



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**SUPERVISIÓN DE PÉRDIDAS ELÉCTRICAS NO
TÉCNICAS UTILIZANDO COMUNICACIONES EN LÍNEAS
DE POTENCIA.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO
PRESENTA:

TOMÁS ENRIQUE VELASCO RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS.
DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN

CO-DIRECTOR DE TESIS.
DR. CÉSAR ANGELES CAMACHO



Agradecimientos (I)

Dedico esta tesis a quienes merecen más que nadie el esfuerzo realizado en su elaboración, mis padres. Él, siempre un ejemplo de fortaleza, perseverancia, honestidad y sencillez. Ella, sinónimo de alegría, ternura, cariño y comprensión. Agradezco a ambos su apoyo incondicional en la realización de todos mis proyectos, incluyendo por supuesto, esta tesis. Ellos son quienes obtienen el grado de ingenieros, yo sólo tuve el honor y el orgullo de ser su herramienta de trabajo. Los amo.

Agradezco y dedico también este trabajo a mi hermana a quien quiero y admiro mucho, y por supuesto a esas dos hermosas estrellas, mis sobrinas Pilar y Julieta, quienes con su sonrisa llenan siempre mi vida de alegría y felicidad, gracias amores.

Liliana, gracias por el valioso apoyo que me has brindado desde el inicio hasta el final de esta tesis, gracias por tu comprensión, tolerancia y, por supuesto, gracias por todo tu amor. Agradezco que me permitas compartir el protagónico en la mejor novela que cualquier dramaturgo podría escribir. Te amo.

A mi familia, mis abuelos, tíos, primos y sobrinos, a quienes agradezco que siempre me reciban con agrado y con los brazos abiertos en cualquier momento y en cualquier lugar. Gracias por enseñarme que la mejor forma para superar cualquier adversidad es, y serán siempre, la unión y la confianza.

Agradezco al Dr. Ramón Gutiérrez-Castrejón y al Dr. Cesar Ángeles-Camacho el apoyo y la confianza que depositaron en mí para el desarrollo y la realización de esta tesis. La colaboración, entusiasmo y compromiso de ambos fue imprescindible para lograr los objetivos planteados. Agradezco a Braulio y Adonay por su colaboración e interés mostrado en la continuación del proyecto sugerido en este trabajo.

Gracias a todos mis queridos amigos que, sin duda alguna, forman parte muy importante en mi vida. Agradezco sus consejos, sus risas, sus bromas, su alegría pero sobre todo, agradezco su apoyo. A los que conozco desde hace más de 15 años y que afortunadamente siguen vigentes, a los que conocí en la preparatoria y que cada vez que nos encontramos recordamos aquellos momentos que nos hicieron felices y que nos hacen reír de la misma manera en que lo hacíamos ayer. Por supuesto también gracias a aquellos que conocí en la Universidad con los que he compartido viajes y excelentes aventuras. Miguel[†], te adelantaste muy pronto pero agradezco haberte conocido. Gracias amigos por dejarme formar parte de sus vidas y por hacer que la mía este infinitamente llena de buenos momentos.

A los “monos”, gracias por enseñarme que nunca es tarde para iniciar un proyecto y que no se deben olvidar, ni mucho menos dejar de hacer, aquellas pasiones que te emocionan y te hacen sentir vivo.



Agradecimientos (II)

Este trabajo no podría haberse realizado sin la colaboración de la empresa Fonkel Mexicana por medio del Ing. Antonio Méndez Ruiz y sin la participación de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM, a quienes se agradece la beca recibida a través del proyecto PAPIIT IN103008.

Se agradece también al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo recibido para el proyecto “Análisis y detección de pérdidas no técnicas de energía eléctrica en sistemas de distribución mediante tecnología de comunicación sobre líneas de transmisión de potencia eléctrica” a través del Programa de apoyo a la investigación mediante proyectos de tipo multidisciplinario A2 a cargo del Dr. Ramón Gutiérrez-Castrejón.

Agradezco al Instituto de Ingeniería por permitirme colaborar y conocer a los estudiantes e investigadores que allí trabajan, mismos que día a día se esfuerzan y ofrecen sus conocimientos para el desarrollo del país.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería en donde la mayoría de sus profesores están comprometidos con los estudiantes y se preocupan por mejorar su cátedra, aún a pesar de saber que el pago recibido será infinitamente inferior al trabajo realizado.

Y por último, pero no menos importante, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la invaluable oportunidad de estudiar en sus aulas, reír y disfrutar entre sus pasillos, e incluso enamorarme rodeado de sus históricos murales y edificios, los cuales son ahora muy merecidamente, patrimonio cultural de la humanidad.

México, Pumas, Universidad...



Índice

| | |
|--|----|
| Capítulo 1 | 1 |
| Introducción | 1 |
| 1.1 Objetivo de la tesis | 1 |
| 1.2 Planteamiento del problema: Pérdidas de energía eléctrica en México..... | 1 |
| 1.3 Motivación..... | 2 |
| 1.4 Introducción a la tecnología PLC (Comunicaciones en Líneas de Potencia)..... | 3 |
| 1.4.1 <i>PLC en México</i> | 3 |
| 1.5 Resumen..... | 4 |
| 1.6 Organización de la tesis | 5 |
| 1.7 Aportaciones..... | 5 |
| 1.8 Bibliografía | 6 |
| Capítulo 2..... | 8 |
| Sistemas de comunicaciones en líneas de potencia (Power Lines Communications)..... | 8 |
| 2.1 Sistemas Eléctricos..... | 8 |
| 2.1.1 <i>Sistemas de distribución</i> | 8 |
| 2.1.2 <i>Sectores eléctricos</i> | 10 |
| 2.1.3 <i>Pérdidas eléctricas técnicas</i> | 12 |
| 2.1.4 <i>Pérdidas eléctricas no técnicas</i> | 13 |
| 2.2 Sistemas de comunicación..... | 13 |
| 2.2.1 <i>Componentes de un sistema de comunicaciones</i> | 14 |
| 2.3 Comunicaciones en Líneas de Potencia (PLC: Power Lines Communications)..... | 16 |
| 2.3.1 <i>Desarrollo histórico de la tecnología PLC</i> | 16 |
| 2.3.2 <i>Aplicaciones comunes para las redes PLC</i> | 17 |
| 2.3.3 <i>Algunas tecnologías competitivas de la tecnología PLC</i> | 18 |
| 2.3.4 <i>Condiciones no favorables en los sistemas PLC</i> | 20 |
| 2.4 Bibliografía | 23 |
| Capítulo 3..... | 25 |
| OFDM: Núcleo de los sistemas PLC | 25 |
| 3.1 Principio de los sistemas OFDM | 25 |
| 3.2 Funcionamiento del sistema OFDM | 25 |
| 3.3 Transmisor OFDM | 27 |
| 3.3.1 <i>Codificación</i> | 27 |
| 3.3.2 <i>Entrelazado (Interleaving)</i> | 32 |
| 3.3.3 <i>Mapeo</i> | 33 |
| 3.3.4 <i>Señales piloto (Pilot Insertion)</i> | 36 |
| 3.3.5 <i>Convertidores Serial – Paralelo</i> | 37 |
| 3.3.6 <i>IFFT</i> | 38 |
| 3.3.7 <i>Prefijo cíclico</i> | 39 |
| 3.3.8 <i>Convertidor Paralelo – Serial</i> | 40 |



| | | |
|---|---|----|
| 3.3.9 | <i>Convertidor Digital-Analógico</i> | 40 |
| 3.4 | Canal de comunicación (Cable eléctrico)..... | 41 |
| 3.5 | Receptor OFDM..... | 44 |
| 3.5.1 | <i>Receptor</i> | 44 |
| 3.5.2 | <i>Estimación del canal</i> | 44 |
| 3.5.3 | <i>Decodificación del canal</i> | 45 |
| 3.6 | Algunas aplicaciones para los sistemas OFDM. | 45 |
| 3.7 | Bibliografía..... | 46 |
| Capítulo 4. | | 48 |
| Implementación del sistema de supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas utilizando PLC..... | | 48 |
| 4.1 | Dispositivos Power Lines Communications..... | 48 |
| 4.1.1 | <i>Corinex AV200 Powerline ethernet wall mount adapter</i> | 49 |
| 4.1.2 | <i>Pruebas aplicadas al adaptador AV200 utilizando kperf</i> | 53 |
| 4.1.3 | <i>Comparación entre una red LAN con PLC y una red Wi-Fi</i> | 53 |
| 4.2 | Medidores de energía eléctrica..... | 55 |
| 4.2.1 | <i>Medidor electromecánico</i> | 55 |
| 4.2.2 | <i>Medidores electrónicos</i> | 56 |
| 4.2.3 | <i>Registrador de calidad de potencia</i> | 57 |
| 4.2.4 | <i>Tarifas eléctricas</i> | 59 |
| 4.3 | Software desarrollado para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas..... | 60 |
| 4.3.1 | <i>Comunicación cliente-servidor utilizando sockets</i> | 60 |
| 4.3.2 | <i>Procesamiento de los datos</i> | 61 |
| 4.3.3 | <i>Almacenamiento de datos</i> | 62 |
| 4.3.4 | <i>Interfaz gráfica de usuario (GUI)</i> | 64 |
| 4.4 | Bibliografía..... | 67 |
| Capítulo 5. | | 69 |
| Validación del sistema de supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas..... | | 69 |
| 5.1 | PLC en una red eléctrica de baja tensión..... | 69 |
| 5.1.1 | <i>Concentrador PLC</i> | 70 |
| 5.1.2 | <i>Medidores PLC</i> | 70 |
| 5.2 | Metodología para la identificación de pérdidas eléctricas no técnicas..... | 70 |
| 5.2.1 | <i>Identificación de pérdidas eléctricas no técnicas</i> | 71 |
| 5.2.2 | <i>Elementos del concentrador PLC</i> | 71 |
| 5.2.3 | <i>Elementos del medidor PLC</i> | 73 |
| 5.3 | Descripción del software utilizado para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas..... | 73 |
| 5.3.1 | <i>Software utilizado por el concentrador PLC</i> | 73 |
| 5.3.2 | <i>Software utilizado por los medidores PLC</i> | 79 |
| 5.4 | Pruebas realizadas en laboratorio..... | 79 |
| 5.4.1 | <i>Primera prueba, cliente residencial con consumo de iluminación, carga ilegal resistiva</i> | 80 |
| 5.4.2 | <i>Segunda Prueba, cliente residencial con carga variable. Sistema de iluminación como carga ilegal</i> | 81 |



| | | |
|------------------------|---|----|
| 5.4.3 | <i>Tercer prueba, dos clientes residenciales y carga ilegal variable conectada al sistema.</i> | 83 |
| 5.4.4 | <i>Cuarta prueba, dos Clientes residenciales y un sistema de iluminación incandescente como carga ilegal conectados a la red eléctrica.</i> | 83 |
| 5.4.5 | <i>Quinta prueba, sistemas de iluminación incandescente, fluorescente y motor eléctrico monofásico.</i> | 85 |
| 5.4.6 | <i>Sexta prueba, sistemas de iluminación incandescente y fluorescente.</i> | 86 |
| 5.5 | Conclusiones de los resultados obtenidos. | 89 |
| 5.6 | Bibliografía | 90 |
| Capítulo 6 | | 91 |
| Conclusiones Generales | | 91 |
| 6.1 | Trabajos Futuros. | 92 |
| 6.2 | Costos estimados para la realización del proyecto en campo. | 92 |
| Apéndice A | | 93 |
| Apéndice B | | 95 |
| Apéndice C | | 97 |
| Glosario de Términos | | 99 |



Capítulo 1

Introducción

1.1 Objetivo de la tesis

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas, de tal manera que permita detectarlas y cuantificarlas. Dicha metodología podría ser utilizada como una herramienta para ayudar a reducirlas. Para tal fin se desarrolló una pieza de software basada en el lenguaje de programación orientado a objetos JAVA, que permite conectar un concentrador de datos encargado de adquirir los parámetros eléctricos de todos los clientes conectados a él, la comunicación entre el concentrador y los clientes se realiza utilizando la tecnología Power Lines Communications (PLC)

El proyecto se desarrolló en un ambiente de laboratorio en donde se realizaron pruebas que validan los resultados reportados al final de este documento.

La tesis pretende también, aportar una aplicación utilizando la tecnología PLC, que si bien ya ha sido desarrollada en algunos países europeos y de norteamérica, en México y países latinoamericanos no ha tenido suficiente difusión y utilización.

Se presenta, entonces, un desarrollo que, basado en el uso de la tecnología Power Line Communications (PLC), permite supervisar las pérdidas eléctricas no técnicas en una red de baja tensión creada en un ambiente de laboratorio.

1.2 Planteamiento del problema: Pérdidas de energía eléctrica en México.

En México por concepto de ventas de energía eléctrica la Comisión Federal de Electricidad (CFE) reportó en el año 2007 ingresos alrededor de 225 mil 744 millones de pesos [1], el mismo año la Secretaría de Energía (SENER) registró pérdidas de energía del 10.6 % de la paraestatal, lo que representa una cantidad cercana a los 23 mil 928 millones de pesos. Esto significa que CFE pierde más del 10% de su capacidad instalada por causa de las pérdidas de energía eléctrica. También en 2007 Luz y Fuerza del Centro (LyFC) publicó en su página oficial [2] los ingresos que por venta de energía obtuvo ese año, dicha cifra asciende a 46 mil 506 millones de pesos mientras que sus pérdidas de energía reportan un valor porcentual del 32.8%, es decir, 15 mil 253 millones de pesos.

En la Tabla 1.1 se muestra el porcentaje de pérdidas de las dos compañías durante los últimos doce años. Llama la atención cómo LyFC incrementó sus pérdidas de energía de alrededor de 23% al principio de la década a más del 30% en 2006, 2007 y 2008. Cerca de la tercera parte de la energía que distribuye LyFC se fuga, debido principalmente al aumento de pérdidas no técnicas (conexiones ilegales y alteración de medidores). [3]

Las pérdidas de energía de estas dos paraestatales representan 39 mil 181 millones de pesos (Aprox. 3 mil 800 millones de dólares). Las pérdidas de CFE y Luz y Fuerza afectan al PIB nacional y a la economía del País.

Las pérdidas de energía en los sistemas eléctricos pueden ser divididas en dos categorías: Técnicas y No Técnicas. Las pérdidas técnicas son inherentes al sistema y suceden principalmente por la naturaleza física de los equipos y de la infraestructura de



los sistemas de potencia, ejemplos de pérdidas técnicas pueden ser, el efecto Joule, el efecto Corona, pérdidas en los transformadores, interruptores, generadores entre otros dispositivos. Estas pérdidas pueden ser calculadas y controladas, y representan entre el 4% y 6% del total de la carga de un sistema eléctrico en condiciones ideales de diseño y operación. [5, 6, 7]. Las pérdidas no técnicas son causadas por condiciones ajenas a la operación de los sistemas, producidas por cargas o condiciones de los componentes que el cálculo de perdidas técnicas no considera [8,9]. Las pérdidas no técnicas pueden ser ocasionadas por averías en los componentes eléctricos, alteración de medidores, acometidas clandestinas, facturación alterada entre las principales. En el capítulo 2 se comentará más acerca de estas pérdidas de energía eléctrica.

| AÑO | CFE | L y FC |
|-------|---------|---------|
| 1995 | 11 % | 23.19 % |
| 2000 | 10.8% | 22.80 % |
| 2001 | 10.35 % | 22.20 % |
| 2006 | 11.10 % | 31.41 % |
| 2007 | 10.60 % | 32.80 % |
| 2008* | 10.76% | 32.73 % |

*Segundo informe de gobierno de la actual administración. Septiembre 2008

TABLA 1.1.
PORCENTAJES DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA PARA CFE Y L Y FC
EN LOS ÚLTIMOS 12 AÑOS [10]

Con lo expuesto anteriormente se puede deducir que las perdidas no técnicas, en la industria mexicana en el año 2007, representaron del orden del 4.6% y 6.6% para CFE y del 26.8% y 28.8% para L y FC. Las pérdidas no técnicas de estas dos paraestatales representan 28 mil 293 millones de pesos (Aprox. 2 mil 715 millones de dólares).

1.3 Motivación

La investigación presentada en este documento es el resultado de la inquietud que generan las pérdidas económicas, que sufre la industria eléctrica anualmente, provocadas por las pérdidas eléctricas no técnicas. Los casi 30 mil millones de pesos que no son facturados anualmente representan la inversión para financiar 3 plantas generadoras similares a El Cajón en Nayarit [4], inaugurada en 2006, lo que beneficiaría al país con una capacidad instalada de cerca de 3000 MW. Más aún, la cantidad de dinero que



pierden las compañías suministradoras a causa de las pérdidas de energía es superior a los presupuestos destinados anualmente para la UNAM e IPN [3].

Es importante mencionar que el sistema que se plantea, supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas, pretende ser una herramienta para ayudar a reducir las pérdidas eléctricas, pero son las compañías suministradoras de energía las encargadas de evaluar las mejores soluciones para este grave problema.

Otro punto importante a mencionar es el interés que genera la investigación de tecnologías de reciente desarrollo como son los sistemas Power Line Communications y la iniciativa de proponer soluciones que pueden realizarse en México, que sean de bajo costo y alta confiabilidad.

1.4 Introducción a la tecnología PLC (Comunicaciones en Líneas de Potencia)

Las comunicaciones en líneas de potencia o como se les conoce en inglés Power Lines Communications (PLC), son principalmente un sistema de comunicación alámbrico que explota las líneas de potencia como canal de transmisión de datos. PLC es el aprovechamiento de las redes eléctricas para las comunicaciones de alta velocidad y de banda ancha. Inicialmente, el uso de Power Line Communications (PLC) se limitaba al control de líneas eléctricas para proteger los sistemas de distribución en caso de fallas, los sistemas de protección eléctrico fueron las primeras funciones para los sistemas PLC [14]; más adelante, las empresas eléctricas empezaron a utilizar sus propias redes para la transmisión de datos de modo interno. Sin embargo, fue hasta finales de los 90's que se logró alcanzar velocidades de transmisión de Megabits y al mismo tiempo reducir la interferencia de las señales.

La tecnología PLC permite utilizar la red de distribución de baja tensión para ofrecer servicios de telecomunicaciones hasta el usuario final a través de la red eléctrica, y usar el cable eléctrico entre el centro de transformación y la terminal de red como medio de transmisión de voz y datos. El rango espectral para los sistemas PLC se encuentra comprendido entre los 1.8 y los 30 MHz, hallándose en la banda de HF (high frequency), también llamada "onda corta" [11]. Lo anterior permite enviar las señales eléctricas y de comunicaciones por el mismo cable sin que exista interferencia y provoque interrupciones en las transmisiones de cada uno de los sistemas.

Actualmente la tecnología PLC permite una gran variedad de aplicaciones en diferentes campos: Internet de banda ancha, Voz sobre IP (VoIP), servicios multimedia y audiovisuales, servicios de domótica, que consiste en sistemas automatizados para servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación en casas-habitación, aplicaciones de gestión interna del consumo, medición automática en tiempo real (AMR), entre otras [11]

1.4.1 PLC en México

En México se han realizado pruebas a la tecnología PLC con fines de ser implementada y aprovechada por la Comisión Federal de Electricidad quien en 2003 suscribió un convenio de colaboración con el Instituto Politécnico Nacional y Grupo IUSA para desarrollar el programa piloto en Jocotitlán, en donde se conectaron 80 accesos a Internet gratuitos y se desarrolló otra prueba de campo en Morelia, en donde se da servicio a 700 casas, el resultado de las pruebas fue bueno.[12] En el año 2005 otra prueba piloto fue realizada en estado de Nuevo León, la prueba fue coordinada entre CFE y la empresa de comunicaciones Alestra AT&T, en este proyecto se tomó una muestra de casas, en las



cuales se instalaron servicios de Internet de Alta Velocidad y Voz IP y en 2006 se probó en edificios corporativos con 70 usuarios, en ambos casos el resultado fue bueno. [13] Para que el PLC se convierta en una solución real para las compañías de distribución eléctrica es necesario crear en México un marco regulatorio capaz de normalizar la utilización de las comunicaciones de banda ancha a través del cable eléctrico. Actualmente la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en conjunción con las compañías suministradoras de electricidad y las instituciones educativas trabajan para regular los sistemas PLC.

1.5 Resumen

En México por concepto de pérdidas eléctricas no técnicas (conexiones ilegales a la red de suministro y alteración de medidores) se pierden cerca de tres mil millones de dólares [1,2]. Esto significa que las dos compañías paraestatales que suministran la energía eléctrica en todo el país (Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro) pierden aproximadamente el 6.6% y el 28.8%, respectivamente, de la energía que distribuyen. La energía que no es facturada representa fuertes pérdidas económicas a México.

En este trabajo se presenta un desarrollo que, basado en el uso de la tecnología Power Line Communications (PLC) y el uso de un dispositivo Power Quality Logger (PQL) para el registro de parámetros eléctricos, permite supervisar las pérdidas eléctricas no técnicas en una red de baja tensión, lo cual podría ser una herramienta para ayudar a reducir las. Mediante pruebas realizadas en un ambiente de laboratorio, se simuló una red PLC utilizando un banco experimental monofásico (127V~ a 60Hz), en el cual se conectaron cargas inductivas y resistivas que simulan tanto las cargas residenciales como las acometidas ilegales. La red PLC montada en un banco experimental de laboratorio, permite supervisar el comportamiento de la red de distribución simulada mediante la transmisión de los parámetros eléctricos medidos con los dispositivos PQL. En la estructura de la red existe un concentrador encargado de recibir la información que envían los medidores clientes, también mediante la tecnología PLC utilizando la acometida eléctrica subterránea o aérea. Además, el concentrador tiene la tarea de identificar posibles pérdidas eléctricas no técnicas por medio de un proceso de comparación de los datos recibidos con las mediciones propias del concentrador.

Además de variar las características de las cargas residenciales e ilegales, se realizaron pruebas a diferentes distancias de separación entre clientes y concentrador que se variaron entre 3 y 100 m. El sistema de supervisión fue capaz de detectar variaciones de potencia producidas por las acometidas ilegales en intervalos de hasta unos cuantos segundos, y almacenar la información recabada durante varias horas a intervalos de muestreo determinados por el usuario del sistema. La comunicación, transmisión, procesamiento y almacenamiento de los datos enviados por los medidores hacia el concentrador, se realizó utilizando computadoras personales y una pieza de software desarrollada en JAVA, aportación importante de este trabajo, que es altamente portable y confiable y que, además, permite la visualización de los resultados gráficamente.

