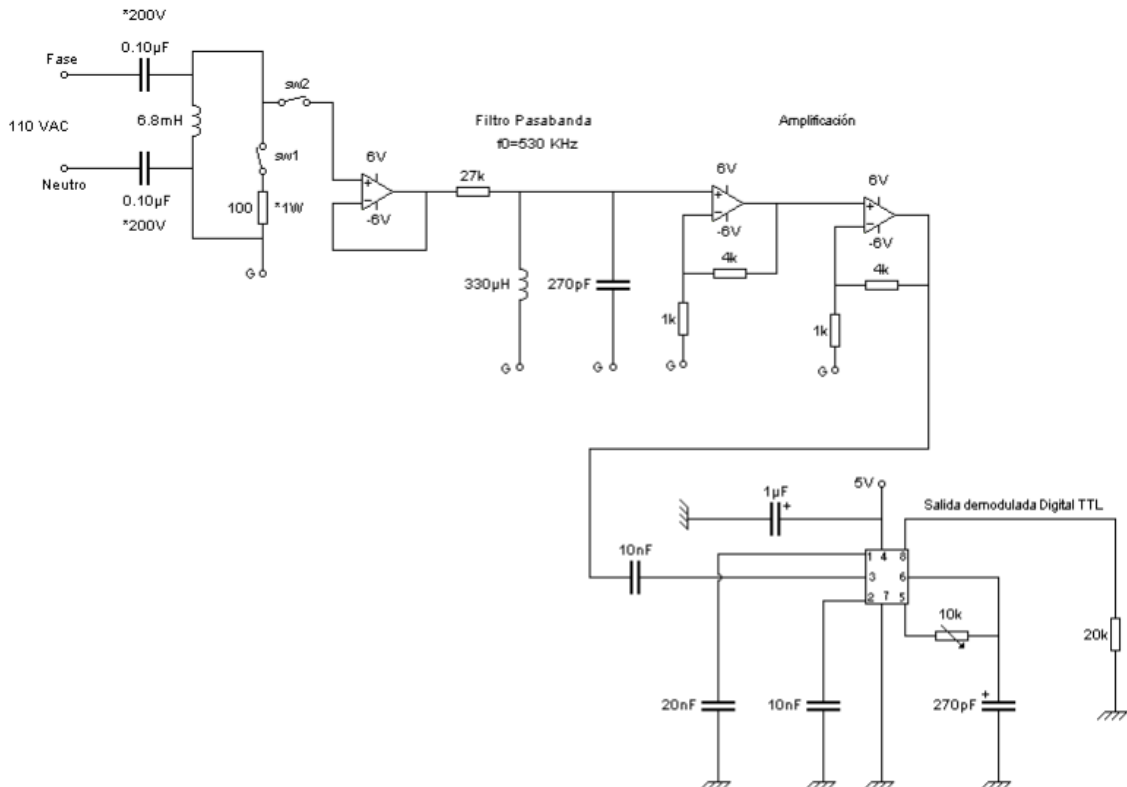


Fuente: Autores

2.4.5 Demodulador ASK

El demodulador ASK se encarga de extraer la señal sinusoidal de la red eléctrica y procesarla hasta convertirla en una señal digital para la activación de una carga, por medio de una etapa intermedia de transistores o de relés.

Figura 36. Circuito demodulador ASK

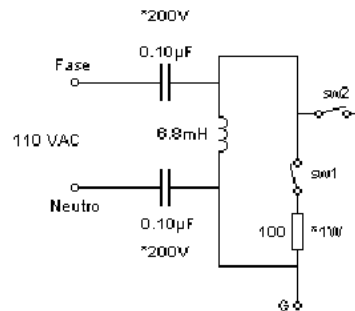


Fuente: Autores

En la **Figura 36** se aprecia el demodulador ASK diseñado por los autores. Como primera etapa se aprecia una red LC la cual recibe la señal de la red y

cuyo objetivo es atenuar la señal de 60 Hz. Para lograr este objetivo, los valores de la bobina y los capacitores han sido diseñados para atenuar las frecuencias bajas actuando como un filtro pasa alta.

Figura 37. Red LC del demodulador ASK



Fuente: Autores

Analizando el comportamiento de la red LC a la frecuencia de 60 Hz se tiene lo siguiente:

$$f=60\text{Hz} \quad \omega = 2 * \pi * 60 = 360\text{rad/seg}$$

$$Z_{bobina} = \omega L = \left(\frac{366\text{rad}}{s}\right) * 6.8 * 10^{-3}\text{H} = 2,4 \Omega \quad (2)$$

$$Z_{condensadores} = \frac{1}{\omega C} = \left(\frac{1}{366 * (0,1 * 10^{-6})}\right) = 27322,4 \Omega \quad (3)$$

Se puede ver según las ecuaciones (2) y (3) que los condensadores presentan una alta impedancia en serie con la señal, lo que atenúa severamente la señal de 60 Hz, sumado con una baja impedancia en paralelo de la bobina lo que origina un comportamiento semejante al de un cortocircuito, haciendo que la señal de 60 Hz no pueda casi penetrar más allá de esta etapa del circuito. Ahora analizando el comportamiento de la red LC a la frecuencia de operación del transmisor ASK (531 KHz) se presenta el siguiente análisis:

$$f=531 \text{ KHz} \quad \omega = 2 * \pi * 531000 = 3336371\text{rad/seg}$$

$$Z_{bobina} = \omega L = \left(\frac{3336371\text{rad}}{s}\right) * 6.8 * 10^{-3}\text{H} = 22678 \Omega \quad (4)$$

$$Z_{condensadores} = \frac{1}{\omega C} = \left(\frac{1}{333637 * (0,1 * 10^{-6})}\right) = 2,9 \Omega \quad (5)$$

De las ecuaciones (4) y (5) se puede apreciar que a la frecuencia de 531 KHz, las capacitancias presentan una impedancia muy baja lo que permite el paso

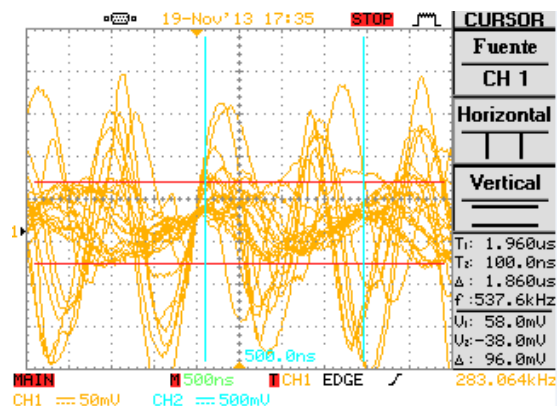
de la señal con poca atenuación, a su vez, la bobina presenta una alta impedancia por lo que la señal podrá seguir las otras etapas del circuito demodulador.

En las figuras 36 y 37 se pueden apreciar dos interruptores en la red LC, éstos fueron incluidos para proteger el circuito de los transitorios ocurridos en la conexión y desconexión del demodulador.