Este trabajo demuestra la factibilidad de implementación de un sistema similar en una red de distribución real para que las compañías suministradoras puedan evaluar de una manera más eficiente y prácticamente instantánea sus pérdidas. Se espera que mediante la incorporación de nuevas tecnologías, como es PLC, las compañías suministradoras tengan un mayor control de sus parámetros eléctricos, para así poder reducir las pérdidas millonarias producidas por la fuga ilícita de energía eléctrica.



1.6 Organización de la tesis

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En el Capítulo 1 se detalla el objetivo del proyecto, se presenta la motivación y aportaciones de la tesis.

En el Capítulo 2 se presentan las generalidades de los sistemas eléctricos y de comunicaciones. Se presenta la tecnología Power Lines Communications (Comunicaciones en líneas de potencia), breve desarrollo histórico y se realiza un comparativo con otras tecnologías de comunicaciones como Ethernet y Wi-Fi.

En el Capítulo 3 se presenta la modulación OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales), misma que utilizan los equipos PLC para la transmisión y recepción de datos. Se desarrolla una explicación de cada una de las etapas que constituyen la modulación OFDM y al final de este capítulo se presentan algunas otras aplicaciones de esta tecnología entre las que destacan telefonía celular de 4G y transmisión de video y audio digital.

En el capítulo 4 se presenta la descripción de los equipos utilizados para el desarrollo del proyecto, el adaptador Corinex AV200 y el PQL120. Se describen también las etapas de implementación del software desarrollado, se explican los procesos que se utilizaron para el procesamiento y almacenamiento de datos así como también se presenta la Interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada.

En el capítulo 5 se describe cada uno de los elementos necesarios para la implementación de la metodología utilizada para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas. En este capítulo se describen las pruebas realizadas y se reportan los resultados obtenidos en las mismas.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales del proyecto además de presentarse un breve estudio económico para la implementación del proyecto en campo. Se presentan los trabajos futuros y otras aplicaciones que pueden desarrollarse tomando como punto de partida este documento.

1.7 Aportaciones

Como resultado de la investigación desarrollada en esta Tesis se escribió el artículo con el nombre "Supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas en un laboratorio utilizando PLC", mismo que generó la participación en la ponencia del mismo nombre presentada en la *Vigésimaprimer Reunión de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial 2008* del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) que se llevó a cabo en Acapulco, Guerrero en Julio de 2008.

Este documento también aporta una pieza de software altamente portable, capaz de crear una topología cliente-servidor utilizada para simular a los clientes residenciales de una red de distribución de baja tensión. Dicha pieza de software realiza los procesos de comunicación, transmisión, procesamiento y almacenamiento de los datos necesarios para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas.



Capítulo 2. Sistemas de comunicaciones en líneas de potencia (Power Lines Communications)

2.1 Sistemas Eléctricos.

El sistema eléctrico se conforma principalmente por el sistema de generación, sistema de transmisión y el sistema de distribución. En la figura 2.1 se muestra un diagrama general de un sistema eléctrico.

El sistema de generación es el encargado, como su nombre lo indica, de generar la energía eléctrica por medio de diversos procesos llevados al cabo en las plantas de generación como pueden ser hidroeléctrica, de ciclo combinado, nucleares, eólicas, entre otras. Por otra parte, el sistema de transmisión es el encargado de transportar la energía desde las plantas generadoras hasta los sistemas encargados de distribuir la electricidad y por último se encuentra el sistema de distribución, que, debido al interés en este documento se analizará más detalladamente a continuación.

2.1.1 *Sistemas de distribución*

Los sistemas de distribución son los encargados de suministrar la energía eléctrica a los consumidores finales, estos sistemas reciben la energía eléctrica de las subestaciones de distribución. En la subestación se reduce la tensión proveniente de las líneas de transmisión por medio de un transformador de potencia. La subestación alimenta a varios sistemas primarios de distribución, que conforman una red de alimentadores, hasta llegar a un segundo transformador, denominado transformador de distribución, cuya función principal es reducir la tensión a niveles de utilización y enviar la energía hacia los consumidores finales conectados a la red de distribución secundaria [1]. Los sistemas de distribución están constituidos por tres etapas principales, la Subestación de distribución, Red de distribución primaria y Red de distribución secundaria.

Subestación de distribución

Esta etapa es en donde inicia un sistema de distribución eléctrica. Comúnmente la subestación es alimentada por medio de una línea aérea de subtransmisión que se conecta a la estructura en donde se encuentran instalados los interruptores de desconexión de alto voltaje, los cuales sirven para aislar a la subestación en caso de reparación o en periodos de mantenimiento, estos interruptores no están habilitados para interrumpir corrientes de falla. La electricidad es dirigida a través de un transformador de voltaje (TVs) y un transformador de corriente (TCs) hacia un interruptor automático de alto voltaje, cuya función principal es la de abrir el circuito en caso de que exista una corriente de falla, es un dispositivo de protección para el transformador de potencia. Los TVs y CTs se utilizan para reducir los altos voltajes y altas corrientes, según corresponda, a niveles bajos de tensión y corriente de manera que los equipos de medición sean capaces de sensor sin ser dañados.

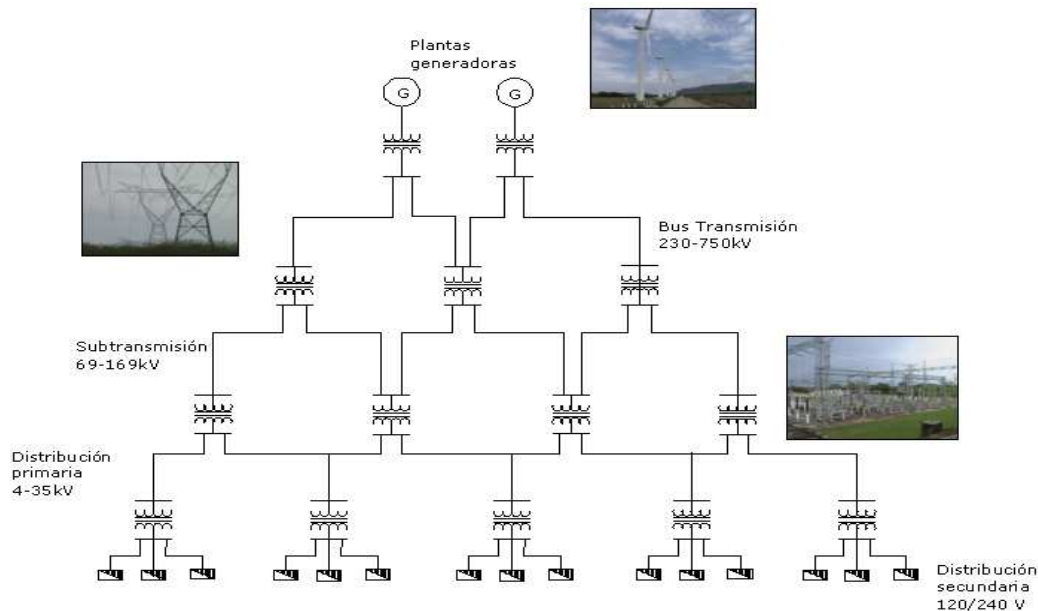


Figura 2.1. Diagrama general de un sistema eléctrico y sus principales componentes [1]

El transformador de potencia es utilizado para reducir los voltajes a niveles de distribución (e.g. 34.5, 23, 13.2 y 6kV). El secundario del transformador, también llamado “el lado de baja” esta conectado a un interruptor secundario, esto es, si ocurre una falla en el transformador ambos interruptores tanto el del primario como el secundario del transformador serian desconectados para aislar a este dispositivo del sistema. El interruptor secundario esta conectado a 4 interruptores de alimentación, estos interruptores están conectados a cables que salen de la subestación por medio de un ducto subterráneo, denominado “alimentador de salida”, de esta manera los elementos del secundario de la subestación alimentan al primario de la red de distribución primaria [2]. En la figura 2.2 se presenta un diagrama general de una subestación de distribución.

Red de distribución primaria.

La red primaria de distribución esta conformada por alimentadores que provienen de la subestación y entregan la energía a los transformadores de distribución.

Los alimentadores son conectados desde los interruptores de alimentación en la subestación y son dirigidos hacia los postes cercanos, en este punto el cable subterráneo se convierte en una línea principal trifásica denominada “troncal”. El troncal es dirigido hacia la zona de alimentación y puede ser conectada a otro troncal por medio de acoples de barra. Cabe señalar que los troncales principales también pueden ser subterráneos, pero su costo se eleva considerablemente en comparación con los troncales aéreos. Los “ramales” son cables eléctricos, típicamente monofásicos, también pueden ser bifásicos y trifásicos, conectados comúnmente por equipos de protección (fusibles, recierres y seccionadores automáticos) al troncal principal, su función es la de cubrir una mayor área de servicio eléctrico y conectarse a los transformadores de distribución y a servicios especiales de media tensión.

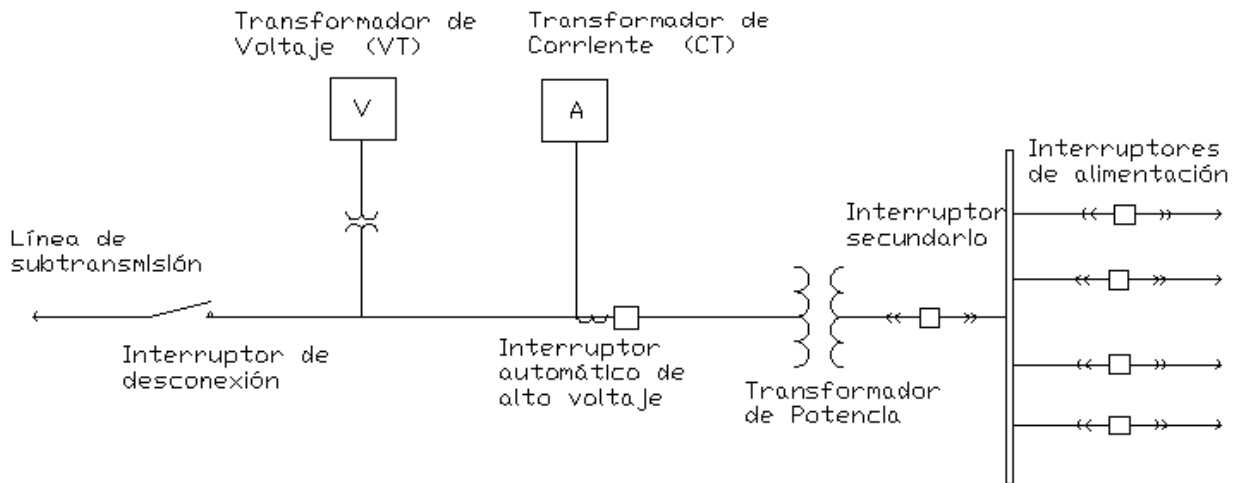


Figura 2.2. Diagrama eléctrico de una subestación de distribución.

Red de distribución secundaria

La función principal de la red secundaria es transportar el servicio de energía eléctrica desde el secundario del transformador de distribución hasta las acometidas de los usuarios finales (clientes). En México estos circuitos son generalmente trifásicos y la tensión de suministro es de 220 V entre fases y de 120 V entre fase y neutro [3]. Los clientes son conectados a la red de distribución a través de una acometida eléctrica, es decir, conductores de alimentación. Los clientes se encuentran cercanos al transformador de distribución se conectan directamente al secundario del transformador, en caso contrario es necesario instalar una línea secundaria principal que permita conectar a los clientes al servicio eléctrico, lo cual puede incrementar las pérdidas de energía y resultar en caídas de voltaje considerables. Con el fin de aumentar la confiabilidad en la red, los alimentadores se instalan formando una red o malla que le permita al flujo de energía eléctrica contar con diversas rutas para llegar desde los transformadores de distribución a las cargas conectadas a la red.

La energía eléctrica en México actualmente es suministrada por la Comisión Federal de la Electricidad y Luz y Fuerza del Centro quienes cobran por dicho servicio a la mayor cantidad de usuarios (clientes) en el territorio nacional. Las ventas de energía eléctrica que realizan estas dos paraestatales pueden clasificarse en 5 divisiones, dependiendo del sector al que se le brinde el servicio. A continuación se presentan dichas clasificaciones.

2.1.2 Sectores eléctricos

Sector eléctrico industrial.

Este sector se caracteriza por estar alimentado en media o incluso alta tensión y en algunos casos el cliente industrial cuenta con la capacidad de generar su propia energía, es decir, es capaz de autoabastecerse. Este tipo de cliente requiere mayor confiabilidad, por lo que las interrupciones en el servicio no deben ser considerables. La tensión de suministro oscila entre los 230kV y los 750 kV normalmente.



Sector eléctrico comercial

En este sector encontramos hoteles, bancos, escuelas, aeropuertos, hospitales, puertos marítimos, centros comerciales, entre otros. En muchos casos los clientes que se encuentran en este sector cuentan con plantas de emergencia para evitar que el servicio sea interrumpido en caso de falla por parte de la compañía suministradora.

Sector de servicios

No menos importante que los dos anteriores, debido a que en él se encuentran los servicios públicos como alumbrado público, semáforos, bombeo de agua residual o potable. Las fallas en este sistema pueden provocar caos en la sociedad.

Sector residencial y urbano (Doméstico)

En este sector encontramos una gran densidad de usuarios, que representan una carga considerable para el sistema eléctrico nacional. Cabe mencionar que este sistema es más complejo y más problemático que los anteriores, debido a las irregularidades que en él se encuentran, y es en este sector en donde existe la mayor cantidad de pérdidas no técnicas, de las cuales se hablará a detalle más adelante en esta tesis, debido a los asentamientos irregulares en las ciudades. Estos sistemas se caracterizan por una tensión baja (Alrededor de los 127 y 220 V)

Sector rural

En este sector se tiene cargas muy bajas para distancias de líneas de transmisión muy largas. En ocasiones se considera tener una planta generadora cerca de estas zonas, debido a que los costos se reducen considerablemente.

En la Figura 2.3 se presentan el porcentaje de ventas por sector que CFE y LyFC reportaron a la Secretaría de Energía, puede observarse que el consumo domestico representa una cuarta parte del total de las ventas realizadas.

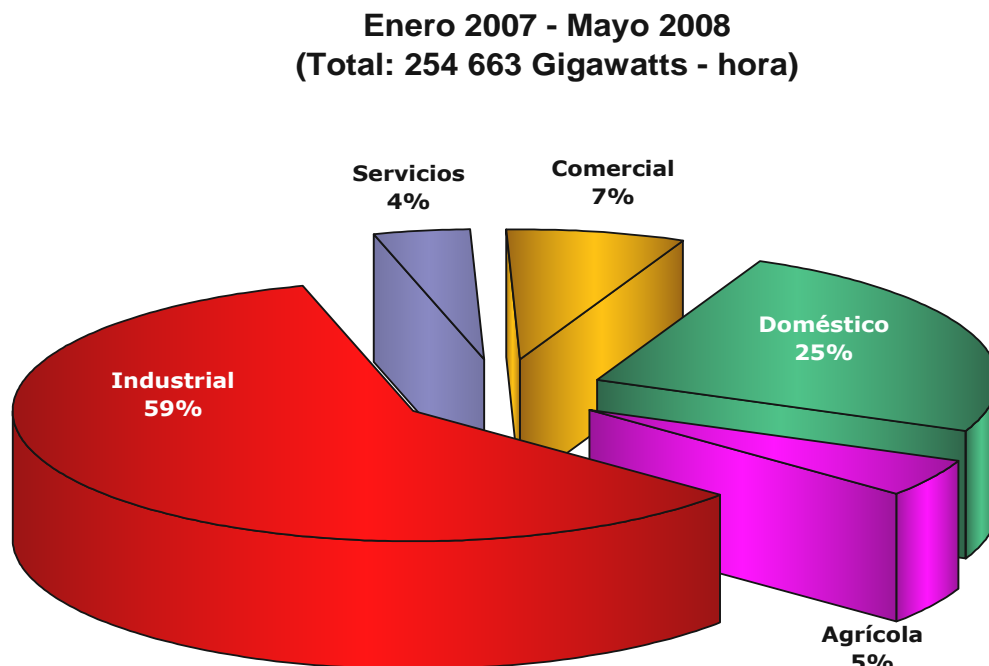


Figura 2.3 Ventas de energía eléctrica por sector [4]



2.1.3 Pérdidas eléctricas técnicas.

Las pérdidas técnicas son inherentes al sistema y suceden principalmente por la naturaleza física de los equipos y de la infraestructura de los sistemas de potencia. Ejemplos de pérdidas técnicas pueden ser, el efecto Joule, el efecto Corona, pérdidas en los transformadores, interruptores, generadores, entre otros dispositivos. Las pérdidas técnicas pueden calcularse basadas en las propiedades naturales de los componentes en el sistema de potencia: resistencia, reactancia, capacitancia, voltaje, corriente y potencia. Estas pérdidas pueden ser calculadas y controladas, y representan entre el 4% y 6% del total de la carga de un sistema eléctrico en condiciones ideales de diseño y operación. [5, 6, 7]. A continuación se presentan dos de los fenómenos principales que causan pérdidas técnicas: Efecto Joule y Efecto Corona.

Efecto Joule

El efecto Joule se produce en los conductores eléctricos, se caracteriza por la pérdida de energía en forma de calor al ambiente. Las pérdidas por efecto Joule sólo puede disminuirse, mas no pueden eliminarse por completo, a menos que se utilicen superconductores, los cuales requieren de muy bajas temperaturas y el costo de los superconductores es incluso mayor que el costo generado por las pérdidas eléctricas, es decir, los superconductores aún no se convierten en una realidad económica para la Ingeniería Eléctrica.

La ecuación 2.1 permite calcular las pérdidas de potencia causadas por el efecto Joule: La Potencia eléctrica es directamente proporcional al cuadrado de la corriente eléctrica por la resistencia del material, es decir:

$$P = I^2 R \qquad \text{Eq. 2.1}$$

P= Potencia Eléctrica (W)
I = Corriente eléctrica (A)
R = Resistencia del material (Ohms)

Efecto Corona

El efecto corona es una pérdida técnica de energía que se presenta principalmente en las líneas de alta tensión. Se produce cuando el gradiente de potencial (intensidad del campo eléctrico) alcanza altos niveles (mayor a 3×10^6 V/m) provocando la ruptura dieléctrica del aire y por lo tanto la ionización del mismo.

El efecto corona puede visualizarse, principalmente durante la noche, como una luminiscencia de color azul-blanco que aparece alrededor del conductor. Esta luminiscencia está acompañada de un sonido silbante, característico de las líneas de transmisión de alta tensión, el cual no supera los 35dB y es similar al producido por una lluvia moderada. El efecto corona, conocido desde el siglo XVII como Fuego de San Telmo debido a su aparición en los mástiles de las embarcaciones marítimas en condiciones de lluvia eléctrica, provoca también emisiones de ozono que van de 0.5 g a 5 g por kW/h; en lugares en donde existe una humedad considerable se puede producir ácido nítrico, lo que provoca la degradación por corrosión en los conductores reduciendo su vida útil y provocando pérdidas de energía.



Algunos factores que provocan el aumento del efecto corona pueden ser la contaminación, una mala instalación, aisladores dañados, conductores con rugosidades, irregularidades, defectos, impurezas, filamentos rotos, etc.

El buen diseño de una línea de transmisión así como un mantenimiento preventivo constante disminuyen las pérdidas de energía provocadas por el efecto corona.

2.1.4 Pérdidas eléctricas no técnicas.

Las pérdidas no técnicas son causadas por condiciones ajenas a la operación de los sistemas, producidas por cargas o condiciones de los componentes que el cálculo de pérdidas técnicas no considera [8,9].

Las pérdidas No Técnicas se clasifican en dos tipos:

- Las ocasionadas por averías en los componentes eléctricos o incluso por condiciones climáticas como podrían ser nieve o viento.
- El robo de energía eléctrica, que puede darse en diversas circunstancias, como pueden ser:
 - Alteración de medidores en baja y media tensión
 - Acometidas clandestinas (diablitos)
 - Facturación alterada
 - Errores humanos en las toma de lecturas.

De esta última clasificación podemos mencionar que las prácticas más comunes utilizadas para el fraude o robo eléctrico son las siguientes:

1. *Usando objetos mecánicos:* Se reduce las revoluciones del medidor de usando algún objeto mecánico.
2. *Utilizando un imán fijo:* Se puede utilizar un imán para cambiar el campo electromagnético de la corriente de la bobina. La facturación es proporcional al campo electromagnético
3. *Usando una fase externa antes del medidor Terminal:* esto provoca que el usuario obtenga energía gratis sin ninguna facturación
4. *Interrumpiendo los cables de energía a la caja del medidor:* De esta manera el usuario evita que la corriente pase por la bobina del medidor, y por lo tanto grabe cualquier dato de facturación.

2.2 Sistemas de comunicación.

Definición.

Un sistema de comunicación es un conjunto de elementos como transmisores, receptores, transductores, entre otros, cuyo principal objetivo es enviar señales a través de un canal que puede consistir en un cable coaxial, fibra óptica, enlace microonda, radio móvil e incluso en cable eléctrico y recibir dichas señales de la manera más confiable y sin pérdidas de información.

Los sistemas de comunicación pueden clasificarse en dos: Sistema de comunicaciones analógico y Sistema de comunicaciones digital. Esta clasificación obedece al tipo de señal que transmite cada sistema, es decir, si la señal toma un número infinito de amplitudes posibles en un rango dado, la señal es analógica y por lo tanto también el sistema lo es,



pero si la señal toma sólo un número finito de amplitudes en un rango fijo, se trata de una señal discreta y por lo tanto el sistema de comunicaciones es digital. [10,11]
Las figuras 2.4 y 2.5 muestran ejemplos de una señal analógica y digital respectivamente.

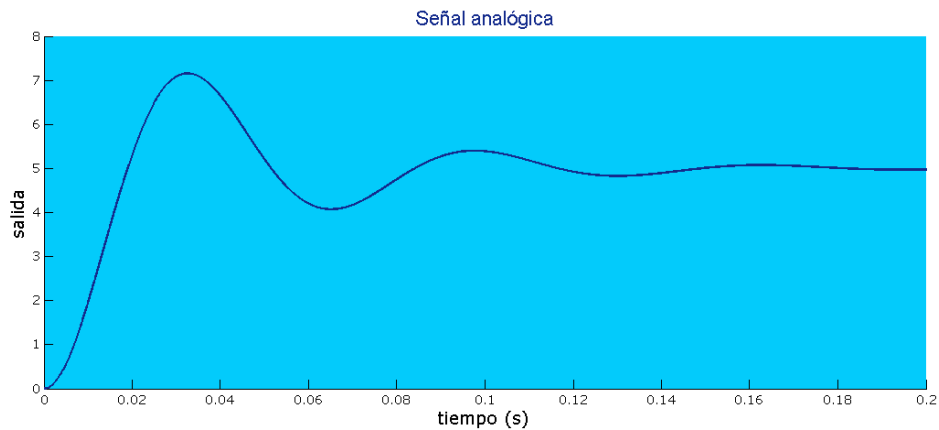


Figura 2.4. Señal analógica.