Para conectar el circuito a la red eléctrica, se debe cerrar el interruptor Sw1 y abrir el interruptor Sw2, lo que hace que el circuito quede conectado pero solo a una red RLC, con lo que se garantiza la descarga de los elementos inductivos y capacitivos, ya que la descarga ocurre en menos de un milisegundo. Una vez realizado este paso, se procede a cerrar el interruptor Sw2 lo que da paso a la señal a las otras etapas del circuito y el interruptor Sw1 debe abrirse para evitar una atenuación de la señal de llegada. Para desconectar el circuito de la red eléctrica se cierra el interruptor sw1 y después se abre el interruptor sw2 para evitar una sobretensión debido al corte abrupto de la energía en la bobina. Una vez hecho esto se procede a desconectar el circuito de la red eléctrica.

La señal que recibe el demodulador ASK de la red eléctrica presenta altos niveles de ruido como en los análisis de frecuencia y atenuación vistos anteriormente. Aun con altos niveles de ruido es posible distinguir la señal enviada del ruido, por lo que después podrá hacerse un filtrado y posterior amplificación.

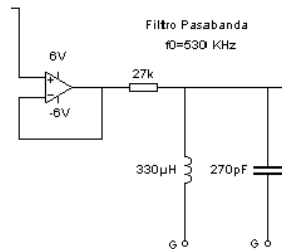
Figura 38. Señal en los bornes del demodulador ASK



Fuente: Autores

2.4.5.1 Filtro pasa banda del demodulador ASK

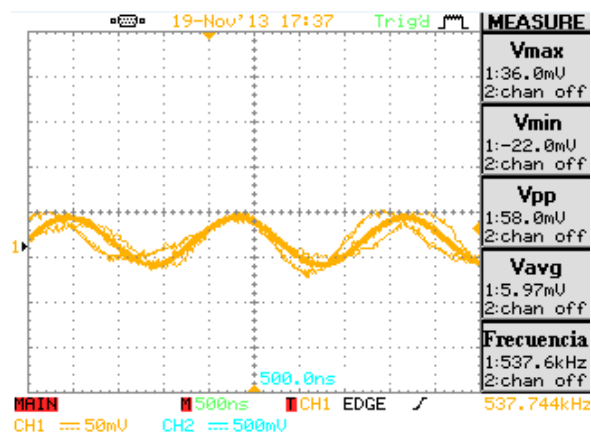
Figura 39. Filtro pasabanda del demodulador ASK



Fuente: Autores

El filtro pasa banda es el encargado de eliminar todos los componentes de frecuencia de la señal que no pertenezcan a la señal transmitida por el modulador ASK y tiene ganancia 1. Es precedido por una etapa de Buffer realizada con el amplificador operacional TL084, la cual separa las etapas del circuito sin perjudicar la señal. La **Figura 38** es la señal antes de pasar por el filtro pasa banda, mientras que la **Figura 40** muestra la señal después de haber pasado por este filtro.

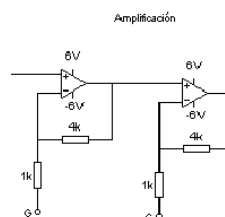
Figura 40. Señal de salida del filtro pasa banda



Fuente: Autores

2.4.5.2 Etapas de amplificación de demodulador ASK

Figura 41. Etapa de amplificación del demodulador ASK



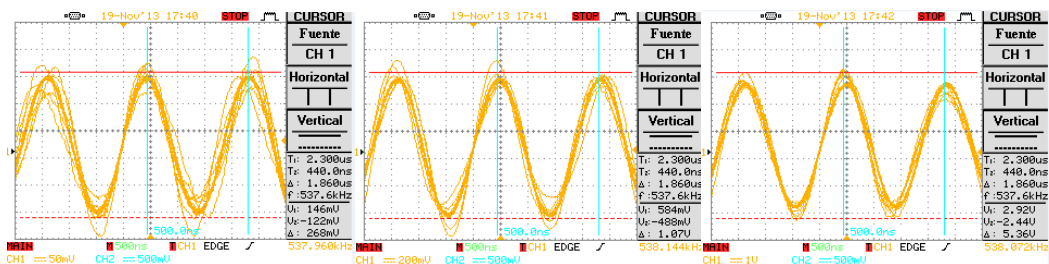
Fuente: Autores

Estas etapas fueron diseñadas para amplificar la señal proveniente del filtro pasabanda, y es realizada con el amplificador operacional TL084 en configuración no inversora, cuya fórmula de ganancia es:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

El circuito ha sido diseñado con ganancias cercanas a 5, ya que un nivel superior de ganancia satura la entrada del circuito LM567 y corre su ancho de banda

Figura 42. Señales de salida de las etapas de amplificación



Fuente: Autores

La **Figura 42** muestra las señales amplificadas de las tres etapas del demodulador. Aparentemente son de la misma amplitud, pero en la parte izquierda de cada una se aprecian las amplitudes de 268 mV, seguida de 1,07 V y 5,36 V.

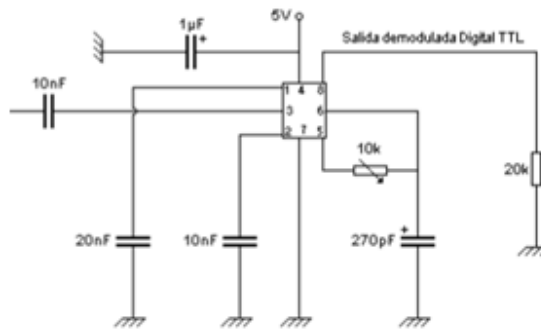
2.4.5.3 Demodulador LM 567

Esta etapa es la última del demodulador, y es realizada por el circuito integrado LM 567 el cual ha sido usado ampliamente como un oscilador de precisión, un decodificador de tonos, demodulador FSK y controles ultrasónicos. La frecuencia central se determina con una sencilla formula

$$f_0 = \frac{1}{1.1 * R_1 * C_1} \quad (7)$$

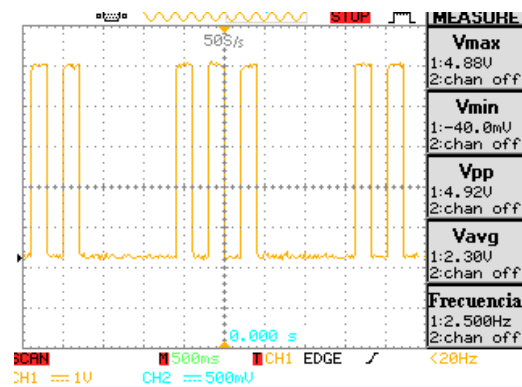
Donde R_1 es la resistencia entre los pines 5 y 6 del Im567 y C_1 es el condensador entre el pin 6 y tierra. Para poder apreciar su funcionamiento, se transmitió una serie de pulsos en la red y estos fueron demodulados por el LM 567.