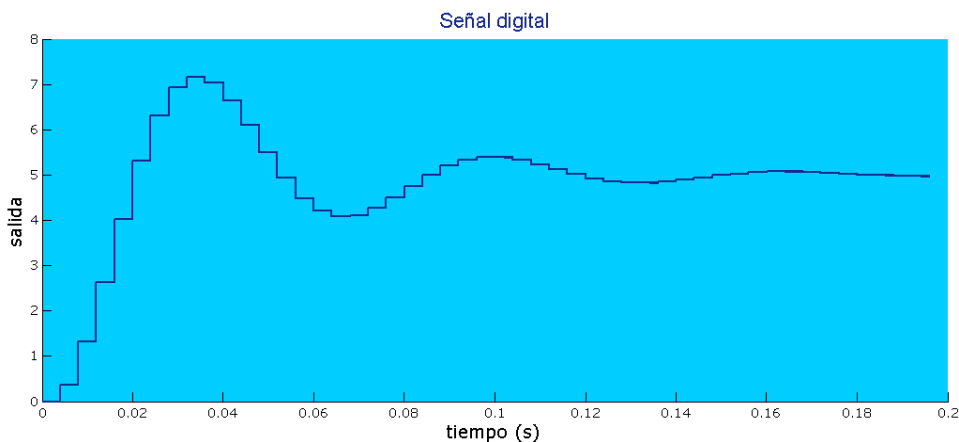


Figura 2.5. Señal digital.

2.2.1 Componentes de un sistema de comunicaciones

Para explicar los elementos de un sistema de comunicación se presenta un diagrama de bloques en la figura 2.6.

Fuente de información: La fuente de información produce los símbolos. Si la fuente de información es, por ejemplo, un micrófono, la señal está en forma analógica. Si la fuente es una computadora, la señal esta en forma digital. (Un grupo de símbolos).

Transmisor: El transmisor esta conformado por la fuente codificadora, el canal codificador y la modulación. Es en esta etapa en donde se inicia el envío de los datos.



- Fuente codificadora: La fuente codificadora convierte la señal producida por la fuente de información, en un flujo de datos. Si la señal de entrada es analógica, puede ser convertida en forma digital, utilizando un convertidor analógico –digital. Si la entrada a la fuente codificadora es un flujo de símbolos, esta puede ser convertida en un flujo de 1's y 0's usando algún tipo de mecanismo de codificación. Por ejemplo, si la fuente produce símbolos A y B, A puede ser codificada como 1 y B puede ser codificado como 0.
- Canal Codificador: El bloque del canal codificador opera sobre una señal digital de entrada en razón de reducir la probabilidad de que la señal digital será decodificada erróneamente por el receptor. Si se desea decodificar la información correctamente, incluso si algunos errores se introducen en el medio, es necesario introducir algunos bits adicionales en los datos de la fuente codificadora con el fin de que la información adicional pueda ser detectada y corregir los errores. Este proceso de añadir bits se hace en el canal codificador.
- Modulación: La modulación es el proceso de transformación de la señal a fin de que la señal pueda ser transmitida a través del medio. Se discutirá la modulación en capítulos posteriores.

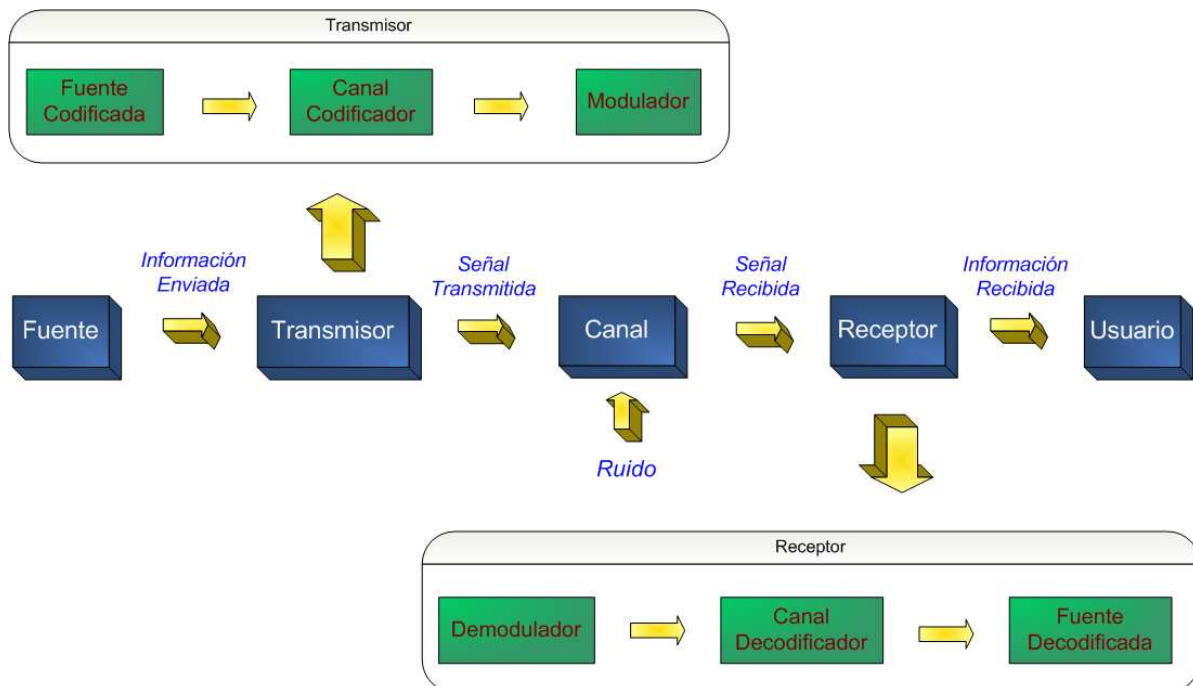


Figura 2.6. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación.

Canal: Ya se mencionó anteriormente, el canal es el medio físico por donde viajarán las señales del transmisor al receptor.

Receptor: Se encarga de obtener los datos con la mayor fiabilidad y consta de tres etapas principales: demodulador, canal decodificador y fuente decodificadora.



- Demodulador: Realiza la operación inversa del modulador.
- Canal decodificador: El canal decodificador intenta reproducir la entrada para el canal codificador más confiable posible. El canal decodificador analiza el flujo de bits recibido y detecta y corrige los errores, si existen, usando los datos introducidos por el canal codificador.
- Fuente decodificadora: La fuente decodificadora convierte un flujo de bits en una señal lo más cercano posible a la forma original. Si se realizó una conversión analógica – digital en la fuente codificadora, en la fuente decodificadora se realizará una conversión digital - analógica.

Usuario: Es la última etapa del sistema de comunicación y es aquí en donde la señal, ya sea analógica o digital, se convierte en una señal de salida que puede ser interpretada y utilizada por el usuario final, que puede ser una computadora, una bocina, un control de automatización, etc.

A continuación se presenta un tercer sistema llamado Power Lines Communications, el cual, basado en los sistemas eléctricos y de comunicaciones puede ser utilizado en diversas aplicaciones como: Transmisiones de banda ancha, Circuito cerrado de Televisión, sistemas de control, monitoreo de redes eléctricas, etc. Este sistema se vislumbra como una posibilidad real para diversas soluciones en la ingeniería a mediano y corto plazo.

2.3 Comunicaciones en Líneas de Potencia (PLC: Power Lines Communications)

Las comunicaciones en líneas de potencia o como se conocen en Inglés, Power Lines Communications (en adelante PLC), es principalmente un sistema de comunicación alámbrico que explota las líneas de potencia como canal de transmisión de datos. PLC es el aprovechamiento de las redes eléctricas para las comunicaciones de alta velocidad y con un ancho de banda considerable. Esta nueva tecnología permite a los usuarios dentro de una casa, oficina o edificio conectarse a la red de datos por medio de un enchufe eléctrico.

Es importante mencionar que los sistemas eléctricos transmiten las señales en frecuencias de 50 y 60 Hz mientras que el sistema de comunicación utilizado por los PLC transmiten las señales en la banda de frecuencias comprendida entre 1.8 y 30 MHz, lo que permite reducir los efectos de interferencia, es decir, pueden considerarse como señales independientes transportadas por un mismo canal de comunicación.

Lo que antes parecía imposible debido al canal de comunicación tan hostil que representan las líneas eléctricas, hoy se vislumbra como la red de comunicaciones más grande y eficiente debido a que las redes eléctricas pueden extenderse a prácticamente cualquier lugar que se desee.

2.3.1 Desarrollo histórico de la tecnología PLC.

Las PLC se han estado desarrollando desde los años 50's, pero nunca se pensó seriamente como un medio de comunicación debido a la baja velocidad de transmisión, baja funcionalidad y alto costo en el desarrollo. En los años 60 se utilizó a las redes



eléctricas con fines de comunicaciones para transportar información operacional de voz comando y control, se les conocía como Power Lines Carriers.

Fue hasta principios de los años 90's cuando, gracias a los sofisticados métodos de modulación, se comenzó a investigar seriamente esta tecnología demostrando que se podía transmitir una gran cantidad de datos por medio de las líneas eléctricas en distancias cortas. Las generaciones concebidas como PLC datan del año 2000, en que se conoce la primera generación cuya capacidad de transmisión va de 1Mbps a 4Mbps, utilizando modulaciones DSSS (Espectro esparcido de secuencia directa).

La segunda generación entra en vigencia a partir del año 2002 y tiene la capacidad de transmitir datos entre 10Mbps y 45Mbps comenzando a utilizar la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), se comentará ampliamente de este tipo de modulación en el siguiente capítulo.

La tercera generación data del año 2004 ya completamente utilizando la modulación OFDM y transmitiendo a una tasa de 80Mbps a 200Mbps, que es hoy en día el máximo de transmisión puesto en el mercado.

Los adaptadores PLC actualmente se venden en diversas partes del mundo y uno de los principales proveedores de chips que utilizan esta tecnología es la empresa española DS2, pionera en las investigaciones de los sistemas PLC [12]. Más adelante en este documento se ampliará la información de los adaptadores PLC.

2.3.2 Aplicaciones comunes para las redes PLC.

Actualmente, principalmente en Europa, Asia y Norteamérica, se utilizan las redes PLC para diferentes usos, a continuación se presentan algunas de sus principales aplicaciones.

Aplicaciones de PLC en media y baja tensión

Las aplicaciones PLC se pueden dividir en soluciones de media (sistemas de distribución eléctrica [4-35kV]) y baja tensión (Sistemas de consumo [120-240V]). La tabla 2.1 clasifica algunas de las principales aplicaciones PLC. Las aplicaciones de alta tensión no son mencionadas en este documento debido a que aún no representan una solución real y económica.

Redes de suministro Inteligentes y AMR de banda ancha

Las redes PLC permiten a las compañías suministradoras de energía eléctrica mantener un control y supervisión de sus sistemas con el fin de hacerlos más eficientes y seguros. La tecnología PLC en las redes eléctricas puede servir para detectar fallas eléctricas y robo de energía en tiempo real. También facilita el control de los parámetros eléctricos, como pueden ser el monitoreo de la temperatura de la línea de transmisión y el transformador, monitorear el desbalance de cargas y la continuidad en el servicio lo que beneficiaría a la red eléctrica para poder prevenir fallas y extender el ciclo de vida de los componentes. Y por último, una de las aplicaciones más importantes es combinar los medidores automáticos AMR (Automatic meter reading) con la tecnología PLC con la finalidad de crear una red inteligente que permita enviar los parámetros eléctricos y de facturación a la compañía suministradora, lo que ahorra costos de operación y reduce pérdidas por errores humanos en lecturas e incluso por corrupción. Los AMR con la tecnología PLC actualmente soluciona problemas de facturación en zonas rurales y de difícil acceso. [13]



Comunicaciones en gran ancho de banda

Una de las aplicaciones más importantes en el desarrollo de los sistemas PLC es lo que se denomina como “Triple-play”, que permite ofrecer servicios de voz, datos y video (Telefonía sobre IP, Acceso a Internet de banda ancha y Televisión) y que actualmente es el mercado más explotado para los sistemas PLC [14]. Las redes PLC están diseñadas para operar en condiciones extremas de ruido, garantizando alta fidelidad permiten también extender redes inalámbricas y crear unidades multiusuarios en universidades, escuelas y hoteles.

| APLICACIÓN | MEDIA TENSIÓN | BAJA TENSIÓN |
|--|---------------|--------------|
| Operación y control en líneas de transmisión | Disponible | |
| AMI (Advanced Metering Infrastructure) | Disponible | Disponible |
| Extensión del sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) | Disponible | Disponible |
| Seguridad y vigilancia de manera remota | Disponible | Disponible |
| Servicios Triple-play. | Disponible | Disponible |
| Extensión de redes LAN | | Disponible |

TABLA 2.1.
ALGUNAS APLICACIONES PLC EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Seguridad y vigilancia

Los sistemas PLC también pueden ser utilizados para los circuitos cerrados de Televisión (CCTV) usados para garantizar seguridad y vigilancia en edificios, oficinas y hogares. La tecnología PLC permite la transferencia de información de audio y video, gracias a esto se puede monitorear el edificio, el estacionamiento, el tráfico vehicular o cualquier lugar en donde se encuentre instalada una cámara de CCTV en la red eléctrica.

2.3.3 Algunas tecnologías competitivas de la tecnología PLC.

Actualmente existen tecnologías como Ethernet y Wi-Fi que compiten directamente con los sistemas PLC en algunos campos de aplicación. A continuación se presentan algunas características de estas tecnologías y en la tabla 2.2 se presenta una comparación de las ventajas y desventajas entre las los sistemas PLC, Wi-Fi y Ethernet.



| Tecnología | Ventajas | Desventajas |
|---|--|--|
| Ethernet | Tecnología probada, establecida y bien soportada | Requiere que se instalen nuevos cables para la instalación de la red |
| | medio fiable | Puede requerir alguna configuración por parte del usuario |
| | Alta velocidad (100Mbit/s) | |
| | 100 m entre nodos | |
| | Soporta aplicaciones que requieren un gran ancho de banda | |
| | Alta seguridad | |
| | Fácil enlace con otras tecnologías de redes | |
| PowerLine | Actualmente soportado por mucho mercado de masas vendedores de la IT para Estados Unidos | Actualmente no es una solución barata |
| | 200 Mbit/s de transmisión de datos | No es conveniente para dispositivos portátiles a menos que se use un gateway |
| | Los enchufes eléctricos más comunes será una conexión de banda ancha en el hogar. | Competición de tecnologías Europeas y Estadounidenses están siendo propuestas, así como falta de estandarización para esta nueva tecnología. |
| | Cobertura total en la casa, comparada con las limitaciones de las soluciones inalámbricas. (Paredes gruesas) | La fuga de una red externa puede ser un problema |
| | Trabaja independientemente en de la línea de voltaje y la frecuencia de la corriente | La transmisión de datos puede no ser alcanzable con regulaciones Europeas en emisiones Electromagnéticas |
| | Puede coexistir con otra tecnología powerline | Se esta trabajando para reducir la interferencia con transmisiones de radio de onda corta |
| | Métodos de seguridad para las powerlines, encriptación de datos | |
| | Sin obra civil | |
| Soporta calidad y servicio | | |
| Evita Latencia (Suma de retardos temporales dentro de una red). Un retardo es producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red. | | |
| Wi-Fi (Wireless Fidelity) | Altamente adoptado por varios fabricantes | La interferencia puede afectar drásticamente la tasa de transferencia |
| | Transmisión de datos de 54 Mbps | El ambiente físico puede afectar el funcionamiento (Paredes Gruesas) |
| | Tecnología confiable con retraso a velocidades lentas cuando necesario | Compartir la banda ISM (Banda reservada para la Industria, la ciencia y la medicina) puede causar impacto en el funcionamiento |
| | Compatibilidad con versiones anteriores que tienen implementaciones DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) | Vulnerable a ataques informáticos. |
| | Soporta redes <i>Ad Hoc</i> , red en la que no hay nodo central y todos los dispositivos están en iguales condiciones. | |
| | Amplia Cobertura (25-500m) | |
| | Ideal para redes domésticas en donde la instalación requiere el mínimo de cables posible | |

TABLA 2.2 COMPARACIÓN ENTRE LAS TECNOLOGÍA PLC, ETHERNET Y WI-FI.



Ethernet

Es probablemente el estándar más popular para las redes de área local (LANs). En una configuración Ethernet, los equipos están conectados mediante cable coaxial o de par trenzado ("Twisted-pair") utilizan un modelo denominado **CSMA/CD** ("Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection"). Inicialmente podía manejar información a 100 Mb/s, aunque actualmente se han desarrollado estándares mucho más veloces.

Muchos dispositivos pueden acceder al servicio de banda ancha a través de la red de área local Ethernet a la que están conectados.

Wireless (Sin cables)

Wi-Fi (IEEE802.11)

Utiliza el estándar IEEE802.11 para redes de comunicaciones inalámbricas que opera a 2.4 GHz Wi-Fi con transmisión de datos de 54 Mbps actualmente. La tecnología Wi-Fi permite la conexión inalámbrica por radio de equipos (cualquier equipo o máquina, ejemplos: ordenador, videocámara, horno, sistemas de riego, etc) para la transmisión de datos, voz y video.

2.3.4 Condiciones no favorables en los sistemas PLC.

Después de haber comentado las ventajas y desventajas de los sistemas PLC, podemos comentar algunas condiciones en las que estos sistemas no funcionan correctamente y sus principales causas.

Las líneas de potencia son caracterizadas comúnmente como un medio hostil para la transmisión de datos debido principalmente a las siguientes razones.

- Impedancia variable, debido a que las cargas pueden ser encendidas y apagadas de manera aleatoria
- Ruido en la línea, ocasionado por diversas fuentes. Motores, señales de radio, fuentes alimentadoras entre otras.
- Alta atenuación de la señal, es dependiente de las topologías, de los tipos de derivación e incluso de las conexiones.
- Por factores climáticos:
 - Los fenómenos climáticos como pueden ser la lluvia, la nieve, niebla hielo pueden influir en la calidad de transmisión de la señal. Por ejemplo, el hielo en los conductores (canal de comunicación) puede influir para el incremento o decremento de la atenuación en la señal.
- Factores técnicos
 - El segundo problema con el que se enfrentan las Líneas de Potencia es con la reflexión, y esta ocurre en los lugares en donde existen cambios de impedancia, como terminación de líneas y fallas. El problema con la reflexión es que la alta frecuencia de la PLC puede llegar a rizarse provocando un incremento en el BER (Cociente entre los bits recibidos erróneamente y los bits enviados).



EMI y EMC

En ocasiones los sistemas PLC generan interferencia en la banda HF (1.8 - 30 MHz) y actúan como antena produciendo radiación electromagnética en el ambiente y provocando disturbios en otros servicios que operen en el mismo rango de frecuencias. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) define a la Interferencia Electromagnética (EMI) como “la degradación del funcionamiento de un dispositivo o sistema por alteraciones electromagnéticas.” [15]

En los sistemas PLC se presentan este tipo de degradaciones o alteraciones debido a la inserción de señales PLC en los cables de energía eléctrica lo que resulta en una radiación de un campo electromagnético en la red. Los equipos PLC provocan que los cables eléctricos actúen como antenas produciendo interferencia electromagnética a otros sistemas de comunicación como son: transmisión en onda corta, aeronáutica, militar, radioaficionados, entre otros. Ver Tabla 2.3

Para reducir los niveles de EMI con la finalidad de cumplir con los límites establecidos por los estándares internacionales es necesario que el diseño de los equipos PLC se adapte a lo que se conoce como Compatibilidad Electromagnética (EMC).

La compatibilidad electromagnética es la capacidad de los dispositivos o sistemas para funcionar satisfactoriamente en un ambiente electromagnético sin introducir Interferencia a otros sistemas [16].

| Servicios | Banda Utilizada (MHz) |
|---|--|
| Transmisión de onda corta y media | 1.3-1.6; 3.9-4.0; 5.9-6.2; 7.1-7.35; 9.4-9.9; 13.5-13.8; 15.1-15.6; 25.6-26.1. |
| Transmisión móvil naval | 1.8-2.0; 2.0-2.02 |
| Radioaficionado | 1.81-1.85; 3.5-3.8; 7.0-7.1; 10.1-10.15; 14.0-14.35; 18.0-18.16; 21.0-21.4; 28.0-29.7 |
| Comunicaciones militares de larga distancia (OTAN & UK) | 2.0-2.04; 2.3-2.5 |
| Aeronáutica | 2.8-3.0; 3.02-3.15; 3.4-3.5; 3.8-3.9; 4.4-4.65; 5.4-5.68; 6.6-6.7; 8.81-8.96; 10.0-11.1; 21-22; 23-23.2; |

TABLA 2.3 SERVICIOS QUE COMPARTEN LA BANDA UTILIZADA POR LOS EQUIPOS PLC Y QUE PUEDEN SER PERTURBADOS POR LA INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA (EMI). [17]



EMC se basa en dos aspectos fundamentales para cumplir con su definición:

- Mantener un funcionamiento satisfactorio, lo que significa que el equipo es tolerable a otros. El equipo no es susceptible a las señales electromagnéticas que otros generaran en el ambiente.
- Sin producir alteraciones intolerables, significa que los equipos no molestaran a otros. La emisión de señales electromagnéticas producida no causaran problemas de interferencia electromagnética a otros dispositivos.

EMC implica que los equipos no deben generar niveles inaceptables de interferencia, los cuales afecten el funcionamiento de otros productos diseñados para operar en un mismo ambiente [17].



Capítulo 3.

OFDM: Núcleo de los sistemas PLC

Como se comentó en el primer capítulo los sistemas PLC están basados en la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), lo que en español se conoce como Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales. Es un sistema multicarrier (MCM) o multiportadora que también es llamado en ocasiones modulación multitono. El principio de la MCM es dividir el mensaje a transmitir en varias cadenas de bits los cuales serán transmitidos en subcanales o subportadores paralelos que sean altamente independientes [1]. En este capítulo se presentan los principios de la modulación OFDM y los diferentes procesos a los que son sometidos los datos que se envían en los sistemas PLC.

3.1 Principio de los sistemas OFDM

El antecedente de la modulación OFDM fue el sistema llamado Kineplex [2] desarrollado por Collins Radio Company hace 50 años, este sistema se utilizó para la transmisión de datos sobre un canal de radio en alta frecuencia. En Kineplex se utilizaban 20 tonos a diferentes frecuencias y eran multiplexados para proveer una capacidad de transmisión de 3000 bits en cada segundo.