Figura 43. Demodulador LM 567



Fuente: Autores

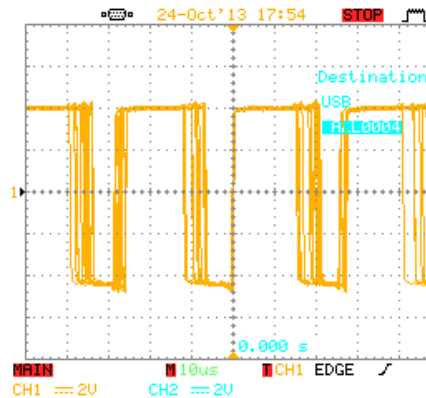
Figura 44. Señal de salida del LM 567



Fuente: Autores

Al transmitir datos a gran velocidad, se pudo apreciar el fenómeno de jitter, el cual es perjudicial para el sistema de control ya que crea inestabilidad y una lectura errónea de datos

Figura 45. Fenómeno de Jitter en el LM 567

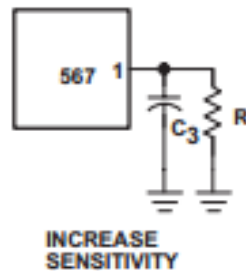


Fuente: Autores

Para incrementar la capacidad de detectar señales más pequeñas a la entrada del LM 567 (menores a 10 mV) y la velocidad de los datos se pueden realizar

unas modificaciones del circuito integrado. La figura 46 ilustra estas modificaciones:

Figura 46. Configuración para incremento de la sensibilidad



Fuente: [16]

2.5 Montaje del sistema de control PLC por modulación ASK

Figura 47. Montaje del transmisor con acceso a red LAN para la activación de cargas

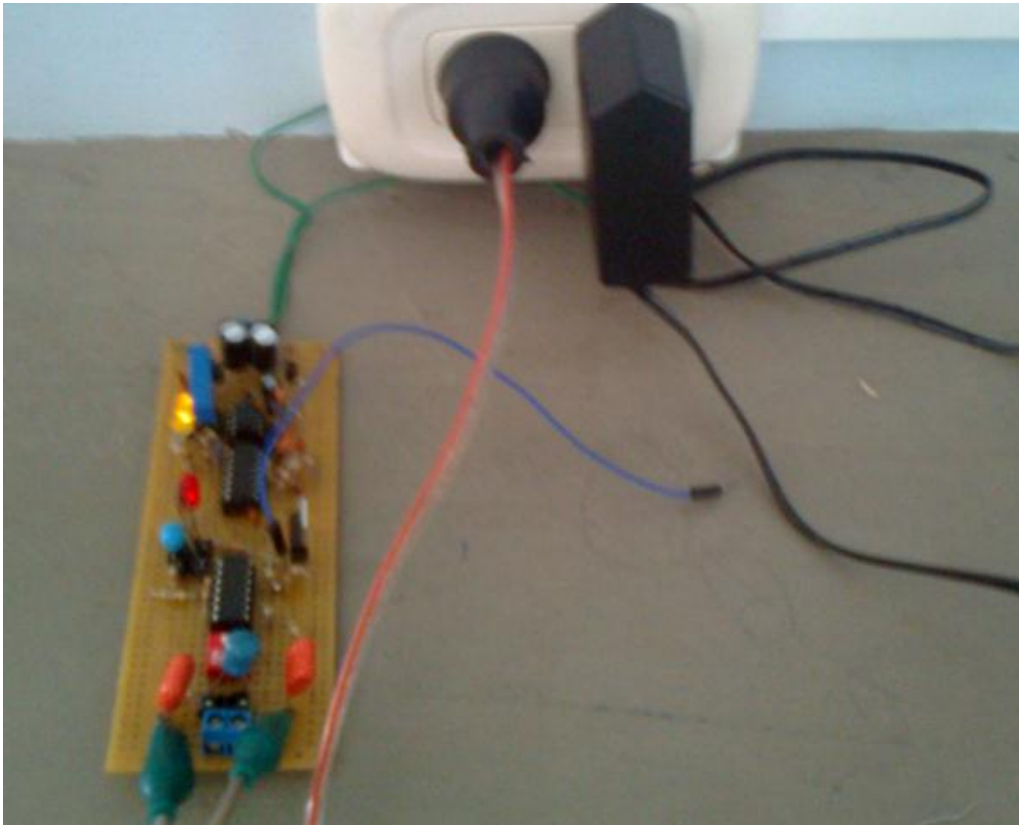


Fuente: Autores

El sistema mostrado anteriormente fue puesto a prueba tanto en el segundo piso de alta tensión llegando a todos los tomas conectados a la fase S, el sistema puede abarcar más distancias ya que solo se habilitó la segunda etapa amplificadora expuesta anteriormente. Además se realizaron pruebas en otros

edificios, aunque no se tiene acceso a los diagramas unifilares de los edificios, como el cuarto piso del edificio de Ingeniería Civil, es decir, el piso destinado a la escuela de Ingeniería de sistemas donde se pudo constatar que la señal llegaba como mínimo 70 metros y aun así no se había activado la tercera etapa de amplificación aunque con ausencia de cargas que inyectan ruido impulsivo como las fuentes de computador portátil. El sistema fue puesto a prueba por ultimo en residencias que constan de una sola fase en su acometida, llegando a todos los tomas sin ninguna dificultad. El área aproximada de las residencias a las cuales se les inyectó la señal es de más de $140m^2$ y de más de 40 años de antigüedad.

Figura 48. Montaje del sistema receptor



Fuente: Autores

Para poder recibir la señal transmitida, se tuvieron en cuenta las recomendaciones mencionadas en la etapa de la red LC del circuito receptor, con el fin de evitar daños en el circuito causados por efectos transitorios. Los sistemas fueron sometidos a diversos cambios a fin de garantizar un correcto funcionamiento y una larga vida útil. El diodo led rojo visto en la plaqueta del receptor indica la señal demodulada, por lo que es posible poner a prueba los equipos sin depender de instrumentos de medida.

CONCLUSIONES

Se analizó la tecnología PLC como tramo de última milla para el control de cargas desde una perspectiva global y se determinó el uso de modulación ASK sobre otros esquemas de modulación debido a la facilidad en adquisición de elementos para su generación, bajo costo de implementación, relativa inmunidad al ruido en comparación con las modulaciones de fase, y fácil modificación de las frecuencias a utilizar según el comportamiento del medio de transmisión. Ésta técnica de modulación requiere un bajo ancho de banda y se incrementa de acuerdo al número de equipos a controlar.

Las pruebas realizadas sobre el medio de transmisión determinaron la frecuencia máxima a utilizar para transmitir datos por la red, la cual excede los valores permitidos por las normas internacionales, en el caso de la norma CENELEC 50061-1, no fue posible ajustarse a las frecuencias expuestas en ésta norma, aunque si puede ser posible ajustarse en la amplitud máxima pero en ambientes menos hostiles comparados con un edificio que contiene motores eléctricos, equipos de cómputo, fuentes duales entre otros.

El uso de forma de onda cuadrada no es recomendable para transmitir la información debido a la cantidad de armónicos que inyecta a la red. La forma de onda cuadrada pierde gran cantidad de energía en el acople y la señal que viaja a través de la red presenta forma de impulsos los cuales pueden ser de igual o menor amplitud que el ruido impulsivo asíncrono dificultando su demodulación. En caso de presencia de alto ruido impulsivo se recomienda el uso de forma de onda sinusoidal por su baja pérdida en la inserción de la señal. Los condensadores usados para el acople derivan la señal del transmisor, por lo que la señal sinusoidal solo es desfasada 90° mientras que la señal rectangular se convierte en pulsos de gran amplitud.