En 1967 se presenta un análisis de un sistema de transmisión de datos paralelos cuya principal aportación es dividir la banda de frecuencia disponible en varios canales para modular independientemente un número de portadoras de diferente frecuencia [3].

En los años 60's y 70's los sistemas de comunicaciones usualmente enviaban un tren de pulsos en forma serial, el problema presentado para la implementación de un sistema paralelo radicaba principalmente en su costo y su complejidad, hasta que se comenzó a plantear una solución eficiente y económica para el desarrollo de estos sistemas. En el año 1971 se plantea por primera vez la utilización de la Transformada Discreta de Fourier para solucionar el problema de una implementación costosa en volumen y consumo de potencia para los procesos de modulación y demodulación [4]. En 1980 se comienza a utilizar el prefijo cíclico (CP) para resolver los problemas de ortogonalidad, lo cual significa que, cuando una subportadora es muestreada la contribución de todas las demás subportadoras es cero [5]. El concepto de ortogonalidad será explicado a detalle más adelante en este mismo capítulo.

3.2 Funcionamiento del sistema OFDM

Los sistemas OFDM se basan en dividir el canal de comunicación en el dominio de la frecuencia en varios canales más pequeños y en cada uno de ellos se trasmite una sub-señal o sub-portadora. Las N sub-portadoras que se transmiten por N sub-canales tienen la propiedad especial de ser ortogonales entre si y espaciadas correctamente en frecuencia, esto permite que exista solapamiento entre las sub-portadoras pero sin que exista interferencia entre ellas, logrando con esto un mayor aprovechamiento del ancho de banda [6]. Los sistemas OFDM son una variación de los sistemas FDM pero su ortogonalidad los hace más eficientes. En la Figura 3.1 se presenta una comparación entre los sistemas FDM y OFDM.



La clave para la modulación OFDM es la Transformada rápida de Fourier (FFT) y la Transformada Inversa rápida de Fourier (IFFT), que son introducidos en los procesos de demodulación y modulación respectivamente.

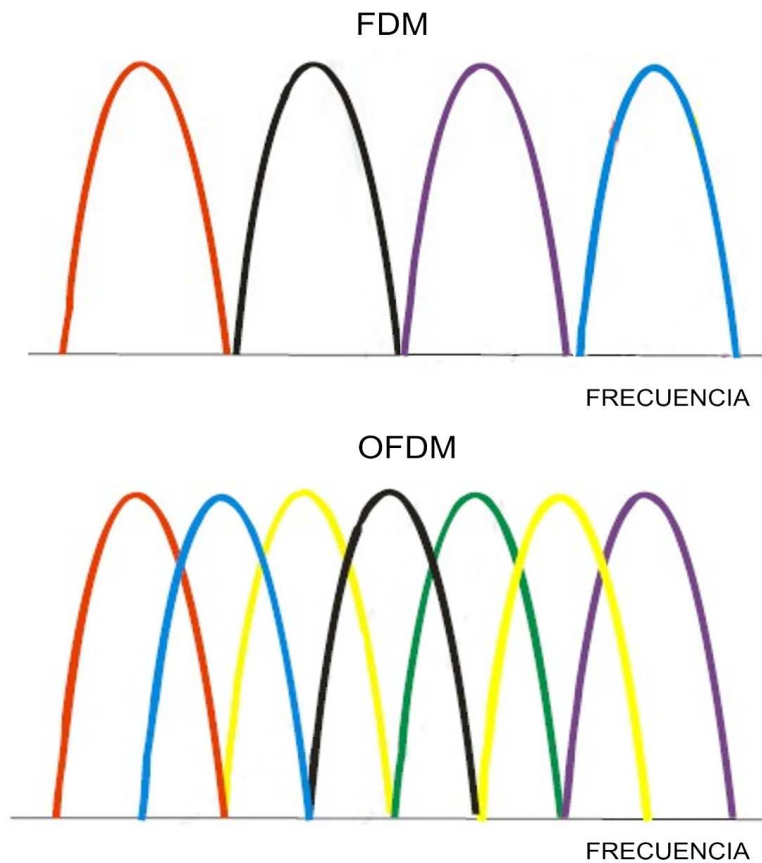


Figura 3.1. Comparativo entre sistemas OFDM y FDM.

En el espectro en frecuencia de un sistema OFDM se observa una superposición de las señales sin causar interferencia y aprovechando al máximo el ancho de banda disponible. Ver Figura 3.2

Este tipo de modulación hace posible una alta transmisión de datos sobre canales hostiles como lo son las líneas de transmisión eléctricas. OFDM se implementa para usar moduladores y demoduladores para cada subportadora.

Es importante mencionar que cuando OFDM se emplea junto con codificación del canal para la detección y corrección de errores se designa como COFDM (Multiplexación por división de frecuencia ortogonal codificada). En este documento utilizaremos los términos OFDM y COFDM indistintamente.

En la Figura 3.4 se presenta un diagrama de bloques en el cual se observan cada uno de los elementos de un sistema OFDM.

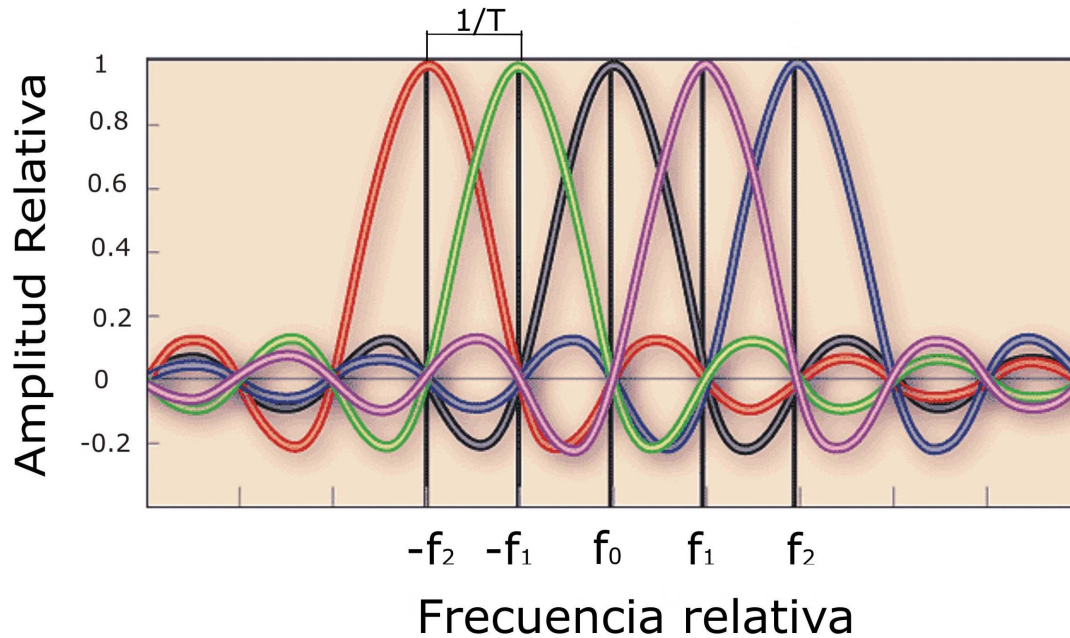


Figura 3.2. Espectro de un sistema OFDM [6]

3.3 Transmisor OFDM

A continuación se presentan los elementos que conforman un transmisor OFDM, estos elementos son los mínimos necesarios para lograr una comunicación eficiente en los sistemas OFDM.

- Codificación
- Interleaving
- Mapeo
- Insertar señales piloto
- Convertidor serie-paralelo
- IFFT (Transformada Inversa Rápida de Fourier)
- Inserción del intervalo de guarda (Prefijo cíclico)
- Convertidor paralelo – serie
- Convertidor digital – análogo

A continuación se presenta una explicación para cada elemento.

3.3.1 Codificación

La codificación consiste en “mapear” la secuencia de datos de entrada en una nueva secuencia que sólo pueda ser interpretada por el receptor, evitando con esto la fuga de información y garantizando una mejor calidad en la recepción de los datos, de tal forma que los efectos del ruido sean mínimos. La codificación tiene como finalidad principal la fiabilidad de la transmisión.



El bloque de codificación en los sistemas OFDM es utilizado de tal manera que los datos correctamente recibidos de los subportadores relativamente fuertes corrijan los datos erróneamente recibidos de los subportadores relativamente débiles [7]. Existen muchos tipos de codificación pero uno de los más utilizados en la modulación OFDM es la codificación convolucional que a continuación se presenta.

Codificación convolucional

Es un tipo de codificación en el que una palabra código depende no sólo de k bits de información sino también de bloques previos.

Un código convolucional se especifica por tres parámetros (n , k , m):

n = Es el número de bits de la secuencia codificada.

k = Es el número de bits del flujo de datos por unidad de tiempo.

m = Restricción de longitud o memoria de código

La tasa de código de este tipo de codificadores convolucionales se define como k/n que es la relación entre la cantidad de bits de datos y la cantidad total de bits.

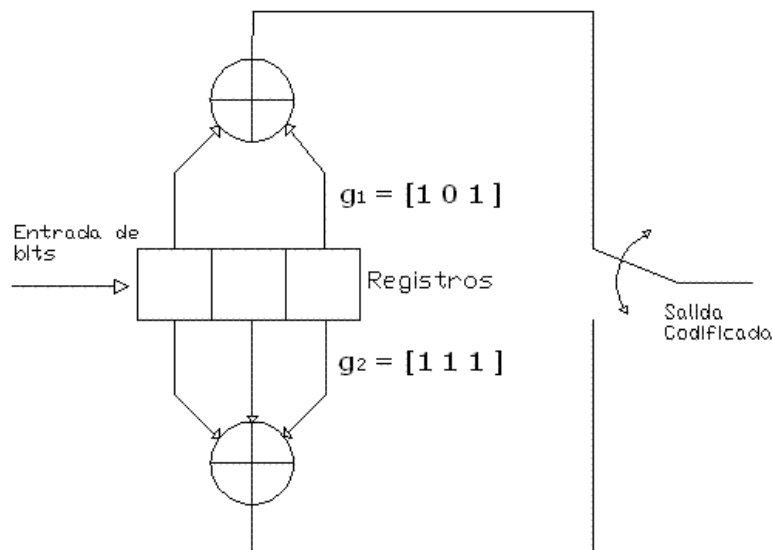


Figura 3.3 Codificador Convolucional ($m=3$, tasa de código $1/2$)

Para explicar el funcionamiento de un codificador convolucional se presenta a continuación un ejemplo sencillo.

Utilizaremos un codificador convolucional del tipo $(2, 1, 3)$ es decir: un bit representa el flujo de datos de entrada (bit de entrada), dos bits de secuencia codificada (salida codificada) por cada bit de entrada y tres bits de longitud del registro. La tasa de código es de $1/2$.

En la Figura 3.3 se presenta un codificador convolucional y puede observarse que las conexiones entre los registros y los sumadores dan las características del código, para este código convolucional los vectores $g_1 = [1 0 1]$ y $g_2 = [1 1 1]$ determinan las conexiones entre los sumadores y los registros. Un elemento en los vectores g_1 y g_2 con valor "0" indica que no hay conexión al sumador y un elemento del vector con un valor de "1" indica que existe una conexión al sumador. Los sumadores funcionan tal y como lo hace una compuerta XOR.

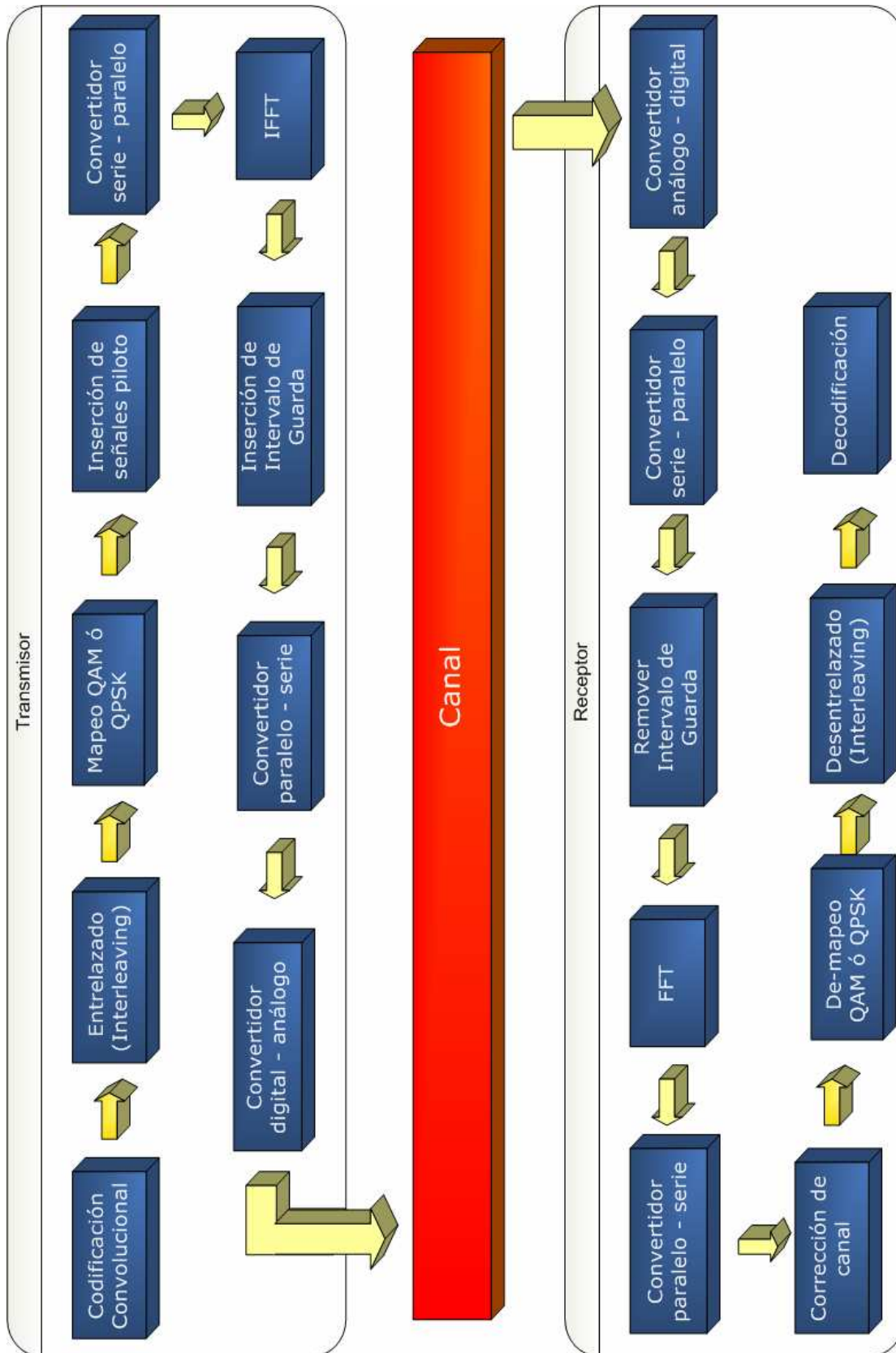


Figura 3.4 Diagrama de bloques de un Transmisor-Receptor OFDM.



En la Figura 3.5 se muestra la tabla de verdad para el sumador del codificador convolucional.

| Suma | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $0 \oplus 0 = 0$ | $0 \oplus 1 = 1$ | $1 \oplus 0 = 1$ | $1 \oplus 1 = 0$ |

Figura 3.5. Tabla de verdad para el sumador del codificador convolucional.

Tomemos como mensaje el siguiente vector “s” ($s = [1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1]$) tomando como bit inicial el que se encuentra a la extrema izquierda, este bit será el primero en ingresar al codificador convolucional. En la figura 3.6 se observa el desarrollo para la obtención de la secuencia codificada. Se obtendrá otro vector de nombre “u” con doble de longitud que el vector “s”, debido a esto será necesario considerar un mayor ancho de banda a utilizar.

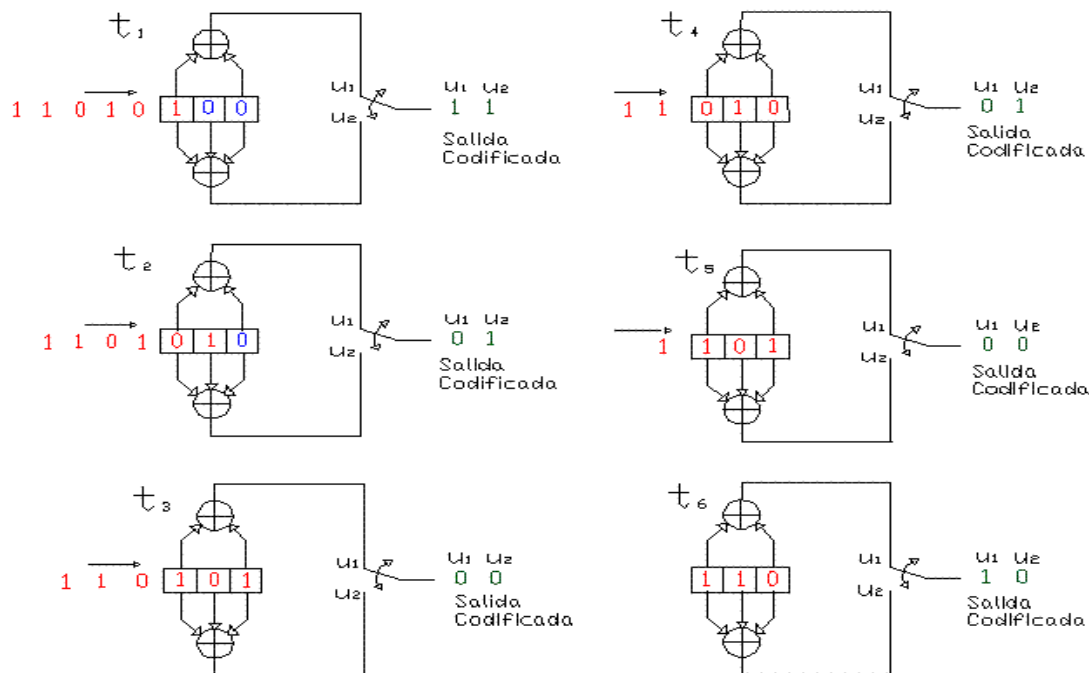


Figura 3.6 Obtención de la salida codificada para un codificador convolucional (2, 1, 3) con tasa de código de 1/2

En la tabla 3.1 se muestran los vectores “s” y “u”, entrada y salida respectivamente obtenidos del codificador.

| Vector | Datos | | | | | |
|--------|-------|----|----|----|----|----|
| s | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| u | 11 | 01 | 00 | 01 | 00 | 10 |

TABLA 3.1 VECTORES “S” (DATOS DE ENTRADA) Y “U” (SALIDA CODIFICADA)
Diagrama de Estados



Del codificador convolucional antes mencionado podemos obtener su diagrama de estados que se muestra en la Figura 3.7. Un diagrama de estados nos permite visualizar de manera gráfica los estados y las transiciones que sufre el codificador en cualquier momento. Cada nodo representa un estado y en cualquier tiempo el codificador puede encontrarse en uno de estos estados. Las flechas que salen de los nodos representan las transiciones del codificador que se dirigen al estado siguiente y las que entran al nodo representan la transición del estado anterior. Sobre las flechas se indican el bit de entrada y los bits de salida ($X/Y_A Y_B$), debido a lo antes mencionado sólo pueden ocurrir dos eventos en cada tiempo, que el bit de entrada sea “1” o sea “0”. Un codificador puede pensarse como una máquina de estados. [8]

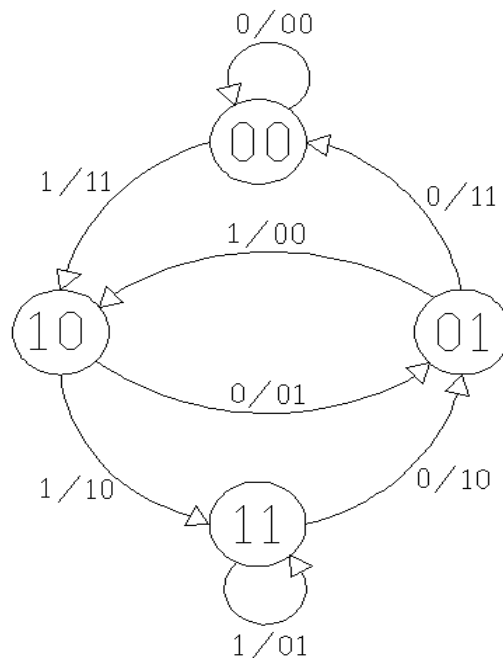


Figura 3.7 Diagrama de estados del codificador convolucional (2, 1, 3) con tasa de código de $\frac{1}{2}$

Diagrama de Trellis

Una vez que se ha obtenido el diagrama de estados también se puede obtener el Diagrama de Trellis, este diagrama (también gráfico) es utilizado para verificar las posibles trayectorias que puede seguir nuestra salida codificada. De manera similar al diagrama de estados previamente visto, de cada estado parten otras dos trayectorias, una si el bit enviado es “1” y otra trayectoria diferente si el bit enviado es “0”. En el diagrama de Trellis el estado siguiente depende directamente de la entrada y del estado actual. En la Figura 3.8 se presenta el diagrama de Trellis correspondiente a nuestro ejemplo, puede observarse en color negro la trayectoria final que seguirá nuestra salida codificada. Mas adelante retomaremos este tipo de diagrama para explicar el funcionamiento del decodificador en la etapa de recepción del sistema OFDM.

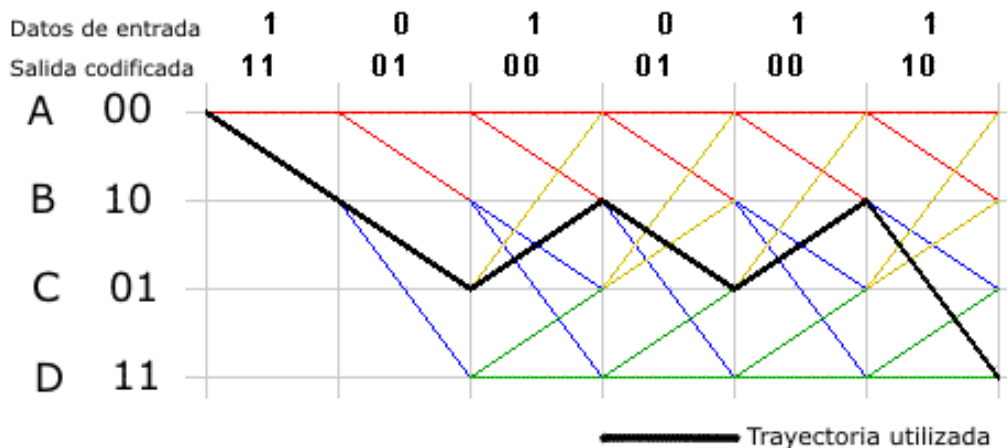


Figura 3.8 Diagrama de Trellis para el codificador convolucional [20]

3.3.2 Entrelazado (Interleaving)

Se conoce como “Interleaving” al proceso de entrelazar, intercalar o intercambiar los bits que se encuentran alojados en los símbolos con el fin de minimizar la pérdida de información por errores de ráfaga (Burst errors). Estos errores pueden afectar a más de un bit en la transmisión y correr el riesgo de que el símbolo no sea recuperado correctamente en el receptor.