La forma de onda rectangular requiere niveles de tensión más altos para su transmisión, y la forma más segura de detectar la información en el demodulador es a través de detectores de flancos especialmente de subida. La forma de onda sinusoidal requiere menores niveles de tensión y es menos susceptible al ruido a frecuencias mayores de 500KHz en el ambiente donde se desarrollaron las pruebas del presente trabajo de grado.

La aplicación de ésta tecnología en otros escenarios de la Universidad Industrial de Santander es una solución viable, innovadora y abre el espacio para nuevos grupos de investigación de esta tecnología en expansión y usar el material del presente trabajo de grado como base para la generación de nuevas propuestas tanto en expansión de aplicaciones como en nuevos esquemas de modulación.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el desarrollo del presente trabajo se usaron elementos accesibles en el mercado local para la implementación de la tecnología PLC, dichos elementos no han sido fabricados para la tecnología PLC por lo que ha sido necesario un procesamiento de la señal del receptor. Existen circuitos integrados diseñados especialmente para PLC por modulación FSK, aunque su costo es elevado y es necesaria la importación de los mismos. Para expandir las cargas a controlar en base al montaje circuital del presente trabajo de grado se requiere añadir el código correspondiente para cada carga a controlar, por lo que puede haber gran cantidad de cargas, pero sin controlar simultáneamente y cada orden enviada debe ser retenida por el sistema de potencia hasta que se envíe una orden diferente.

En el laboratorio 206 del edificio de Alta Tensión se observaron bancos de trabajo donde los tomas tienen la fase invertida, por lo que los equipos conectados a éstos corren peligro en caso de una descarga eléctrica. Los bancos que se recomienda revisar y cambiar la conexión son el 2, 4 y 5.

Se recomienda distanciar un mínimo de 5 metros el circuito transmisor del receptor, debido a que las frecuencias utilizadas para la modulación generan radiación electromagnética, que son leídas por el osciloscopio como señales de entrada por la línea eléctrica. En el desarrollo del presente trabajo de grado hubo varios inconvenientes y retrasos por no identificar este fenómeno con anterioridad.

Es necesario tener en cuenta la protección de los circuitos de transmisión y recepción contra los picos de voltaje ocasionados por la conexión y desconexión de la red eléctrica, lo cual genera transitorios que en el peor de los casos puede superar voltajes de 180Vp, y picos de corriente superiores a 10A. El uso de diodos *SVT* probó ser una opción viable para proteger los equipos, así como el aislamiento de las etapas de cada circuito con *Buffers*.

Para continuar con la investigación de la tecnología PLC en otros ambientes de la universidad, se puede proceder con la modulación 8PSK, la cual promete mayor inmunidad al ruido y mayores distancias en los productos que se están desarrollando.

REFERENCIAS

- [1] ARTALE Giovanni, CONSENTINO Valentina, Medium Voltage Smart Grid: Experimental Analysis of Secondary Substation Narrow Band Power Line Communication. Journal, IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, pp.1-8, 2013.
- [2] MUHAMAD Salman Yousuf, MUSTAFA El-Shafei, “ Power Line Communications: An overview- Part I”. Publicación IEEE, pp. 218-222, 2008.
- [3] ECHEVERRY David, MADERA Víctor, “PLC (Power Line Comunicación)”, Trabajo de investigación. Medellín, Antioquia. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. 2008. 59p
- [4] VALLBÈ Balcells, “Immunity of power line communications (PLC) in disturbed networks”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 1621-1625, Junio 2011.
- [5] Manual de Gateway PLC Corinex [Internet] Disponible: <http://mm.corinex.com/Products/Access%20Products/Corinex%20Low%20Voltage%20Access%20Gateway/manual/manual%20Corinex%20Low%20Voltage%20Access%20Gateway%20ENG.pdf> Fecha de consulta: 06-VII-2013
- [6] JAIMES Laura Liliana , FLOREZ Ovidio Alfonso “Evaluación de Desempeño de las Tecnologías Power Line Carrier (Plc) y Wireless Lan para la Implementación al Prototipo de Sistema Metropolitano de Telemetría para la Monitorización de Parámetros Eléctricos en las Redes de Distribución de Media y Baja Tensión”, Tesis de ingeniería, Universidad Industrial de Santander, 2010
- [7] TRICHAKIS Dimosthenis, CHOUSIDIS Christos, “Power Line Network Automation Over IP”, International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU), pp. 239-244, 2012
- [8] HERNÁNDEZ Glenn, DÍAZ Mabel, “Evolución y Desarrollo de la Tecnología Power Line Carrier en Colombia y en el Mundo” Tesis de Especialización en Telecomunicaciones, Universidad Pontificia Bolivariana, 2008.
- [9] LINYU Wang, KRISTOFSLEURS Dagangu, GEERT Deconinck, EMMANUEL Vanui “Performance Analysis of MAC Layer Protocols in Access BPL for Power Grid Monitoring and Control”, publicación, 44th

International Universities Power Engineering Conference (UPEC) , pp.1-5,2009.

[10] HERNANDEZ Glenn, “Análisis del modelo de multitrayectoria en canales Power Line Carrier”, publicación, Revista GTI, vol.8, No.20, pp 55-65, 2009.

[11] ACEVEDO Efrén Darío, CASTAÑEDA Wilson Giovanni “Reflectometría en el dominio del tiempo”, reporte técnico, Universidad Industrial de Santander, 2013.

[12] PLL Lazos de Fijación de Fase [Internet] Disponible: <http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/pll.pdf> fecha de consulta: 28-VII-2013

[13] PAEZ Hernán, “Sistema de comunicación de Datos a través de la Red Eléctrica Domiciliaria”, publicación, Revista de ingeniería Universidad de los Andes, vol.18, pp. 136-147.

[14] ARDILA Oscar, BELTRAN Guillermo, PACHECO Jesús María, “Levantamiento, Revisión y Rediseño de la Red Eléctrica de los Edificios de: Ingeniería Industrial, Eléctrica y Electrónica, Talleres de Diseño, Laboratorios de Alta Tensión e Hidráulica”, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2008.

[15]XR2211 Datasheet [Internet]
http://www.jaycar.com.au/images_uploaded/XR2211V3.PDF. Fecha de consulta: 18-XI-2013

[16]NE567 [Internet]
<http://www.sonoma.edu/users/m/marivani/datasheets/misc/NE567.pdf> Fecha de Consulta: 14-XI-2013

[17] Ejemplo interfaz Arduino Ethernet [Internet]
<http://www.seriallink.com.br/forum/viewtopic.php?f=90&t=2016#.UpYaXNLuLbE>
Fecha de Consulta: 27-XI-2013

ANEXOS

A. MODULACIONES EMPLEADAS EN LA TECNOLOGÍA PLC

MODULACIÓN DIGITAL DE AMPLITUD (ASK)

Es la técnica de modulación digital más sencilla y se define como una modulación de amplitud con portadora completa y doble banda lateral. La ecuación que define el comportamiento de ésta modulación es:

$$V_{am}(t) = [1 + V_m(t)] \left[\frac{A}{2} \cos(\omega c t) \right]$$

Siendo $V_{am}(t)$ = Voltaje de onda de amplitud modulada

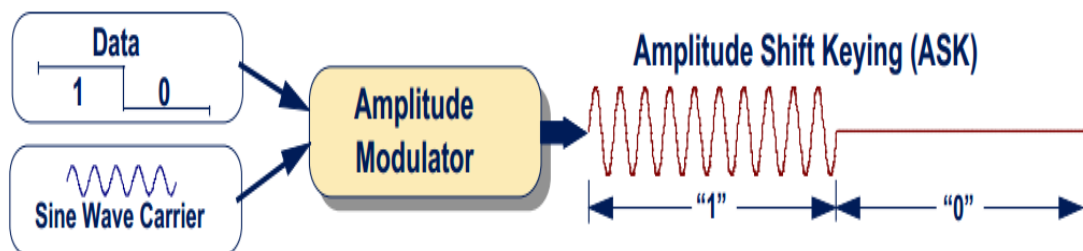
$V_m(t)$ = Señal binaria moduladora en volts

$\frac{A}{2}$ = Amplitud de la portadora no modulada en volts

ωc = frecuencia de la portadora en radianes por segundo.

La ecuación es válida si $V_m(t)$ es una forma de onda binaria normalizada, es decir, +1[V] es el "1" lógico y -1[V] es el "0" lógico. A esta modulación se le conoce como manipulación por encendido-apagado ó OOK (*On-Off Keying*) ya que la portadora o está encendida o apagada, no hay más estados.

Figura B.1. Modulación ASK



El uso de portadoras analógicas de amplitud modulada para transportar información digital es un tipo de radio digital de baja calidad y bajo costo y su uso es muy limitado en sistemas de comunicación de gran capacidad y eficiencia.

MODULACIÓN DIGITAL POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA (FSK)

Es otro tipo de modulación digital relativamente sencillo y de poca eficiencia para sistemas de comunicación de gran velocidad. La FSK binaria es una forma de modulación de ángulo, de amplitud constante, en la que la señal moduladora es una señal binaria que varía entre dos

valores discretos de voltaje, y no es una forma de onda analógica que cambie continuamente. La ecuación que describe el comportamiento de la modulación FSK es:

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

Siendo V_{fsk} = forma de onda binaria FSK

V_c = amplitud de la portadora en volts

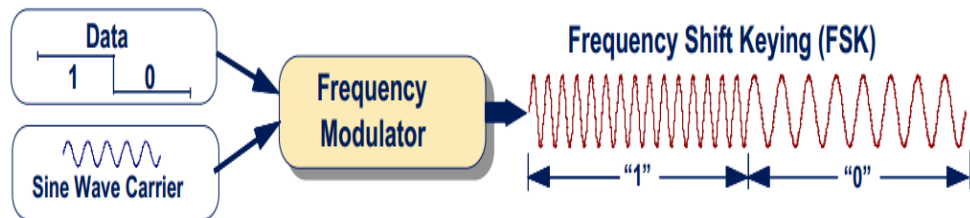
f_c = frecuencia central de la portadora en Hertz

Δf = desviación máxima de la frecuencia en Hertz

$V_m(t)$ = señal moduladora de entrada binaria (± 1)

El corrimiento máximo de frecuencia portadora es proporcional a la amplitud y a la polaridad de la señal binaria de entrada. La frecuencia de salida se desplaza entre dos frecuencias, frecuencia de marca f_m o frecuencia de "1" lógico y frecuencia de espacio f_s o frecuencia de "0" lógico. Dichas frecuencias están separadas de la frecuencia de portadora por la desviación máxima de frecuencia, es decir, $f_c \pm \Delta f$.

Figura B.2. Modulación FSK



Rapidez de bits FSK y Baudios: En la modulación FSK, cada vez que cambia el estado lógico de la entrada, cambia la frecuencia a la salida, por lo que la rapidez de cambio a la salida es igual a la rapidez de cambio a la entrada. La rapidez de cambio de la entrada del modulador se denomina frecuencia de bits, o rapidez de transferencia de bits f_b y tiene unidades de bits por segundo (bps). La rapidez de cambio de la salida se denomina baudio, que es una rapidez de cambio y es igual al recíproco del tiempo de un elemento de señalización en la salida, y en FSK dicho tiempo es igual al tiempo de un solo bit t_b ; en conclusión, la rapidez de entrada y los baudios son iguales. El ancho de banda mínimo en Hertz B se halla conociendo la frecuencia de marca f_m , la frecuencia de espacio f_s y la frecuencia de cambio de salida f_b que es el inverso de t_b de la siguiente manera:

$$B = (|f_s - f_m|) + 2f_b$$

MODULACIÓN DIGITAL POR DESPLAZAMIENTO DE MÚLTIPLES FRECUENCIAS (MFSK)

Esta modulación es una expansión de la modulación FSK, en la que el término "M" antepuesto es un término derivado de la palabra binario (*M-ary en inglés*). M es un solo dígito que representa la cantidad de combinaciones o condiciones posibles para una cantidad de variables binarias. En la modulación FSK solo se tenía en consideración dos posibles estados a la entrada, es decir, el sistema FSK es un sistema MFSK con $M=2$. La ecuación que define la señal transmitida es la siguiente:

$$s(t)_{MFSK} = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left[\frac{\pi}{T}(n_c + i)t\right], 0 \leq t \leq T$$

Siendo $i=1,2,3,..M$ y $f_c = \frac{n_c}{2T}$

Los símbolos transmitidos tienen igual duración T e igual energía E . Siempre y cuando las frecuencias estén separadas cada $(\frac{1}{2}T)$ Hz las señales transmitidas de la ecuación son ortogonales entre sí. Un receptor óptimo para el sistema MFSK consiste en un banco de filtros en paralelo sintonizados a las frecuencias usadas en el modulador. El ancho de banda B esta dado por la siguiente ecuación:

$$B = \frac{M}{2T}$$

La eficiencia del ancho de banda ρ se determina por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{2 \log_2 M}{M}$$

Cuando se incrementa el número de niveles M se tiende al decremento de la eficiencia del ancho de banda, por lo que la modulación MFSK es espectralmente ineficiente. En la siguiente tabla se muestran los valores de la eficiencia del ancho de banda con respecto a los niveles M .