En la Figura 3.9 se muestra el procedimiento “Interleaving” de una manera sencilla, se observa claramente el intercalado entre los 2 símbolos para formar un par de nuevos símbolos. Se presenta un error de ráfaga el cual afecta al primer nuevo símbolo pero debido a que previamente se realizó el proceso Interleaving dicho símbolo no presenta un daño considerable al tiempo de recuperar su forma original en el proceso de De-Interleaving en el receptor OFDM.

La principal desventaja del “Interleaving” es que introduce latencia (retardo) al sistema, ya que el proceso debe esperar a la recepción de todos los bits del mensaje para poder realizar el proceso De-Interleaving y emplear las técnicas de corrección de errores.

A continuación se presenta un ejemplo sencillo de la etapa Interleaving empleando un código de corrección de errores simple que consiste en repetir 4 veces cada bit a transmitir.

Mensaje a transmitir: “ofdm&plc”

Mensaje codificado: “oooofffddddmmmm&&&pppplllcccc”

Transmisión *sin Interleaving*

Mensaje sin error: “oooofffddddmmmm&&&pppplllcccc”

Mensaje con error de ráfaga: “ooooff_____dmmmm&&&pppplllcccc”

La palabra fddd se ha perdido lo que podría provocar un error en la decodificación o incluso la imposibilidad de ser decodificado el mensaje debido a que casi todos los bits para la palabra dddd se han perdido.

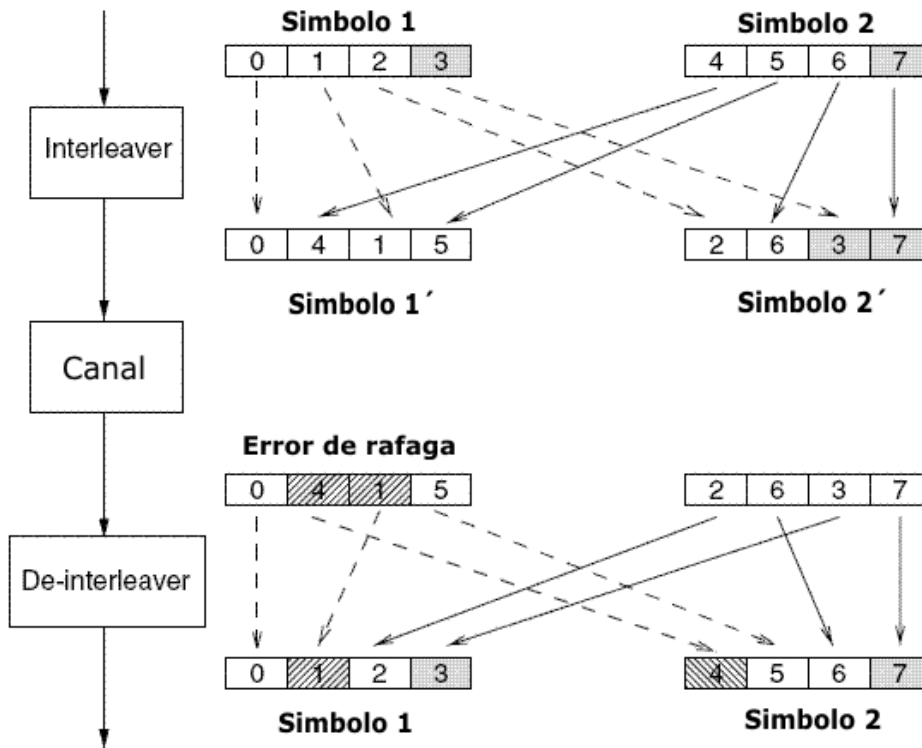


Figura 3.9 Procesos Interleaving y De-Interleaving [7]

Transmisión *con Interleaving*

Mensaje sin error: "ooooffffdddddmmmm&&&pppplllcccc"
 Interleaving: "mcpdf&lmcpdf&lmcpdf&lmcpdf&l"
 Mensaje con error de ráfaga: "mcpdf&__pdf&lmcpdf&lmcpdf&l"
 De-Interleaving: "_ooffffddd_mmm&&&pppp_lll_ccc"

De cada palabra oooo, mmmm, llll, cccc sólo se altera un bit, de modo que nuestro código es capaz de decodificar todo el mensaje correctamente..

3.3.3 Mapeo

El mapeo tiene un rol muy importante en la modulación OFDM, en este proceso se "mapean" los flujos de bits de información en componentes I(Inphase) y Q(cuadratura) – fase y amplitud, respectivamente- los cuales representan un punto único para la generación de un símbolo OFDM, dichos puntos pueden estar contenidos en un diagrama de constelación. Un diagrama de constelación es una representación de un esquema de modulación digital en el plano complejo, los puntos de la constelación son dibujados en un sistema de coordenadas rectangulares en donde los componentes I y Q que son referidos



corresponden a los ejes “x” e “y” respectivamente. La modulación puede lograrse utilizando M-PSK ó QAM según se requiera.

M-PSK

Las modulaciones M-PSK (M-ary Phase-Shift Keying) se refieren a las modulaciones M-ario por desplazamiento de fase, en donde M-ario es un término que se deriva de palabra “binario”, la “M” sólo es un dígito que representa la cantidad de posibles combinaciones para las fases de salida en la modulación [21]. Por ejemplo cuando M=2 se trata de una modulación BPSK (Binario PSK), cuando M=4 la modulación será (QPSK), es decir, modulación por desplazamiento de fase cuaternaria. M = 8, si hubiera ocho posibles fases de salida, etcétera.

Para ejemplificar el funcionamiento de las modulaciones M-ario PSK tomaremos a M=4, por lo que trabajaremos con una modulación QPSK.

QPSK

La modulación por desplazamiento de fase cuaternaria o en cuadratura PSK es un tipo de modulación angular con amplitud constante. Es una técnica de modulación basada en PSK (Desplazamiento por fase) que permite el mapeo de los datos hacia una señal OFDM

En QPSK [9], dos bits en el flujo de bits son tomados y cuatro fases de las frecuencias portadoras son usados para representar las cuatro combinaciones de dos bits.

$$\begin{aligned}
 s(t) &= A \sin (2\pi f_c t + 45^\circ) \text{ para un } 11 \\
 &= A \sin (2\pi f_c t + 135^\circ) \text{ para un } 10 \\
 &= A \sin (2\pi f_c t + 225^\circ) \text{ para un } 00 \\
 &= A \sin (2\pi f_c t + 315^\circ) \text{ para un } 01
 \end{aligned}$$

En donde s(t) será la señal modulada en función del tiempo, A será la amplitud que como se puede observar siempre será constante, f_c es la frecuencia de la portadora y t el periodo.

En la tabla 3.2 se puede observar la relación entre las fases y los datos de bits asignados por cada fase.

| Fase | Datos |
|------|-------|
| 45° | 11 |
| 135° | 10 |
| 225° | 00 |
| 315° | 01 |

TABLA 3.2 FASES Y LOS DATOS DE BITS ASIGNADOS.



QAM.

QAM es una técnica combinada entre las modulaciones de fase y amplitud, en esta modulación tanto la fase como la amplitud pueden ser modificados. Cada punto indica una única amplitud y fase de la onda.

En general la señal modulada puede ser representada por:

$$s(t) = a(t) \cos[2\pi f_c t + \Theta(t)] \quad \text{Eq. 3.1}$$

En QAM la amplitud de la señal de modulación en banda base está determinada por $a(t)$ y por la fase $\Theta(t)$. La componente I (Inphase) está dada por:

$$I = a(t) \cos \Theta(t) \quad \text{Eq. 3.2}$$

Y la componente cuadrática Q por

$$Q = a(t) \sin \Theta(t) \quad \text{Eq. 3.3}$$

La diferencia entre ambos métodos de modulación, es que cuando se utiliza la técnica PSK, todos los símbolos son conformados con el mismo valor de amplitud mientras que lo que varía es la fase de la señal y en QAM se pueden modificar ambos. QAM busca maximizar el área de decisión para cada punto de la constelación, lo que permite una mayor confiabilidad en la transmisión. En la figura 3.10 se presenta la comparación entre las constelaciones para la modulación 16-PSK y 16-QAM. Los puntos en la constelación representan símbolos de modulación, en nuestro caso símbolos OFDM. La técnica de modulación QAM busca maximizar el área de decisión para cada punto de la constelación que compone a la misma.

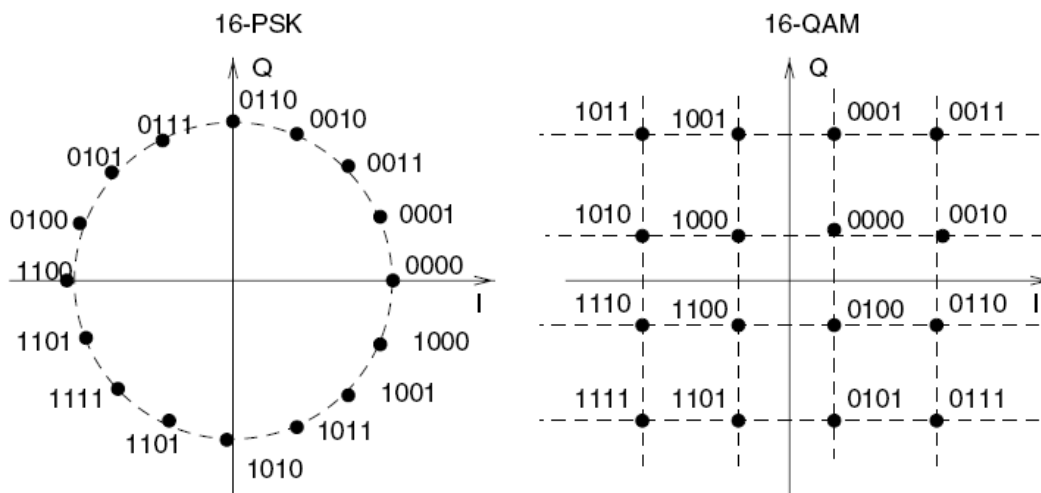


Figura 3.10 Comparación entre las constelaciones 16-PSK y 16-QAM [7]



3.3.4 Señales piloto (Pilot Insertion).

Para obtener una buena demodulación de la señal en la etapa del receptor se necesita realizar una *detección coherente*, es decir, el demodulador necesita conocer la frecuencia y la fase de la portadora para poder obtener una buena estimación del canal, se hablará con más detalle en la etapa del receptor OFDM. Para realizar lo antes mencionado es necesario que la etapa del transmisor realice un “generador de subportadoras o señales piloto”. Una estructura bidimensional de señales OFDM en tiempo y frecuencia denominada “red piloto” (grid pilot) será suficiente para que el canal pueda ser medido y estimado en el receptor. Un ejemplo de esta “red piloto” se presenta en la figura 3.11 [10]. La separación mínima en la dirección del tiempo entre las señales piloto obedece a la coherencia en el tiempo del canal mientras que la separación en el dominio de la frecuencia obedece a la coherencia en el ancho de banda. En la figura 3.11 podemos observar que las señales piloto se encuentran separadas tres unidades en frecuencia y 4 unidades en tiempo obteniendo una densidad piloto de $1/12$, esto es, una unidad de cada 12 es tomada para la estimación del canal. En la inserción de las señales piloto cuanto mayor sea la densidad de los símbolos mayor será la exactitud de la estimación del canal. Sin embargo, cuanto mayor sea dicha densidad serán mayores las pérdidas en la relación señal a ruido y en la velocidad de transmisión de los datos.

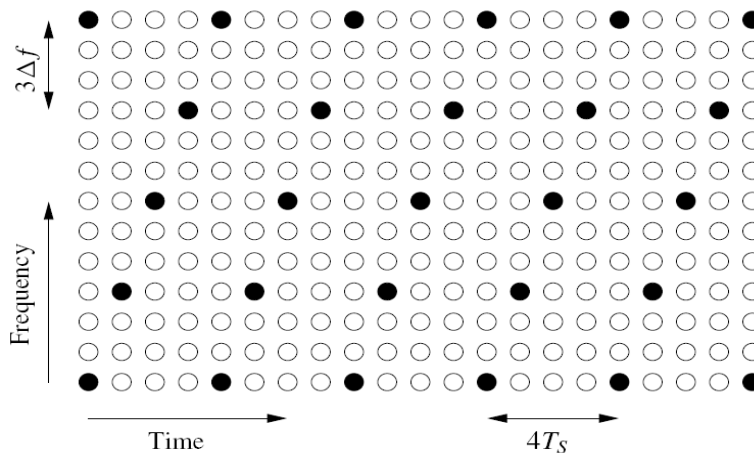


Figura 3.11 Distribución de las señales piloto en la red piloto (grid pilot)

Las señales o subportadoras piloto cumplen con dos funciones importantes, la primera tiene fines de sincronización entre la frecuencia y el tiempo, la segunda esta relacionada con la estimación del canal para una correcta demodulación [11].

Después de insertar las señales piloto los símbolos OFDM deben enviarse para ser modulados por medio de las Transformada Rápida Inversa de Fourier (IFFT), proceso que se explicará más adelante en este mismo capítulo. Para poder realizar la IFFT correctamente es necesario que los datos, que actualmente se envían de manera serial, se procesen para ser enviados de forma paralela, para lograr lo que antes se menciona es



necesaria la utilización de un convertidor serial a paralelo (S/P) que a continuación se explica.

3.3.5 Convertidores Serial – Paralelo

La mayor cantidad de comunicaciones entre sistemas se realiza de manera serial. Esto significa que será enviado un solo bit por tiempo, con una coordinación de tiempo entre transmisor y el receptor.

Podemos observar en la figura 3.12 que para enviar 6 bits de manera serial, sólo un conductor o cable y un receptor son requeridos.

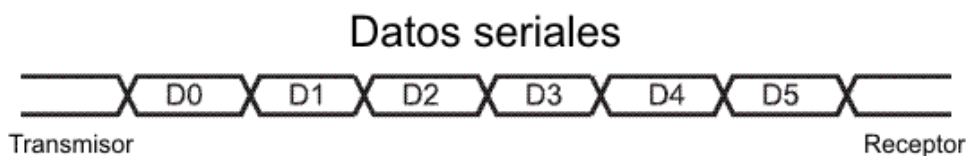


Figura 3.12 Transmisión y recepción de datos de manera serial [12].

En cambio para la comunicación en forma paralela es necesario considerar un número “n” de líneas de datos para transmitirse hacia “n” receptores. Para transferir un número de bits al mismo tiempo se deben enviar en forma “paralela”, una conexión por cada bit. Figura 3.13

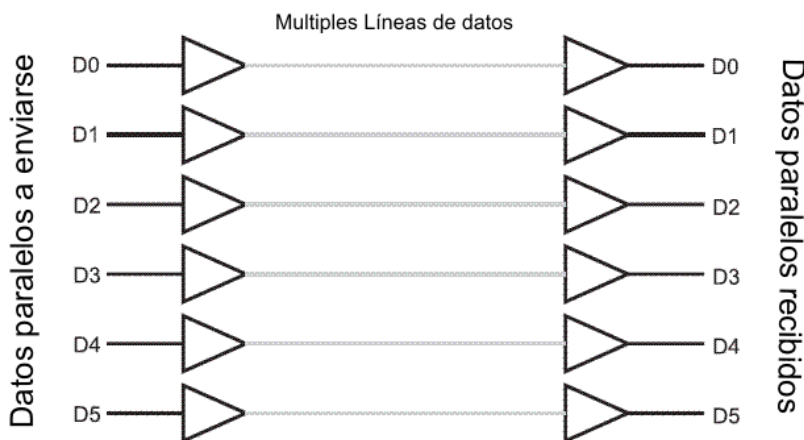


Figura 3.13 Transmisión y recepción de datos de forma paralela [12].

Como se ha comentado anteriormente, para los sistemas digitales una manera rápida de enviar datos es en forma paralela (todos los bits simultáneamente), pero en ocasiones la configuración en paralelo no es sencilla de implementar debido a que se requiere un número considerable de líneas de transmisión. Por esta razón en muchos casos los datos binarios que están en forma paralela se convierten en forma serial antes de ser



transmitidos. El multiplexor es un dispositivo digital que permite la recepción de datos en forma paralela y los convierte a su salida en forma serial.

La base para este tipo de conversión es el “shift register” (registro de desplazamiento, flip-flop), los cuales convierten un número de bits paralelos en una sola cadena (serial) de bits dependiente del tiempo y convierten esa cadena de bits de regreso en un grupo de bits en paralelo.

En la figura 3.14 se muestra este proceso con ocho bits de datos en paralelo siendo convertidos en un flujo de bits y transmitidos al receptor, los cuales recrean los ocho bits de regreso en un formato de datos paralelo.

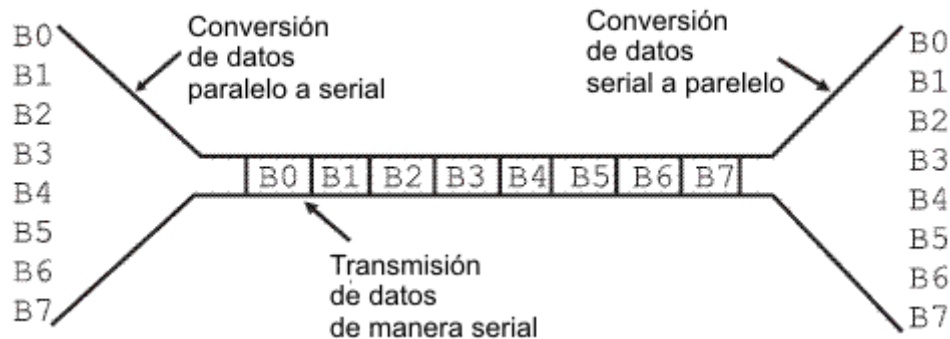


Figura 3.14 Conversiones paralela - serial y serial a paralelo [12].

3.3.6 IFFT

Las siglas IFFT representan la Transformada Rápida Inversa de Fourier, para poder explicar este proceso es necesario hablar previamente de las transformadas de Fourier, un concepto que nos permite desarrollar de manera más sencilla tareas complejas en los sistemas de comunicaciones.

Los sistemas digitales demandan en la mayoría de los casos operaciones rápidas y precisas para sus procesos complejos. Una herramienta analítica muy utilizada en diversos campos de aplicación como son, óptica, sismología, telecomunicaciones, eléctrica es la transformada de Fourier. Dicha transformada nos permite convertir o transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia; la importancia de esta transformación es que para muchos procesos un dominio suele ser más sencillo de manipular que el otro, por ejemplo, para algunos procesos el manejo matemático es más sencillo en el dominio de la frecuencia que en el dominio del tiempo.

En Comunicaciones la transformada de Fourier puede ser aplicada a señales analógicas y a señales digitales. En el apéndice A de este documento se presentan las fórmulas generales de la Transformada de Fourier.

IFFT en OFDM

Una vez que se han comentado las generalidades de la transformada de Fourier explicaremos por que se utiliza la transformada inversa en el transmisor OFDM. Recordando que los componentes I y Q de las modulaciones QPSK ó QAM utilizadas representan datos complejos, dichas componentes se encuentran en el dominio de la



frecuencia y serán transformadas al dominio del tiempo de manera paralela con ayuda de la IFFT para poder ser enviadas por el canal de transmisión. El proceso se representa en la Figura 3.15.

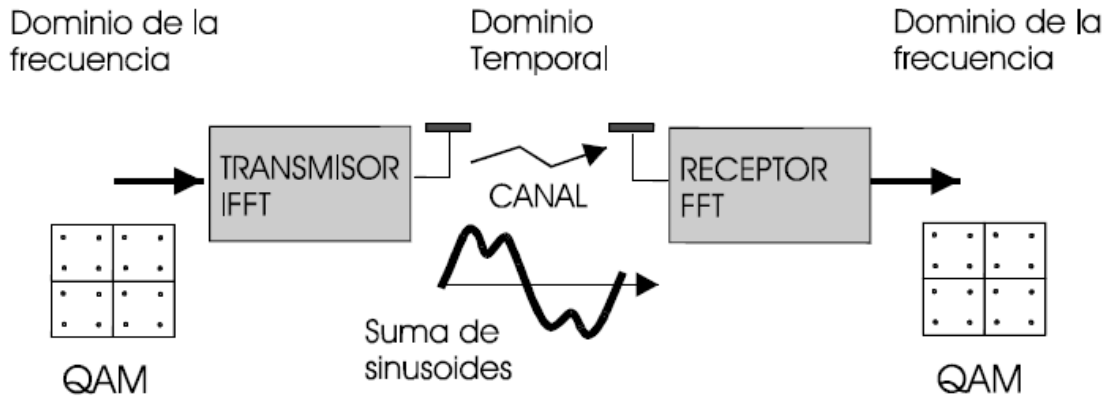


Figura 3.15. Comportamiento del transmisor y receptor IFFT e FFT

3.3.7 Prefijo cíclico

Antes de comentar el concepto de prefijo cíclico es preciso explicar algunos conceptos importantes.

Ortogonalidad

Una vez obtenidos los símbolos OFDM después de ser procesados por la IFFT es necesario evitar que dichos símbolos interfieran entre sí, es decir que el final de un símbolo interfiera con el comienzo de otro.

Para evitar que esto suceda es necesario que cada portadora se ubique a una separación en frecuencias dada por: $f_s = 1/T_s$ (Donde T_s es el periodo del símbolo), a este proceso se le llama "ortogonalidad" [13] y es muy importante para los sistemas OFDM. Ver figura 3.2 La ortogonalidad reduce el problema de la interferencia inter-simbólica (ISI) que a continuación se detalla.

Interferencia Inter-simbólica (ISI)

La ISI por sus siglas en inglés (Intersymbol interference), es una interferencia que se genera entre los símbolos OFDM, lo cual significaría que la señal OFDM perdiera su principio de ortogonalidad. Esta interferencia se caracteriza por provocar traslapamiento entre los símbolos OFDM, para evitar ISI es necesario agregar un "Intervalo de guarda" el cual es una copia de la parte final del símbolo y debe ser mayor al retraso en el envío de los símbolos OFDM, a este procedimiento se le conoce como **prefijo cíclico**. En la figura 3.16 se observa la inserción del intervalo de guarda permitiendo que el tiempo de duración del símbolo OFDM sea mayor evitando con ello la ISI [6, 14].

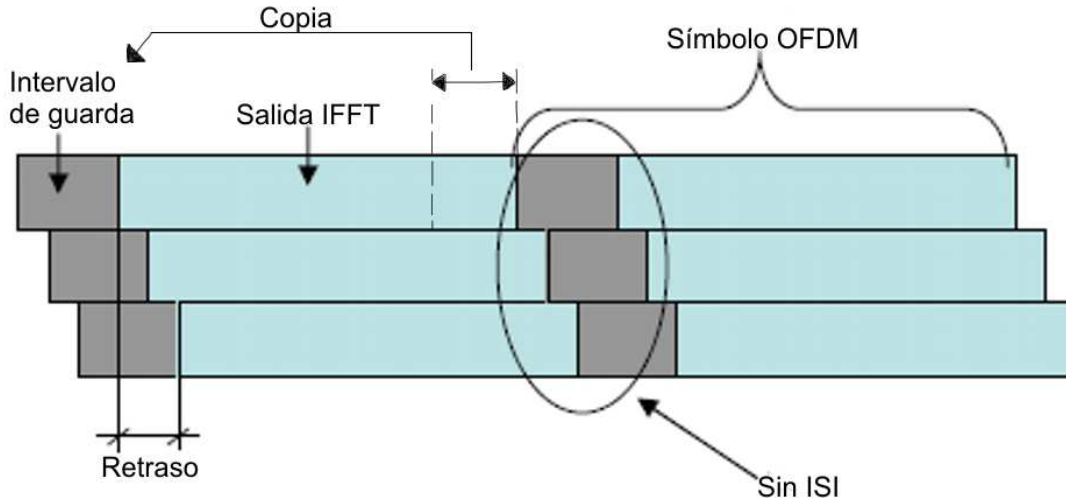


Figura 3.16 Procedimiento del prefijo cíclico [14]

Cuando se incluye un intervalo de guarda se reduce el ancho de banda disponible pero se evita el grave problema que ocasiona la ISI. Este intervalo de guarda debe ser seleccionado de tal manera que el tiempo de guarda (T_G) siempre supere el máximo retardo posible de la señal adyacente.

Quedando entonces el tiempo total del símbolo como:

$$T_S = T_U + T_G \quad \text{Eq. 3.4}$$

En la figura 3.17 se observan la duración del intervalo de guarda T_G , la duración de tiempo útil T_U y la duración total del símbolo OFDM (T_S)

3.3.8 Convertidor Paralelo – Serial

Una vez que los símbolos han sido modulados por la IFFT y se les han insertado intervalos de guarda deben procesarse para poder ser enviados por el cable eléctrico por lo que es necesario utilizar un convertidor paralelo – serial anteriormente comentado en este mismo capítulo.

La comunicación serial es la más idónea para largas distancias [16].

3.3.9 Convertidor Digital-Analógico.

La conversión digital / analógica es el proceso de tomar un valor representado en código digital (como binario) y convertirlo en un voltaje o corriente que sea proporcional al valor digital.

De manera general se presenta el funcionamiento de un convertidor D / A

$$\text{Salida analógica} = K \times \text{entrada digital} \quad \text{Eq. 3.5}$$

donde K es el factor de proporcionalidad y tiene un valor constante para un convertidor D / A dado. La salida analógica puede ser una tensión o una corriente.



Por ejemplo para $K = 3 \text{ V}$

$$V_{\text{SALIDA ANALÓGICA}} = (3 \text{ V}) \times \text{entrada digital.}$$

$$V_{\text{SALIDA ANALÓGICA}} = (3 \text{ V}) \times (1101)_{\text{binario}}$$

$$V_{\text{SALIDA ANALÓGICA}} = (3 \text{ V}) \times (13)_{\text{decimal}} = 39 \text{ V}$$

La conversión D / A es importante en el sistema de comunicaciones PLC para que los datos puedan ser enviados por el cable eléctrico de forma analógica.

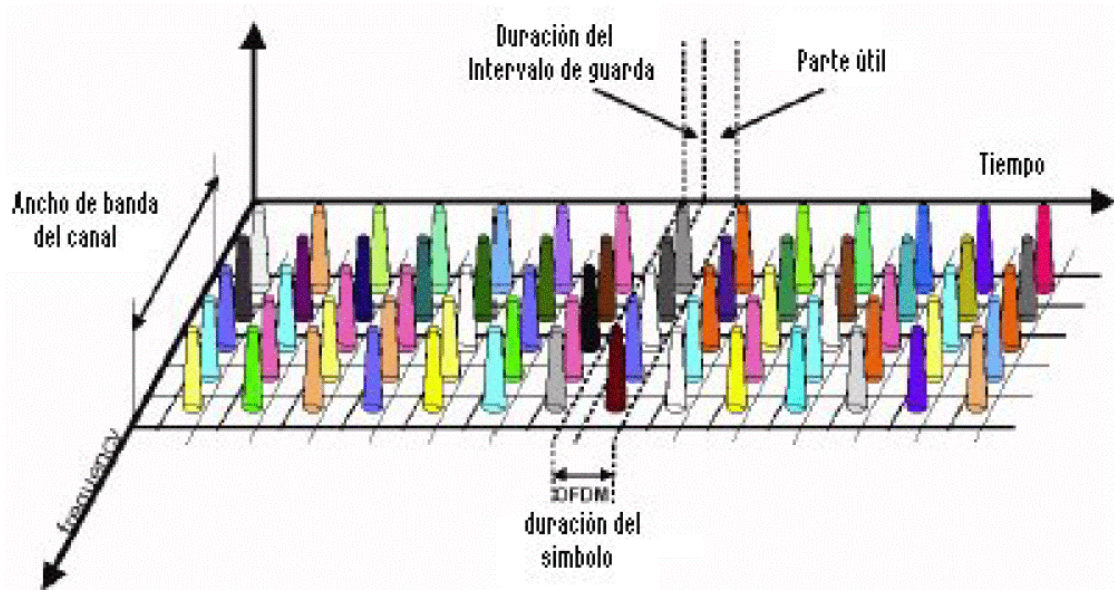


Figura 3.17. Inserción del intervalo de guarda [15]

3.4 Canal de comunicación (Cable eléctrico).

El canal de comunicaciones en los sistemas PLC, como ya se ha comentado, son los cables eléctricos, por lo cual a continuación se presenta una descripción de ellos.

Existe una gran diversidad de cables eléctricos clasificados por su capacidad de conducción, aplicación, forma, calibre (tamaño), tipo de aislamientos, etc. cuyo estudio está fuera del alcance de esta tesis, por lo que en la figura 3.18 se presenta, de manera general, un cable eléctrico y sus principales componentes.

Características de los conductores eléctricos.

Conductor

Los conductores eléctricos están fabricados de materiales capaces de conducir o transmitir electrones de manera eficiente y a bajo costo.

Los materiales más utilizados para construcción de conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, el primero presenta mejores características eléctricas y mecánicas (La conductividad del aluminio es aproximadamente el 60 % y su esfuerzo de tensión a la ruptura es del 40% respecto a la del cobre [17]). Una característica del aluminio sobre el



cobre se presenta debido a que es más liviano y se utiliza en la construcción para cables a nivel de transmisión (230-750kV) principalmente.

Es preciso mencionar que muchos de los cables se hacen con aleaciones de estos dos conductores para aprovechar sus diversas características.

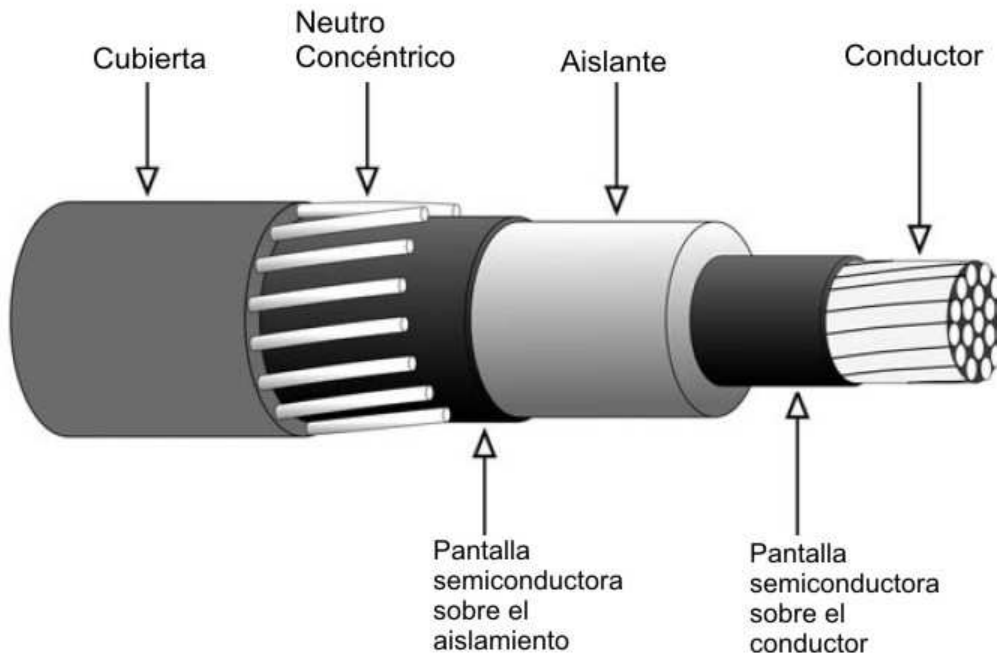


Figura 3.18 Cable eléctrico y sus componentes.

En la tabla 3.3 se presentan algunas características comparativas entre estos dos materiales.

| | Cobre | Aluminio |
|---|---------------------------|---------------------------|
| Grado de pureza [%] | Mayor al 99.9 | Mayor al 99.5 |
| Resistividad a 20° C [ohm-mm ² /m] | 17.241 x 10 ⁻³ | 28.264 x 10 ⁻³ |
| Coefficiente de variación de resistividad eléctrica a 20°C, por cada 20°C | 3.9 x 10 ⁻³ | 3.9 x 10 ⁻³ |
| Densidad a 20°C [g/cm ³] | 8.89 | 2.70 |
| Carga de ruptura [MPa] | 230 a 250 | 120 a 150 |
| Temperatura de Fusión [°C] | 1080 | 660 |

TABLA 3.3 CARACTERÍSTICAS DEL COBRE Y ALUMINIO UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS.



Pantallas semiconductoras.

Las pantallas semiconductoras son importantes para confinar el campo eléctrico y distribuirlo uniformemente, también ayuda a reducir el deterioro del aislamiento si el cable es expuesto a agentes dañinos inmersos en el ambiente en el que se encuentren instalados.

Aislante

El aislante ayuda al conductor para poder soportar altos voltajes, variaciones de temperatura provocadas por corrientes de grandes cargas conectadas e incluso corrientes de corto circuito [18].

Los cables pueden tener aislamientos de los siguientes tipos:

- Aislamiento termoplástico fabricado con PVC (Policloruro de Vinilo).
- Aislamiento termofijo fabricado con EP (Etileno propileno) o XLP (Polietileno reticulado).

Dependiendo de la aplicación para el cable ambos tipos proveen protección contra humedad, calor, presencia de agua, emisión de humos y otros agentes nocivos para el conductor.

Neutro concéntrico

El neutro concéntrico es capaz de transportar corrientes de desbalanceo en caso de tener un sistema trifásico.

En sistemas monofásicas se utiliza como neutro, esto significa que la resistencia del neutro es igual a la del conductor de fase [18].

En muchas acometidas eléctricas se utiliza este tipo de cable con neutro concéntrico para evitar que existan conexiones ilícitas entre el transformador de distribución y la caja del medidor del cliente.

Cubierta.

Principalmente hecha de polietileno y su función es evitar que la energía eléctrica entre en contacto con las personas u objetos que puedan provocar un corto circuito en la instalación, también protege al cable de esfuerzos mecánicos para evitar su deterioro y garantizar un largo periodo de vida.

Los cables eléctricos se utilizan principalmente para transmitir energía eléctrica y alimentar con voltaje a los equipos conectados a un circuito. Como ya se menciono en el capítulo 1 no es nuevo que se piense en los cables eléctricos como medio para comunicar datos, pero hasta hace algunos años se comenzaron las pruebas con grandes tasas de transmisión utilizando este medio, lo cual le da un valor agregado a los conductores eléctricos.

Como ya se mencionó anteriormente, la transmisión de datos en un medio que no fue pensado para este fin, ya que puede provocar Interferencias Electromagnéticas (EMI).



3.5 Receptor OFDM

Una vez que la señal ha sido enviada por el cable eléctrico se inicia el proceso de recepción de los datos enviados.

En el diagrama OFDM presentado previamente en la Figura 3.4 podemos observar los diferentes procesos que se utilizan en la transmisión y recepción en los sistemas OFDM, muchos de estos procesos ya han sido explicados en el transmisor, por lo cual sólo se mencionaran los detalles de aquellos procesos en donde sea importante aclarar algún proceso en particular.

3.5.1 Receptor.

Las señales OFDM se reciben de forma analógica y son procesadas por un convertidor analógico digital. Los datos digitales son transportados en una cadena en forma serial y es necesario convertirlos de forma paralela para que puedan ser demodulados.

Una vez que los datos han pasado por un convertidor serial a paralelo es necesario remover el intervalo de guarda (T_G) debido a que los símbolos OFDM tienen actualmente una duración $T_S = T_U + T_G$ y evitar errores en la sincronización de los datos.

Observando la figura 3.15 se recuerda que es necesario realizar la transformada rápida de Fourier (FFT) para poder demodular los símbolos OFDM y se observa la transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia para continuar con el proceso de recepción de los datos.

Una vez que los datos se encuentran en el dominio de la frecuencia se hacen pasar por un convertidor paralelo-serie para poder estimar o corregir el canal.

3.5.2 Estimación del canal

La estimación del canal es importante para identificar la amplitud (Q) y la fase (I) referenciados de las constelaciones QAM o M-PSK dependiendo cual haya sido elegido para el mapeo. Este proceso permite que cada subportador pueda ser De-mapeado posteriormente de manera correcta. La estimación del canal en sistemas OFDM requiere de la inserción previa de las señales piloto, dicho proceso se comentó anteriormente en este mismo capítulo en el transmisor OFDM.

La estructura mostrada en la figura 3.11 es muy utilizada ya que el canal puede ser visto como una señal bidimensional, en tiempo y en frecuencia, mostrando la posición de las señales piloto. También la estructura bidimensional impone límites de densidad a los pilotos para obtener una representación segura del canal [7].

Una vez que se ha estimado el canal el proceso siguiente es De-mapear los datos, es decir, identificar la información única por medio diagrama de constelación como el que se mostró en la figura 3.10.

Dicha constelación contiene flujos de bits en posiciones únicas que son identificados por los valores I y Q de las modulaciones QAM ó M-PSK, según sea el caso.

Como ya se explicó anteriormente, el proceso Interleaving evita que los errores de ráfaga causen demasiado daño a los datos enviados. El proceso inverso (De-Interleaving) se encuentra en el receptor en donde los datos recuperan su forma original, como se observa en el ejemplo presentado en la figura 3.9.



3.5.3 Decodificación del canal.

En la figura 3.8 se observa el diagrama de Trellis obtenido de la codificación convolucional, a cada nodo del diagrama le corresponde más de una trayectoria posible y a cada trayectoria una codificación diferente para los datos a enviar, por eso es importante identificar cual de esas trayectorias es la correcta para evitar errores en la transmisión. Para descartar aquellas trayectorias que produzcan errores en la decodificación del canal se utiliza el algoritmo de Viterbi que se basa en el diagrama de Trellis. Dicho algoritmo intenta reconstruir las transiciones que se produjeron al codificar una secuencia de entrada dada.

Se ha presentado, entonces, el procedimiento principal que utilizan los sistemas PLC por medio de la modulación OFDM para la transmisión y recepción de datos vía cable eléctrico.

3.6 Algunas aplicaciones para los sistemas OFDM.

En los últimos 10 años la modulación OFDM ha tenido importante uso en diferentes aplicaciones que a continuación se presentan:

DAB (Digital Audio Broadcasting)

DAB es una tecnología digital que ofrece ventajas considerables sobre la radio FM y AM existente.

HDTV –Digital Video Broadcasting Terrestre (DVB-T).

Es el nuevo desarrollo tecnológico para la televisión de alta definición utilizando transmisiones de video digital.

Redes LAN Inalámbricas.

Otro campo de aplicación de la modulación OFDM son las redes de área local (LAN) en las cuales existen tasas de transmisión muy elevada en distancias cortas. Considera que OFDM será

Power Lines Communications

Comunicaciones en las líneas de potencia, tecnología que permite utilizar las líneas eléctricas como medio de transmisión para datos de banda ancha. Actualmente superiores a los 200Mbps. De esta tecnología se habló en el capítulo 1 del presente documento.

Telefonía Celular

Actualmente se desarrollan equipos con tecnología celular que son considerados de Cuarta generación (4G), son equipos eficientes con capacidades en espacio mayor, transmisión de datos más confiable, mayor fidelidad en audio y video y velocidades hasta 5 veces más rápidas que las que se alcanzan con tecnología 3G hoy en día[19].



Capítulo 4.

Implementación del sistema de supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas utilizando PLC

Para la realización del supervisor de pérdidas eléctricas no técnicas, el cual es el tema principal de este documento, fue necesario implementar una red utilizando dispositivos PLC, construir un módulo de pruebas en donde se conectaron las cargas eléctricas a medir y se desarrolló una pieza de software que sirvió para finalizar el proyecto con resultados satisfactorios.

En este capítulo se detallan los elementos utilizados para la realización de pruebas y obtención de resultados que se reportarán en el siguiente capítulo.

4.1 Dispositivos Power Lines Communications

Actualmente existen diversas empresas, principalmente europeas, asiáticas y norteamericanas, que fabrican dispositivos PLC, entre las marcas más reconocidas encontramos las que a continuación se enlistan. Ver Figura 4.1

- **Corinex**, una empresa canadiense fundada en 1990, es líder en la manufactura de equipos PLC, es fundadora y miembro del consejo UPA (Universal Powerline Association¹) [1]
- **ASCOM**, empresa suiza de telecomunicaciones. [2]
- **Homeplug**, empresa Norteamericana dedicada a las creación de equipos PLC. [3]
- **LinkSys** de Cisco Systems, una empresa multinacional dedicada al hardware de telecomunicaciones. [4]
- **DS2**, empresa española pionera en la investigación, desarrollo y venta de los chips PLC. [5]
- **MainNET**, empresa Israelí líder en proveer banda ancha sobre líneas eléctricas desde su creación en 1999. [6]
- **NetGear**, empresa estadounidense manufacturera de equipos para redes computacionales. [7]
- **Ilevo**, compañía perteneciente a Schneider Electric. [8]

1. La Universal Powerline Association es una asociación internacional sin ánimo de lucro que trabaja para consensuar estándares globales y normativas regulatorias para el mercado PLC. [11]



- **OvisLink** compañía especializada en la investigación, desarrollo y fabricación de productos de networking. [9]
- **XAVi**, empresa dedicada al acceso a Internet, telecomunicaciones y transmisiones en banda ancha, fundada en taiwan en 1997. [10]



Figura 4.1. Algunas marcas que desarrollan y comercializan equipos PLC

Para el desarrollo de este documento y la justificación de los resultados que se presentarán más adelante, fue necesario encontrar y adquirir dispositivos PLC que se adaptaran a los requerimientos del sistema. Durante la etapa de investigación se realizó un estudio comparativo entre las principales marcas que proveen los productos PLC, en la Tabla 4.1 se presentan algunos de los resultados obtenidos y las principales características de los dispositivos evaluados. Con base en los resultados obtenidos del estudio comparativo se tomó la decisión de adquirir los adaptadores que fabrica la empresa Corinex por su calidad, confiabilidad y bajo costo.

El adaptador utilizado para las pruebas fue el Corinex AV200 Powerline Ethernet Wall Mount Adapter del cual se presentan a continuación sus características.

4.1.1 Corinex AV200 Powerline ethernet wall mount adapter.

Es un adaptador o interfaz de red que conecta computadoras, el acceso a internet y otros dispositivos como consolas de video juegos, etcétera, con la finalidad de crear una red LAN (Local Area Network) utilizando la propia red eléctrica residencial, oficinas u hoteles. Ver figura 4.2

En el Apéndice B se presentan las especificaciones físicas y técnicas del AV200 Powerline Ethernet Wall Mount Adapter en adelante “adaptador AV200”.

Entre sus principales características se encuentran las siguientes:

- Habilita la conexión entre PC's u otros dispositivos Ethernet en una red LAN a través de los cables eléctricos.



- Permite compartir archivos, impresoras y acceso a Internet de banda ancha
- Compartir aplicaciones multimedia, voz, datos, audio y video.
- Evita la necesidad de crear una red con cable UTP-5 que sea visible.
- Puede interactuar con otras tecnologías de comunicaciones como las inalámbricas y en algunos casos puede llegar a ser más eficiente.



Figura 4.2 Corinex AV200 PowerLine WallMount.

El adaptador AV200 trabaja con chips DS2, como el que se muestra en la figura 4.3, que actualmente son de los más competitivos en el mercado por su alta confiabilidad y tasas de transmisión que actualmente se encuentran arriba de 200Mbps [5]. Los chips DS2 trabajan bajo los estándares de la UPA.

La versatilidad adaptador AV200 permiten diversas funcionalidades en las redes PLC como las que se muestran en la figura 4.4.



Figura 4.3 Chip DS2



En la figura 4.4 se observan tres adaptadores AV200 que conectan en una red LAN los siguientes dispositivos:

- Un equipo de video compuesto por un televisor de alta definición y una consola de video juegos
- Una computadora portátil
- Un MODEM ADSL que provee la señal de Internet de banda ancha.

El televisor puede recibir la señal desde la consola de video juegos el cual, al mismo tiempo, comparte la conexión de banda ancha con la computadora portátil. O bien la computadora puede enviar las señales al televisor por medio de la consola de video juegos.