Tabla B.1. Eficiencia de ancho de banda para modulación MFSK

M	2	4	8	16	32	64
ρ (bits/s/Hz)	1	1	0.75	0.5	0.3125	0.1875

MODULACIÓN DIGITAL POR DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK)

Es otra forma de modulación digital angular de amplitud constante. Son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia portadora. Una fase de salida representa el "1" lógico y otra fase de salida representa el "0" lógico. Cuando la señal cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre dos ángulos desfasados 180°. La ecuación que caracteriza la salida del modulador es:

$$Salida_{BPSK} = [\text{sen}(2\pi f_a t)] * [\text{sen}(2\pi f_c t)]$$

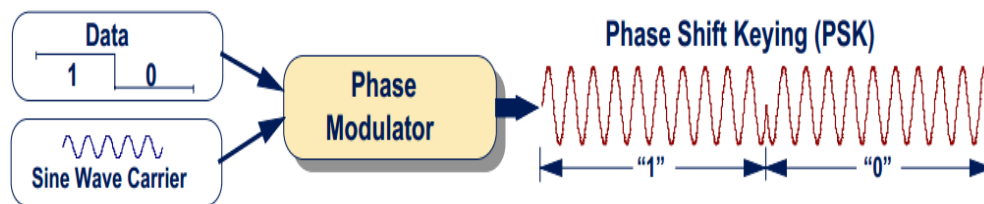
Siendo f_a = frecuencia fundamental máxima de la entrada binaria en Hertz

f_c = frecuencia de portadora de referencia en Hertz

Un modulador balanceado es un modulador de producto en el que la señal de salida es el producto de dos señales de entrada. La tasa de cambio de la salida (baudios) es igual a la tasa de cambio de la entrada (bps) y el ancho de banda máximo de la salida se presenta cuando los datos binarios de la entrada son una secuencia de "1" y "0" alternados.

$$B = \frac{2f_b}{2} = f_b$$

Figura B.3. Modulación PSK



Para un mayor número de estados de la entrada, es decir, $M > 2$, el ancho de banda para PSK es:

$$B = \frac{f_b}{\log_2 M}$$

Dado que una señal sinusoidal presenta infinitud de fases, y cada una de estas tiene un valor de amplitud, se han desarrollado moduladores MPSK con $M=4, 8$ y 16 , que en este caso resulta en 16 fases de salida, cada una distanciada $22,5^\circ$ y cada condición de entrada varía solo en un bit. Una señal 16-PSK puede sufrir un desplazamiento de fase de hasta $\pm 11.25^\circ$ durante su transmisión y seguir reteniendo su integridad aunque es muy susceptible a irregularidades en el medio de transmisión ya que una fuente de ruido introduce un nivel de amplitud diferente que se interpretará erróneamente en el receptor, por esta causa, ésta transmisión en poco usada.

MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO MINIMO (MSK)

La modulación MSK consiste básicamente en una modulación FSK con control preciso de unos parámetros, como la frecuencia de la portadora, que ahora es de $\frac{1}{4}$ de la velocidad de transmisión, la fase de la portadora varía 90° durante cada periodo de transmisión, la amplitud de la señal es constante y el ancho de banda es levemente menor que BPSK.

Un inconveniente de MSK es que se producen varias bandas laterales indeseadas, que ensanchan el espectro de la señal. Si se utiliza MSK filtrada con filtros pasa banda, para eliminar las bandas laterales indeseadas, la fase de la portadora no varía exactamente en 90° y la amplitud se mantiene constante.

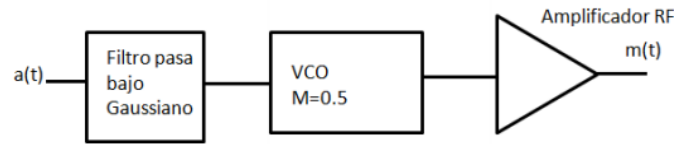
Una buena manera de sobrepasar los inconvenientes es con la inserción de un filtro gaussiano, lo que reduce aún más el espectro pero incrementa la inmunidad a interferencias de la señal. Con este modulador se logra suavizar las transiciones de fase entre estados de la señal con lo que se reducen los requerimientos de ancho de banda. En la modulación GMSK los bits de entrada ± 1 , son ahora transformados en pulsos gaussianos (forma de campana) para posteriormente ser suavizados por un modulador de frecuencia.

La duración de un pulso gaussiano es ligeramente mayor a la de un bit, lo que da lugar a un fenómeno conocido como interferencia inter-simbólica ISI y se determina con el producto entre el ancho de banda del filtro gaussiano y la duración de un bit BT . Cuanto menor sea el producto BT mayor será el solapamiento entre pulsos gaussianos. Resultado de esto es una señal continua en fase lo que requiere de menor ancho de banda pero requiere un mayor trabajo de los demoduladores debido a la escasa diferencia entre fases y su difícil identificación. El uso más común de esta técnica de modulación es sistemas de navegación aeronáutica y en las redes de celulares GSM ya que el poco ancho de banda requerido permite un mayor número de celulares con un espaciamiento en frecuencia menor.

Para generar una modulación de GMSK existen dos métodos, por medio de la modulación FSK o la modulación QPSK (MPSK con $M=4$). Con FSK es necesario el uso de un oscilador

Controlado por Voltaje VCO que genera los desplazamientos en frecuencia. La **Figura B.4** ilustra la generación de una señal GMSK

Figura B.4. Generación de modulador GMSK con un modulador FSK



El inconveniente de generar una modulación con FSK es que el factor de desviación de la frecuencia del VCO debe ser exactamente de 0,5 pero los VCO son altamente dependientes de la temperatura.

MODULACIÓN DE ESPECTRO ENSANCHADO (DSSS)

Es una técnica de modulación se emplea un código independiente de los datos de información para una onda de modulación para dispersar la energía de la señal sobre un ancho de banda mayor al ancho de banda de la señal original. Fueron diseñados originalmente para comunicaciones digitales inalámbricas ya que superaba las interrupciones causadas por receptores no autorizados. Si dichos receptores desean interrumpir la comunicación necesita detectar la transmisión y luego transmitir una señal diseñada para confundir los receptores. A primera vista se considera ésta señal como ruido que ha sido ideal para aplicaciones militares, y en aplicaciones donde el medio de transmisión sea hostil, tal como pasa en PLC. Estos sistemas de secuencia directa son sistemas de espectro ensanchado en los cuales la portadora se modula por un código de dispersión de alta velocidad y una corriente de datos de información. Esta dispersión es la causante del ensanchamiento de señal.

Esta modulación se basa en la multiplicación de la secuencia de un bit original por una secuencia digital de mayor velocidad y la expansión causada es proporcional al número de bits usados. Esta señal binaria de datos modula una portadora RF y la señal resultante es modulada por la señal código, es decir, una sucesión de +”1” y -”1”. Al ser un código aleatorio se ofrece un acceso múltiple de usuarios del canal simultáneamente aunque en banda estrecha presenta interferencias y no es necesaria la sincronización entre usuarios. Este tipo de modulación está definido por el estándar IEEE 802.11 junto con la modulación FHSS para redes inalámbricas WLAN. La señal transmitida por la modulación DSSS se caracteriza por la siguiente ecuación:

$$s(t)_{DSSS} = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) b(t)c(t)$$

Siendo $b(t)$ =Espectro de la señal de información

$c(t)$ = código único de expansión digital

E_b = Energía de información por bit

f_c = Frecuencia de generador de secuencia de pseudo ruido

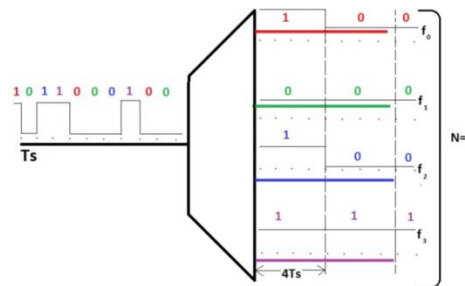
MODULACIÓN POR MULTIPLEXACIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES (OFDM)

Es una técnica de transmisión que tiene sus inicios en 1970, aunque no pudo ser puesta en marcha debido a la complejidad del procesamiento de señal y su implementación era demasiado costosa. Sin embargo, años más tarde con la integración a gran escala de los circuitos integrados y la reducción en su costo, algunas aplicaciones tales como WLAN, DSL y

televisión, ya que presenta una alta eficiencia espectral y resistencia contra desvanecimientos por multitrayectos.