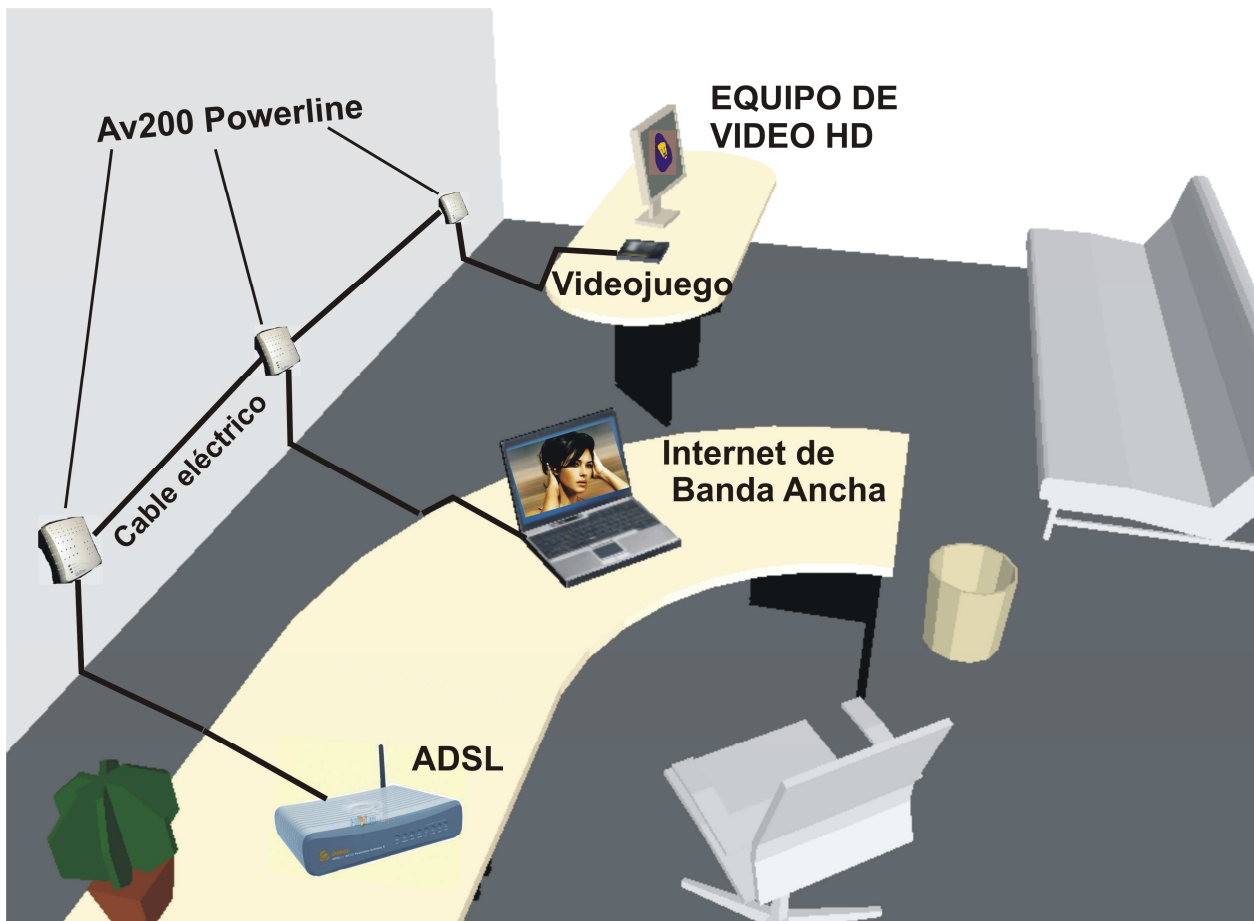


Figura 4.4 Diferentes soluciones de los equipos Corinex.



| | | | | | | |
|--|--|--|--|---|--|---|
| | | | | | | |
| Descripción | PL-RJ45-200: Puede ser conectado con otro PC, router, cable modem, DSL, etc. | HDXB101: NETGEAR's Powerline HD Network Kit. Permite la transmisión de Internet de banda ancha y ofrece una alta calidad de video. | PowerLine AV Ethernet : Modem para redes powerline-Transmisión de datos superior a los 200 Mbps. | Corinex AV200 Powerline: Tiene la capacidad de transmitir datos a altas velocidades, video de alta definición (HDTV) y al mismo tiempo permite el acceso a Internet de banda ancha. | DH10PF: El adaptador DH10PF permite la transmisión de Televisión de alta definición, redes domesticas de alta velocidad, para PC's, MAC, XBox 360, modems de banda ancha, etc. | NtPLUS: Las Soluciones MainNet permite la conexión a Internet de alta velocidad, Voz sobre IP y video a la carta. |
| Marca | OvisLink | NETGEAR | LinkSys | Corinex | DS2 | MainNet |
| Estándar | IEEE 802.3, IEEE 802.3u, HomePlug 1.0 | Electromagnetic Emissions FCC Part 15 Class B Power and Safety Regulations UL Certified | HomePlug AV Standard, IEEE 802.3, IEEE 802.3u | UL/EN 60950, FCC Part 15, limites EN 55022 EMC | IEEE 802.3u, 802.1P, 802.1Q, FCC Part 15, EN 55022, CE Class B | CE and VDE compliant, EMC: EN55022, EN55024 |
| Banda de frecuencia | 2 - 30 Mhz | Sin Datos | Sin Datos | 2 – 34 MHz | 2 – 34 MHz | Sin Datos |
| Capacidad de transferencia de datos | 200 Mbps Mbps sobre la capa física. | 200 Mbps Mbps sobre la capa física. | 200Mbps Mbps sobre la capa física | 200 Mbps sobre la capa física. | 200 Mbps | 200 Mbps Mbps sobre la capa física. |
| Modulación | OFDM | OFDM symbol modulation | OFDM | OFDM | OFDM | OFDM |
| Costo aproximado en Pesos | \$1,737.96 +IVA | \$1,967.29 +IVA | \$2,574 +IVA | \$1,420.90 +IVA | Sin Datos | Sin Datos |
| País de venta | España | EU | México | EU y Canada | España, EU | Israel, EU |

TABLA 4.1 COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES ADAPTADORES PLC Y SUS PRECIOS EN EL MERCADO.



En la tabla 4.2 con las principales características adaptador AV200 Corinex y es preciso mencionar lo siguiente:

El diseño AV200 Powerline se adapta al estándar IEEE 802.3u propuesto por Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, este estándar define el método de acceso al medio utilizando CSMA/CD (Ver Glosario) y las especificaciones de la capa física, también define la tecnología para redes de 100Mbps [15].

La especificación de la velocidad de transmisión, según el fabricante de los equipos Corinex, es de 200Mbps en nivel físico, el nivel más bajo del Modelo OSI (Open Systems Interconnect). (Ver Glosario). La transmisión en el nivel físico es por medio de señales eléctricas (bits) y no se realiza ningún proceso de conversión de datos, ni de detección y corrección de errores.

En el laboratorio se realizaron pruebas de transmisión de datos a los equipos PLC y los resultados se presentan en la siguiente sección.

| | |
|--|--|
| Estándar | IEEE 802.3u |
| Velocidad | 200 Mbps a nivel físico |
| Interfase | 10/100 Base T Fast Ethernet, Powerline |
| Rango de frecuencia utilizado | 2 - 34Mhz |
| Consumo de energía | 5W |
| Seguridad e Interferencia Electromagnética | UL/EN 60950, FCC Part 15, limites EN 55022 EMC |

TABLA 4.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ADAPTADOR AV200.

4.1.2 Pruebas aplicadas al adaptador AV200 utilizando kperf.

Kperf es un software libre que permite analizar la velocidad de transmisión entre dos equipos conectados en una red.

Para la prueba se utilizo un módulo de receptáculos conectados por medio de cables de 100 m de longitud con un calibre 12 AWG, los resultados obtenidos se presentan en las Figura 4.5. Kperf permite evaluar la velocidad de transmisión en Mbps. Como puede observarse en la gráfica, el mayor valor medido para esta transmisión es de 16 Mbps en el nivel más alto del modelo OSI, nivel de aplicación.

Para el caso particular de esta investigación la velocidad registrada es un valor suficiente para la aplicación que en este trabajo se propone. Por tanto, podemos considerar la tecnología PLC, y en particular el adaptador que hemos seleccionado (AV200), como suficientemente confiables y útiles para nuestros propósitos.

4.1.3 Comparación entre una red LAN con PLC y una red Wi-Fi.

Para finalizar el análisis de los adaptadores PLC se presenta una comparación entre redes LAN configuradas utilizando adaptadores PLC con otra red que utiliza tecnología Wi-Fi; en las figuras 4.6 y 4.7 se presenta el comparativo antes mencionado. Como puede



observarse la tecnología PLC permite una mejor solución para la transmisión de datos en un mismo radio de operación que algunas tecnologías inalámbricas. Esto se debe a que la red PLC utiliza el cable de cobre eléctrico para transmitir las señales mientras que la tecnología inalámbrica utiliza el espacio libre y en ocasiones la comunicación puede verse afectada, entre otras razones, por el diseño estructural de los hogares o edificios.

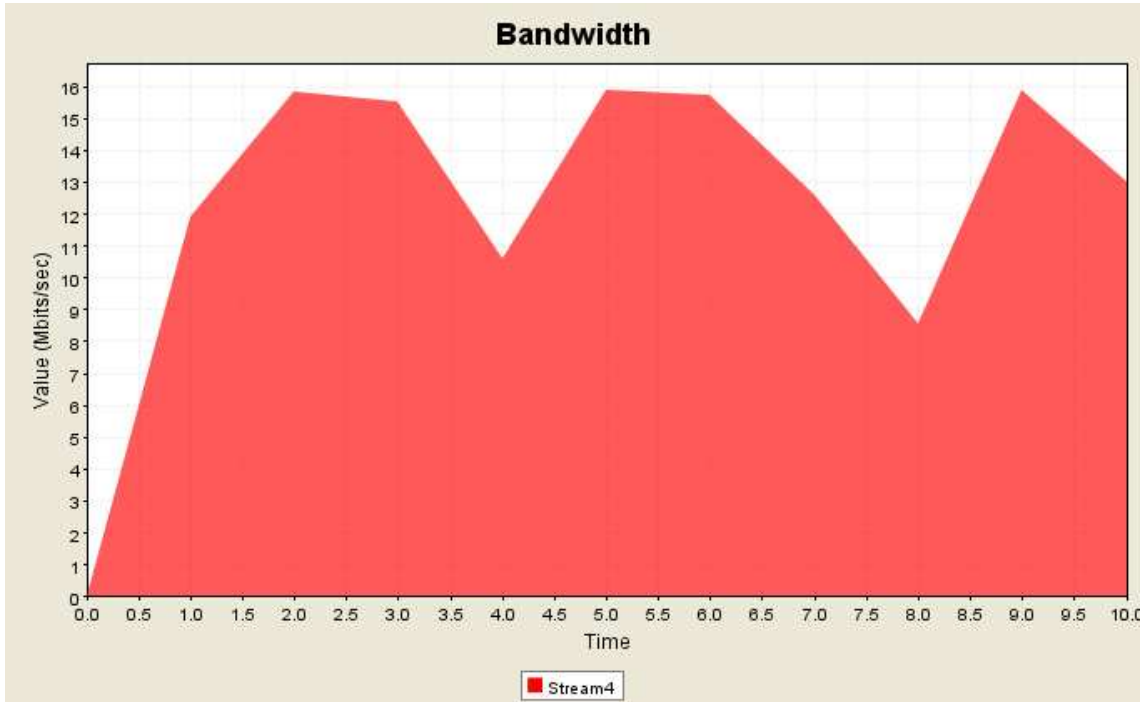


Figura 4.5 Resultados de las pruebas realizadas a los equipos AV200.

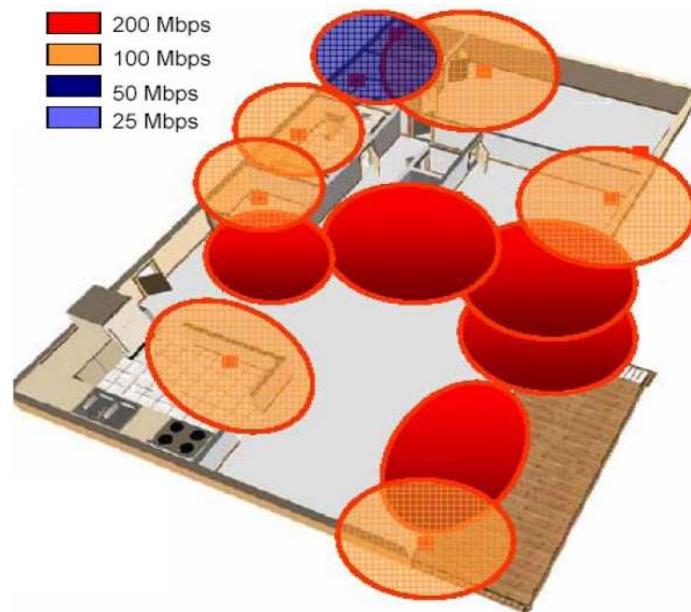


Figura 4.6 Red hogareña utilizando tecnología PLC [14]

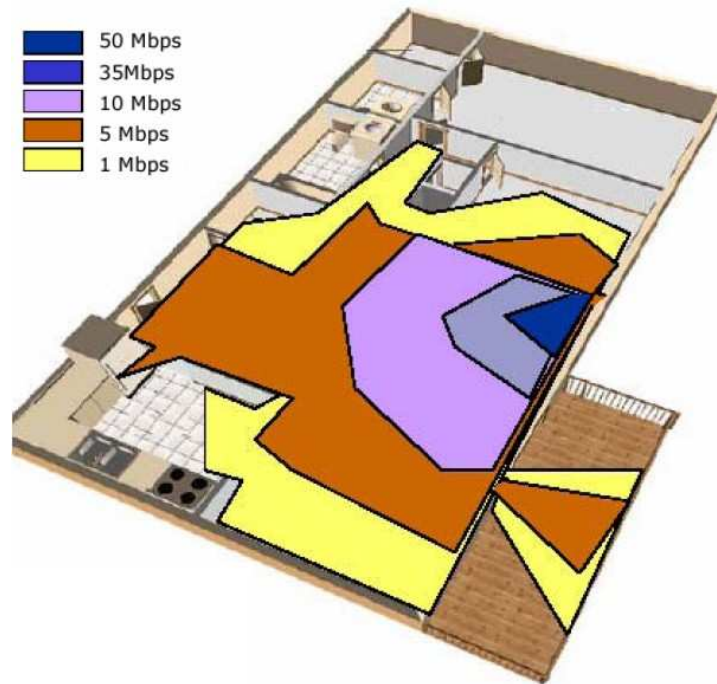


Figura 4.7 Red hogareña utilizando tecnología Wi-Fi [14]

4.2 Medidores de energía eléctrica.

La compañía suministradora de energía eléctrica utiliza medidores, también llamados “Wattorímetros”, para obtener el consumo de electricidad de cada uno de sus clientes. CFE y LyFC instalan en su mayoría medidores electromecánicos, dichas empresas facturan la cantidad de Watts (Potencia) consumida en un intervalo de tiempo dado (horas), es decir, se cobra la energía consumida en Watts-hora o kiloWatts-hora.

Por ejemplo, un wattorímetro conectado durante dos horas a un circuito que consume 500W (500 W por hora) registrará 1000 watts-hora de energía consumida.

Es preciso mencionar que además de los medidores electromecánicos existen los medidores híbridos que están conformados por una etapa mecánica y una electrónica y también los medidores que son electrónicos en su totalidad.

4.2.1 Medidor electromecánico.

Un medidor electromecánico también conocido como wattorímetro es un elemento electromecánico que es en esencia un motor de inducción eléctrico. Consta de un estator, un rotor, un “freno” magnético, un contador y un visualizador de las revoluciones del rotor. El producto entre la velocidad de rotor y el tiempo representa las revoluciones del rotor, dicho producto es proporcional a la energía consumida, es decir, una revolución del rotor representa un número fijo en watts-hora. Las revoluciones son fácilmente convertidas mediante engranes a un display que consta de cuatro carátulas que permiten una fácil lectura de los kiloWatts-hora consumidos. Este tipo de medidores son utilizados



principalmente para medir el consumo residencial debido a que son más económicos y relativamente fáciles de instalar. En la figura 4.8 se presentan los principales componentes de un medidor electromecánico.

4.2.2 Medidores electrónicos.

Los medidores electrónicos no contienen partes móviles - rotores, engranes, ejes, etc. Son construidos a base de circuitos integrados, componentes semiconductores y lógica digital. Este tipo de medidores son más cercanos a las computadoras que los medidores electromecánicos, proveen un display digital y eliminan la complejidad mecánica inherente en los registradores de engranes mecánicos.

El medidor electrónico funciona de manera diferente a como lo hace un medidor electromecánico. El medidor electrónico utiliza un convertidor A/D para muestrear las formas de onda de voltaje y corriente durante cada ciclo eléctrico y convierte estas muestras en cantidades digitales. Los medidores electrónicos además de obtener los kilowatts-hora consumidos por el cliente también permiten medir potencia reactiva (en VAR's), factor de potencia, potencia aparente (en VA), Voltajes rms y corriente rms.

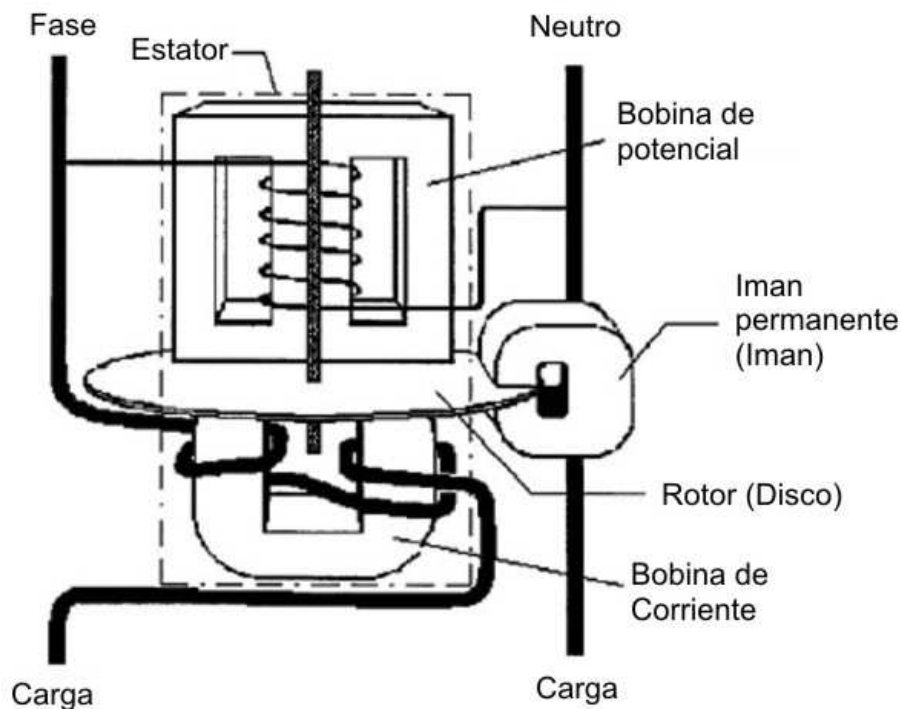


Figura 4.8 Componentes principales de un medidor electromecánico.

A continuación se presentan algunas características de los medidores electrónicos más avanzados que se encuentran actualmente en el mercado, cabe mencionar que cada una de estas características incrementa el costo final de los medidores.

Bi-direccional: Mide la energía entregada y recibida del cliente. Esta característica se usa cuando el cliente tiene la capacidad de generar electricidad y realimentar el sistema de la compañía suministradora (Co-generación).



Almacenamiento de datos: Permite grabar los registros durante un intervalo de tiempo que puede ser incluso de varios meses, dependiendo de la capacidad de la memoria.

Diagnostico: El medidor puede verificar las propiedades de voltaje, corriente y ángulo fasorial, factor de potencia, etc.

Calidad de la energía: El medidor puede medir y reportar un voltaje momentáneo y variaciones de corriente y condiciones de armónicas.

Comunicación remota: Esta característica le da el nombre a los medidores de AMR (Automatic Meter Reading). Le permite al dispositivo almacenar y enviar los registros a una base de datos de la compañía suministradora para su facturación o análisis. La tecnología AMR utiliza para la transmisión de datos redes de tecnología móvil basada en plataformas telefónicas, radio frecuencia o la más reciente de la que ya se ha mencionado de manera suficiente en este documento, PowerLines Communications [16].

Los dispositivos AMR, entre otros beneficios, permiten identificar y corregir de manera más precisa y rápida los problemas existentes en la red eléctrica.

4.2.3 Registrador de calidad de potencia

Para la realización de este proyecto fue necesario utilizar un dispositivo que nos permitiera obtener y almacenar los parámetros eléctricos de la línea monofásica, es decir, un equipo que facilitara el registro de los parámetros eléctricos para el análisis de las posibles pérdidas eléctricas no técnicas que pudiesen presentarse en el módulo de pruebas utilizado.

La empresa Fonkel facilitó al Instituto de Ingeniería de la UNAM el equipo *Power Quality Logger* modelo 120 (PQL120), ver figura 4.9, del cual se comenta a continuación.

El PQL120 es un dispositivo diseñado por AEMC[®] Instruments para aplicaciones comerciales, industriales y residenciales. El PQL120 se enchufa a un receptáculo estándar de CA y es capaz de llevar a cabo varias tareas de medición, grabación y almacenamiento de parámetros previamente seleccionados por el usuario en su memoria de 1Mb. Este dispositivo nos permite registrar parámetros eléctricos tales como Tensión RMS[V], Corriente RMS[A], Frecuencia[Hz], Potencia Real[W], Potencia Aparente[VA], Potencia Reactiva[VAR], Factor de Potencia, Porcentaje de armónicos[%], entre otros.

La configuración del PQL120 se realiza por medio del software DataView, provisto por AEMC[®] Instruments, el cual cuenta con una interfaz amigable y sencilla para el usuario. DataView permite visualizar los registros almacenados por medio de gráficos, guardarlos en una Base de Datos e incluso procesarlo para ser enviados hacia un archivo con extensión .CSV. Los archivos CSV (Comma Separated Value), son aquellos cuyos valores son separados por el carácter coma (,) y son ampliamente utilizados para el control de datos. Adelante en este documento se comentará del procesamiento que se llevó a cabo en los archivos CSV para el desarrollo del proyecto.