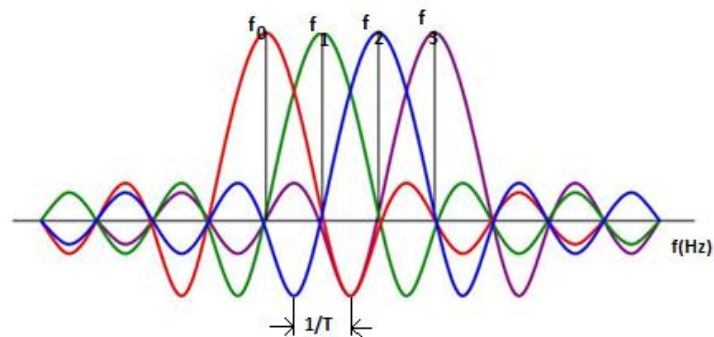
El principio de funcionamiento de OFDM es basado en la división del canal de comunicaciones en el dominio de la frecuencia en varios canales de menor amplitud y cada uno de estos transmite una subportadora. Cada subportadora en la que se transmite cada subcanal debe ser ortogonal entre sí asegurando un solapamiento entre ellas sin sufrir interferencia. Para la transmisión de información, primero se multiplexa en las subportadoras y es transmitida en paralelo. Si existen N subportadoras, cada una se envían cada una ancho de banda N veces menor, así se aprovecha el ancho de banda del canal con solapamiento pero sin bandas de guarda. Los símbolos son enviados primeramente de manera serial cada uno con duración de T_s segundos, posteriormente son convertidos en un bloque paralelo (por medio de un demultiplexor). Si se tienen N datos seriales, ahora se convierten en N datos en paralelo, cada uno con duración $N \cdot T_s$ segundos. Los datos aumentaron su duración N veces evitando así la interferencia inter-simbólica (ISI), y a cada dato modula cada una de las N subportadoras, separadas cada una de ellas en $(1/T)$ Hz asegurando así ortogonalidad entre ellas.

Figura B.5. Conversión datos serial-paralelo y aumento de periodo por subportadora de los datos.



Cada subportadora coincide su valor pico con los ceros de las otras subportadoras para garantizar la ortogonalidad y evitar problemas en el solapamiento necesario para asegurar un menor ancho de banda entre ellas. En la **Figura B.6** se ilustra el comportamiento de las frecuencias de las subportadoras en función de la frecuencia y amplitud.

Figura B.6. Frecuencias ortogonales de las subportadoras en OFDM



La ecuación que define el comportamiento de la señal OFDM es la siguiente:

$$v(t)_{OFDM} = \sum_{k=0}^{N-1} I_k e^{j2\pi Kt/T} \quad 0 \leq t \leq T$$

Siendo $v(t)_{OFDM}$ =Señal OFDM

I_K =Información

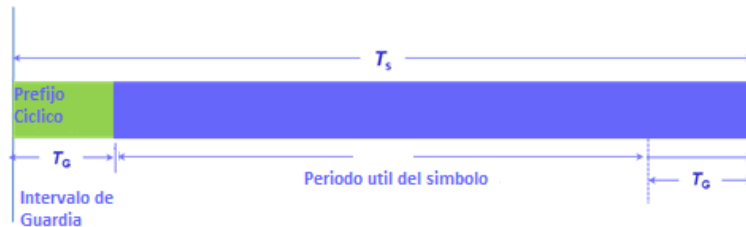
N =Numero de subportadoras

K =Índice de la subportadora

$1/T$ = Frecuencia de separación entre las subportadoras

Como medida para evitar errores por multitrayectos, en el dato I_K se añade al comienzo del dato una copia de la parte final del dato, llamado intervalo de guardia (*Guard Interval -GI*) y a este proceso se le conoce como prefijo cíclico.

Figura B.7. Prefijo Cíclico



En este orden de ideas, la ecuación modifica levemente su intervalo en el límite inferior con este intervalo de guardia para asegurar errores en el solapamiento, lo que da origen a la siguiente ecuación:

$$v(t)_{OFDM} = \sum_{K=0}^{N-1} I_K e^{j2\pi Kt/T} \quad T_{GI} \leq t \leq T$$

La señal de la ecuación aún no ha sido transmitida inalámbricamente, ya que es necesaria una portadora de mayor frecuencia. La señal resultante es una señal pasabanda representada en la siguiente ecuación:

$$s(t)_{OFDM} = \sum_{K=0}^{N-1} |I_K| \cos[2\pi(f_c + K/T)t + \arg(I_K)]$$

Siendo f_c = Frecuencia de la portadora de mayor frecuencia.

Errores presentes en el solapamiento: En ocasiones la modulación OFDM sufre la pérdida de bits por el desplazamiento de las frecuencias subportadoras, que es mayor al intervalo de guardia. Las dos fuentes más comunes de pérdidas por el desplazamiento de las frecuencias son:

- **Efecto Doppler:** Este efecto es causado por el desplazamiento relativo entre el emisor y el receptor, lo que causa que una frecuencia sea captada con un periodo diferente al enviado. Si bien las ondas electromagnéticas viajan cerca a la velocidad de la luz y los receptores pueden desplazarse a una velocidad mucho menor, si es posible generar errores si el sistema tiene una baja separación de frecuencias de subportadora $1/T$.
- **Diferencia síncrona:** Se presenta cuando los relojes de los sistemas emisor y receptor son diferentes. Consecuencia de esta diferencia los datos interpretados en el demodulador son erróneos. La diferencia puede ser fija, es decir, ambos relojes tienen la misma frecuencia pero diferente instante de retención de datos en el receptor.

Otro aspecto a tener en cuenta en OFDM son los componentes espectrales de alta frecuencia ocurridos en la transición de una trama de datos, que aumentan el ancho de banda de la señal. Al emplear ventanas al inicio y final de cada trama, en un proceso conocido como *windowing*, se logra controlar estos componentes espectrales. Existen varios métodos que resuelven éste problema entre ellas el Hann, Hamming, coseno elevado, Kaiser y otros.

MODULACIÓN DE BLOQUE CÍCLICO DE FILTRO MULTITONO (FMT)

Esta nueva arquitectura es basada en el concepto de modulación de filtrado multitono (FMT) y fue utilizada primeramente en aplicaciones VDSL (Very High Digital Subscriber Line). Esta modulación no usa un prefijo en los símbolos como en OFDM, en lugar de esto, el ancho de banda de cada subportadora es diseñada para ser casi ortogonal en el dominio de la frecuencia. Esta modulación utiliza un banco de filtros a partir de un filtro denominado filtro pasa-bajos prototipo. La respuesta en el dominio del tiempo de estos filtros es el posible solapamiento de varios símbolos en un periodo de tiempo, aunque están cerca de la ortogonalidad en el dominio del tiempo. Se hace necesaria la sintonización de cada subportadora para reducir la interferencia restante entre símbolos. Esta modulación puede ser usada en PLC como una solución a los sistemas tradicionales de modulación con subportadoras sacando provecho de los problemas como la interferencia inter-simbólica ISI.

REED SOLOMON

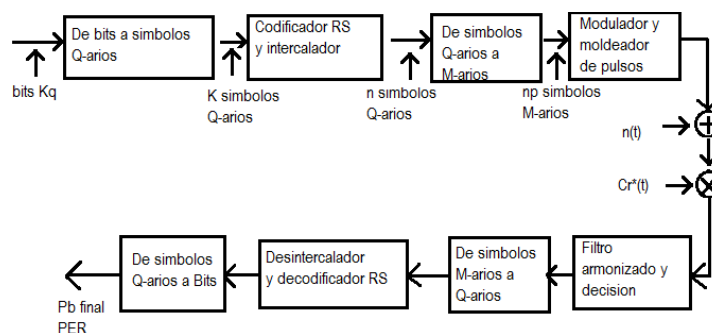
Inventada en 1960 por Irving Reed y Gus Solomon como un nuevo código de corrección de errores, ha sido de gran utilidad desde reproductores de CD hasta aplicaciones espaciales. Hoy en día los códigos R-S (Reed-Solomon) se aplican en diversos sistemas de comunicación como televisión digital y sistemas inalámbricos. R-S son una clase de códigos cíclicos lineales. Además son no binarios y de máxima distancia de separación (MDS), haciendo de ellos un fuerte esquema de codificación en ambientes hostiles. Para proveer una buena protección por errores de ráfaga, los códigos R-S pueden ser usados en conjunto con un intercalador de símbolos. Además de esto en virtud a la decodificación de los R-S es un sistema adecuado de codificación de PLC. La demodulación de los códigos R-S es por medio de un demodulador Gaussiano. Los códigos R-S (Reed-Solomon) son códigos cíclicos no binarios con símbolos constituidos por secuencias de m -bits, siendo m un número entero positivo mayor que 2. Los códigos R-S (n, k) de m -bits símbolos existen para todo n y k tal que

$$0 < k < n < 2^m + 2$$

Siendo k = el número de datos codificados

n = el número total de símbolos en el bloque codificado.

Figura B.8. Esquema de codificación RS para transmisión



B. CODIGO PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA TARJETA ARDUINO ETHERNET

```
#include <SPI.h>
#include <EthernetSupW5100.h>

byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };
IPAddress ip(192,168,0, 4); // Aqui se establece la dirección IP para la tarjeta Arduino
EthernetServer server(80);

int puertoLampara = 5;
int puertoVentilador = 6;
int puertoCerradura = 7;

void setup()
{
  EthernetSupW5100.begin(mac, ip);
  server.begin();

  // Configurando puertos
  pinMode(puertoLampara, OUTPUT);
  pinMode(puertoVentilador, OUTPUT);
  pinMode(puertoCerradura, OUTPUT);

  // Estado inicial de los puertos
  digitalWrite(puertoLampara, LOW);
  digitalWrite(puertoVentilador, LOW);
  digitalWrite(puertoCerradura, LOW);

  // Registrando botones
  //EthernetSupW5100.addButton(button pin, text on, text off, button type);
  EthernetSupW5100.addButton(puertoLampara, "Activar carga 1", "Desactivar carga 1",
  FLIP_BUTTON);
  EthernetSupW5100.addButton(puertoVentilador, "Activar carga 2", "Desactivar carga 2",
  FLIP_BUTTON);
  EthernetSupW5100.addButton(puertoCerradura, "Activar cerradura", "", SWITCH_BUTTON);
}

void loop()
```

```

{
// Cargar HTML
EthernetSupW5100.loadHtml(server);

// Verifica estado de los botones
int lastButton = EthernetSupW5100.getLastClickedButton();
byte state = EthernetSupW5100.getButtonState(lastButton);

if (lastButton == puertoLampara)
{
digitalWrite(puertoLampara, state);
}
else if (lastButton == puertoVentilador)
{
digitalWrite(puertoVentilador, state);
}
else if (lastButton == puertoCerradura)
{
digitalWrite(puertoCerradura, HIGH); //tiempo de activación del transmisor
delay(1000);
digitalWrite(puertoCerradura, LOW);
}

// Delay
delay(10);
}

```

C. ESTUDIO DEL EDIFICIO CENTIC Y COTIZACIÓN DE EQUIPOS PARA CONTROL CORINEX



Load Management: Bucaramanga Colombia

Proposed Solution:

For this load-control project, 2 LV Access gateways will be needed to control one load as first stage. One gateway will act as a master and 1 as repeater. The master gateway will be placed at the equipment assembly (control) point below the vertical pipeline on the first floor.

The repeater will be located on the terrace at the location of the load. The distance between the master and this repeater will be roughly 30 meters, and will cover the line along the vertical pipeline from first floor to the terrace (4 floors in total) plus the distance to the load. The load will be connected to this repeater via Ethernet (see Figure 1). The assumption is that the load is on the same circuit line.

A 2nd repeater may be used in case the signal does not reach the load. If this repeater is needed, it should be installed in the same circuit, in between the Master and the Repeater attached to the load.

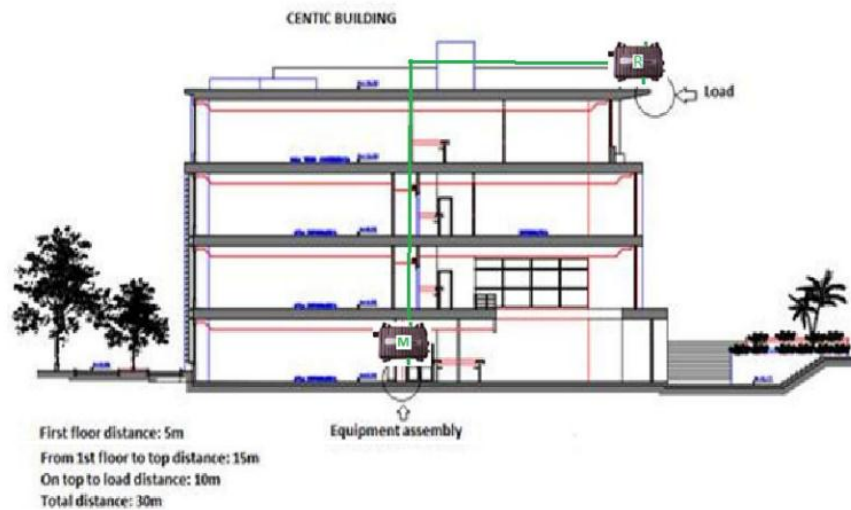


Figure 1

D. CODIGO PARA ENVIAR PULSOS POR MEDIO DE ARDUINO

```
// Código_Emisor, emite 3 pulsos cada 200ms y espera 1 segundo...
int led = 13;

void setup() {

    pinMode(led, OUTPUT);

}

void loop() {
    for(int i=0;i<3;i++)
    {
        digitalWrite(led, HIGH);
        delay(200);
        digitalWrite(led, LOW);
        delay(200);
    }
    delay(1000);
}
```