Figura 4.9 Power Quality Logger modelo 120

Algunas de las especificaciones del PQL120 se presentan en la tabla 4.3

| Especificaciones Modelo PQL120 | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Tensión | |
| Escala | 0 a 140V |
| Resolución | 0.1V |
| Corriente | |
| Escala | 0 a 15A (70A pico máx.) |
| Resolución | 0.01 |
| Frecuencia | |
| Escala | 45 a 65 Hz |
| Resolución | 0.01 Hz |



| | |
|-----------------------------|---|
| Armónicos | |
| Escala | Hasta la armónica No. 50 para Voltaje y Corriente |
| Resolución | 0.1 V y 0.1 A |
| Potencia W/VA/VAR | |
| Escala | 0 a 2100 W ó VA ó VAR |
| Resolución | 0.1W, 0.1 VA, 0.1 VAR |
| Factor de Potencia | |
| Resolución | 0.01 |
| Registro | |
| Velocidad de almacenamiento | 125 ms a 7 días |
| Memoria Total | 1 MB |

TABLA 4.3 CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO PQL 120

4.2.4 Tarifas eléctricas.

Las tarifas eléctricas son disposiciones específicas que contienen las cuotas y condiciones que rigen los suministros de energía eléctrica. Las tarifas eléctricas cumplen con tres funciones principales la primera de ellas es la financiera, pretende generar recursos para solventar costos totales y ampliaciones futuras en pro del servicio eléctrico, la segunda es la económica, promueve una eficiencia económica y la tercera es la productiva – social que crea subsidios para usuarios de menores recursos y/o sectores productivos [17].

Actualmente en México existen 36 tarifas eléctricas y se clasifican de la siguiente manera:

- Domesticas (8)
- Servicio Público (3)
- Riego Agrícola (4)
- Servicios Generales (21)

En el apéndice C se muestra una tabla con las diferentes tarifas aplicables en México actualmente.

Como ya se ha mencionado previamente, en México existen dos compañías suministradoras de energía eléctrica, Luz y Fuerza del Centro y CFE, la primera es la encargada de la facturación en el DF, zona Metropolitana y algunos otros municipios del centro del país. Para las consideraciones de este proyecto se tomará la Tarifa 1A debido a las condiciones geográficas y ambientales en las que se llevaron a cabo las pruebas. Es importante mencionar que los resultados a reportarse en el capítulo 4 serán para la simulación de una acometida monofásica residencial de 127 V a 60 Hz, pero esta característica no es limitante para los alcances finales del proyecto.



4.3 Software desarrollado para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas.

El carácter de este documento además de ser informativo, pretende demostrar la funcionalidad del objetivo principal, la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas de energía eléctrica. Para lograr este objetivo fue necesario el desarrollo de una pieza de software que nos permitió realizar las pruebas de una manera confiable y segura. Esta pieza de software representa uno de los productos más importantes de esta tesis, y por tanto a continuación se explican los aspectos más relevantes del mismo.

El software fue programado en JAVA un lenguaje de Programación Orientado a Objetos que permite, entre otras cosas, crear interfaces de usuario y aplicaciones WEB [19]. La ventaja de JAVA sobre otros lenguajes de programación radica en que es altamente portable, es decir, su funcionamiento es independiente de la plataforma (Sistema operativo) en el que se utilice. JAVA, por sus características, permite interactuar con Hardware (PC's, dispositivos móviles, dispositivos de control, etc.) de manera sencilla y eficiente, por estas razones se eligió JAVA para la realización de este proyecto. Para el desarrollo se utilizó el IDE (IntegratedDevelopment Environment) Netbeans en su versión 5.5.1

4.3.1 Comunicación cliente-servidor utilizando sockets.

La primer etapa del software fue el desarrollo de la comunicación entre PC's, esto se logró utilizando lo que en java y algunos otros lenguajes se conoce como: Sockets. Un Socket es una conexión full-duplex, es decir, tanto el receptor como el transmisor pueden enviar y recibir datos de manera simultánea. Los sockets utilizan la arquitectura Cliente-Servidor que permite a los hosts conectarse a una maquina remota, enviar y recibir datos, abrir y cerrar conexiones. En el caso del servidor permite aceptar conexiones de una o varias maquinas remotas utilizando un puerto previamente definido, mantenerse a la espera de datos, además de realizar también las funciones del cliente [20].

El proceso realizado para la comunicación entre sockets se explica a continuación, el socket servidor abre la comunicación por medio de un puerto en la computadora principal y se mantendrá a la espera de las conexiones de los clientes.

Por su parte los clientes se configuran de tal manera que envíen peticiones de conexión al servidor, una vez que esta ha sido aceptada se puede iniciar la comunicación y el envío de los archivos. En SC-1 y SC-2 se muestran fragmentos de código para la configuración del servidor y el cliente respectivamente.

```
import java.net.*;
import java.io.*;

...
try{
    ServerSocket socketServidor = new ServerSocket(8000);
    /*Se crea un Socket Servidor especificando en puerto 8000 a utilizar para la
    comunicación con los clientes.*/

    if (socketServidor != null) {
        System.out.println("Servidor: ServerSocket creado correctamente");
    }
}
```



```

}catch (IOException e)
{
    System.out.println(e);
    /* Si no pudo crearse el ServerSocket se genera una excepción(error en
    tiempo de ejecución). Este puede ocurrir principalmente por que el puerto se
    encuentre ocupado por otro ServerSocket o no se cuente con el privilegio
    necesario para abrir una conexión */
}
}
...
while (true){
    try
    {
        Socket s = socketServidor.accept();
        /* Se crea un socket que se encargue de mantener la comunicación con
        el cliente*/
        System.out.println("Conexion aceptada de: "+s.getInetAddress());

        ... //Una vez que la conexión ha sido aceptada se inicia la transmisión-
        recepción de datos.

        s.close(); // Se cierra la conexión del socket

    }
    catch(IOException ioe)
    {
        System.out.println("Error: "+ioe);
    }
}
}

```

SC-1. Código fuente utilizado para la creación de un Socket Servidor e iniciar la conexión con los clientes.

El servidor permitirá la conexión de n-número de clientes conectados a la red eléctrica. En el capítulo 5 se comentará más acerca de la arquitectura Cliente-Servidor y se explicará su utilización en el proyecto.

Cada adaptador AV200 se configura con una IP predeterminada para poder ser identificado y hacer distinción entre el servidor y los clientes.

Una vez que los clientes conocen la IP del servidor se puede iniciar la comunicación utilizando la red PLC configurada para enviar los datos a través de la misma.

4.3.2 Procesamiento de los datos.

La segunda etapa del software se enfocó en el procesamiento y almacenamiento de datos. Como ya se ha hecho mención anteriormente, el dispositivo PQL120 genera archivos tipo CSV que contiene los parámetros eléctricos almacenados en el dispositivo. Para la manipulación de este tipo de archivos fue necesaria la utilización del API "CSV para JAVA" que permite leer y escribir archivos CSV [21]. Esta herramienta manipula los archivos CSV y los guarda en arreglos que pueden procesarse fácilmente. Ver código fuente SC-3.



```
import java.net.*;
import java.io.*;

...

Socket cliente = new Socket("10.10.1.1", 8000);
/* Se crea una petición de conexión al servidor cuya IP es 10.10.1.1 por medio del puerto 8000, si es aceptada la conexión se inicia la transmisión-recepción de datos del cliente al servidor y viceversa*/

...
cliente.close(); /* Se cierra la conexión del cliente*/
```

SC-2. Código fuente utilizado para la creación de un Socket Cliente e iniciar el envío de los datos.

```
import com.csvreader.*;

...

CsvReader reader = new CsvReader(carpetaOrigen+"\\"+nombreArchivo.csv);
/* Inicia la lectura de un archivo CSV ubicado en una carpeta definida*/

reader.get("Nombre de la columna");
/*Obtiene el valor actual del dato de la columna referenciada*/
```

SC-3. Fragmento del código fuente utilizado para la manipulación de los archivos CSV

4.3.3 Almacenamiento de datos.

Una vez que se ha conseguido obtener los datos de los archivos CSV es necesario guardarlos en un DB (base de datos), para ello es necesario previamente crear un diagrama que permita definir la estructura de la base de datos a utilizar, a este diagrama se le denomina DER (Diagrama entidad-relación). En la figura 4.10 se presenta el DER que modela la base de datos.

Diagrama Entidad Relación para el sistema PLC.

Para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas fue necesario el diseño de una base de datos que nos permitiera obtener los datos de los usuarios conectados a las fases del transformador. A continuación se explicará brevemente cada una de las entidades y su función en el proyecto.

Data_concentrator: Esta entidad representa a un concentrador de datos PLC que se encontrará conectado a cada transformador de distribución. Cada concentrador deberá



ser identificable por medio de un nombre y un id (identificador único) en este caso se trata de la IP del servidor (concentrador).

Phases: Como su nombre lo indica esta entidad identifica a las fases del transformador y estarán asociadas a un único concentrador de datos.

La entidad Phases se encuentra relacionada con la Clients y con Data como se muestra en la figura 4.10.

Data: En esta entidad se almacenan los datos de los parámetros eléctricos enviados por los clientes vía red PLC y también se guardan los datos del concentrador para posteriormente ser manipulados.

Los datos almacenados pertenecen a una sola de las fases del transformador.

Para fines de posteriores investigaciones se decidió almacenar más parámetros eléctricos que los necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Client: Esta entidad permite mantener un control de los clientes conectados a cada una de las fases con el fin de poder relacionar sus medidores PLC e identificar el consumo de cada uno de ellos.

Devices: Por último cada uno de los clientes cuenta con un único medidor PLC que es identificado por una IP del cliente (IP_meter), con el cual se puede identificar el consumo de cada cliente en la tabla de los datos.

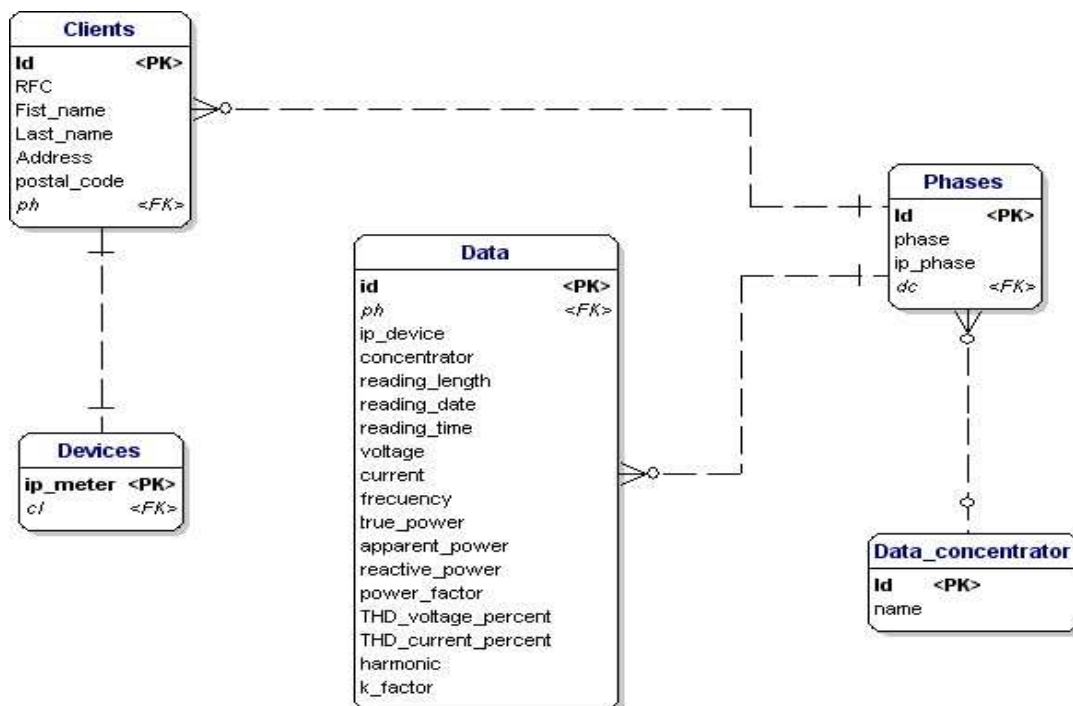


Figura 4.10 Diagrama entidad relación.



Es importante mencionar que las IP's asignadas a los medidores clientes conectados a un mismo transformador no pueden repetirse tampoco puede ser la misma IP asignada al concentrador de datos.

Base de datos Postgresql

Una vez diseñado el DER la siguiente etapa consiste en administrar el servidor de bases de datos para lo cual se requirió instalar y utilizar el sistema Postgresql en su versión 8.2. Postgresql es un sistema de base de datos relacional orientado a objetos. Es un software libre que permite generar, administrar y manipular una DB [22].

Java cuenta con una librería que permite conectarse a la base de datos Postgresql y con ayuda del lenguaje SQL (Lenguaje de consulta estructurado) permite manipular los datos, es decir, insertar, seleccionar, actualizar, borrar, etc. en la DB. En SC-4 se presenta un fragmento del código utilizado para lograr la conexión a la base de datos.

4.3.4 Interfaz gráfica de usuario (GUI).

En esta última etapa se condensan y presentan los resultados finales de la investigación y el desarrollo, para lograr este objetivo se creó una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés). Una GUI es una herramienta que permite a los usuarios interactuar con el sistema de una manera amigable y sencilla. El desarrollo de esta herramienta se realizó con Swing de JAVA el cual se define como un grupo de componentes gráficos que permiten controlar la apariencia y el comportamiento de una aplicación [23].

La figura 4.11 presenta la interfaz de usuario para el concentrador de datos y en la figura 4.12 se presenta la interfaz que utilizan los clientes para enviar los datos al concentrador.

En el capítulo cuatro se comentarán y explicarán las diferentes ventanas que contiene la GUI del concentrador de datos.

```
import java.sql.*;
import java.sql.DriverManager;
import java.sql.Connection;
import java.sql.SQLException;

...
try {
    Class.forName("org.postgresql.Driver");
    /*Clase que utiliza JAVA para poder conectarse a la DB postgresql*/
}
...
try {
    c =
DriverManager.getConnection("jdbc:postgresql://10.10.1.1:5432/PLC","unam",
"unam");
/*Realiza la conexión a la base de datos "PLC" ubicada en el Host cuya IP es
10.10.1.1, puerto de servicio 5432, con el nombre de usuario y contraseña
"unam"*/
} catch (SQLException se) {
    System.out.println("No es posible conectarse a la Base de Datos");
    System.exit(1);
}
...

```




```

try {
    s = c.createStatement(); /*Se crea una declaración para poder enviar los
    queries a la base de datos */
}
...
try {
    rs = s.executeQuery("Select name from data_concentrator where id='1'");
    /*Se realizar una búsqueda a la base de datos utilizando SQL y se guardan
    los resultados en el objeto ResultSet*/
}
...
try {
    while (rs.next()) {
        String nameConcentrator= rs.getString(1);
        /*Se obtienen los datos correctamente y se guardan en una variable tipo
        cadena */
    }
}
...

```

SC-4. Fragmento del código fuente para la conexión a la base de datos PLC en Postgresql y petición de datos utilizando SQL.

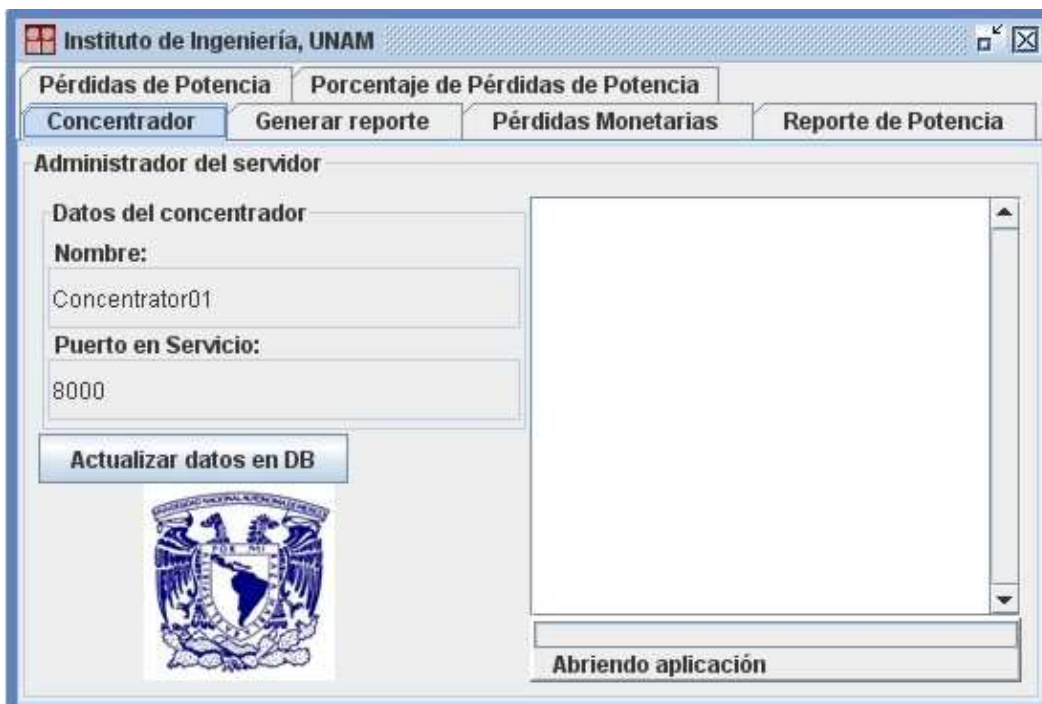


Figura 4.11. Interfaz del software para administrar el concentrador de datos y recibir los datos de los clientes por medio de PLC.

The screenshot shows a software window titled "Instituto de Ingeniería, UNAM". The main heading is "Medidor del cliente residencial". It contains several input fields: "IP Fase" with the value "10.10.1.1", "IP Medidor" with "10.10.1.2", and "Puerto en servicio" with "8000". There is an empty field for "Archivo a enviar". At the bottom, there is a status bar that says "Abriendo aplicación" and the logo of the Instituto de Ingeniería UNAM.

Figura 4.12. Interfaz del software para administrar el envío de datos de los clientes al servidor vía PLC



Capítulo 5

Validación del sistema de supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas.

5.1 PLC en una red eléctrica de baja tensión.

En el capítulo anterior se comentó acerca de los equipos a utilizarse para el desarrollo del proyecto y también se hizo mención del software desarrollado. En el presente capítulo se explicará el experimento realizado y se reportarán los resultados obtenidos.

El objetivo de este trabajo de investigación es la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas. Se pretende que este documento sea un precedente para la realización de aplicaciones utilizando la tecnología PLC, las cuales permitirán a las compañías suministradoras de electricidad tener un mayor control de sus parámetros eléctricos y tener la posibilidad, entre muchas otras, de detectar y contabilizar la cantidad de energía que se pierde debido a las conexiones ilegales, lo que produce costosas pérdidas económicas.

Para cumplir con el objetivo antes mencionado fue necesario simular una red PLC utilizando una red eléctrica monofásica para cargas residenciales de baja tensión. (127 V~ a 60Hz.)

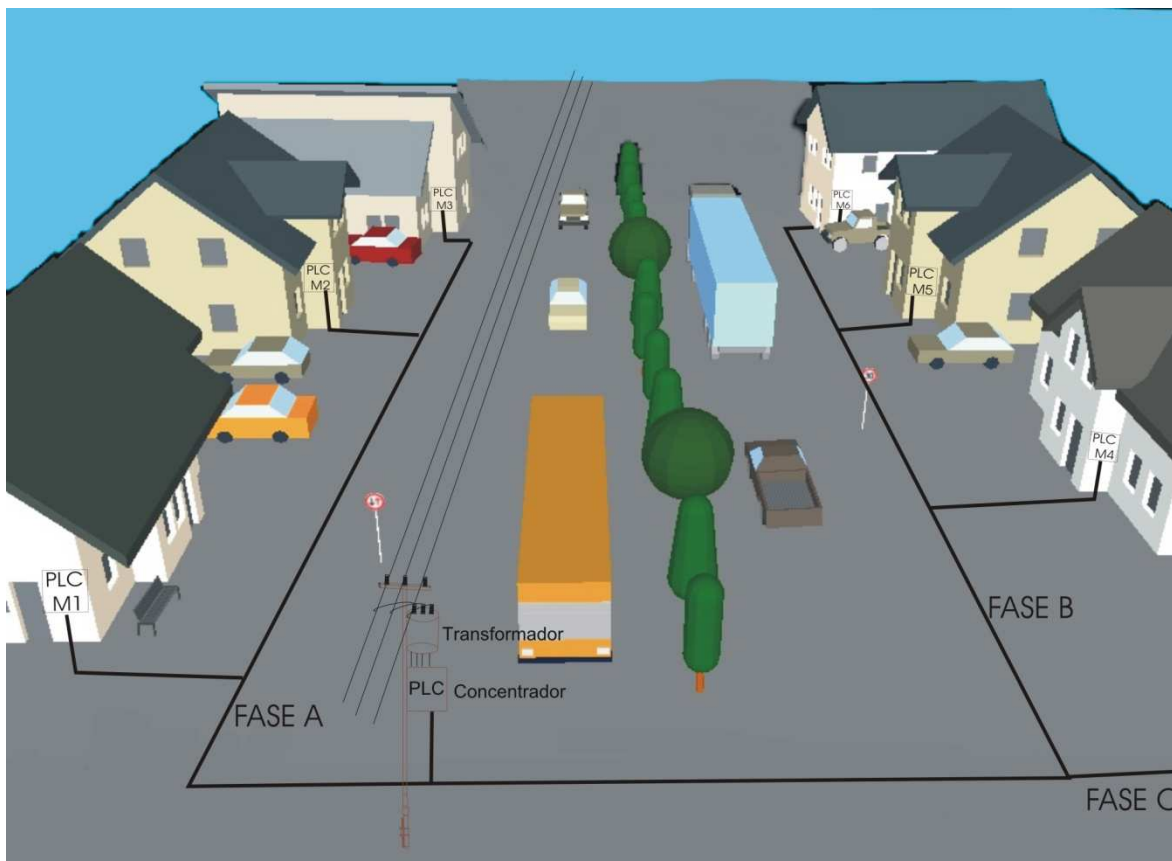


Figura 5.1. Red PLC sobre una red eléctrica residencial de baja tensión.



En la figura 5.1 se observa una red eléctrica que parte desde un transformador de distribución con configuración Δ - Y. El primario del transformador se encuentra conectado a una línea trifásica de baja tensión a 480V y a la salida del secundario del transformador se encuentran tres sistemas monofásicos (3F, 4H a 127V) constituidos por tres conductores de fase y un conductor puesto a tierra (neutro) [1].

Los tres sistemas monofásicos se conectan a un concentrador PLC y es a partir de este momento en donde inicia la red de *Power Line Communications*.

En la figura 5.1 se observa que cada sistema monofásico (A, B o C) se conecta por medio de una acometida subterránea [1] hacia un equipo de medición (M1, M2, M3, etc.) conectado a cada cliente residencial y que se encuentra habilitado para trabajar con tecnología PLC.

A continuación se explica el funcionamiento de los equipos PLC conectados a la red eléctrica.

5.1.1 Concentrador PLC

También llamado servidor PLC, para fines de este proyecto y a partir de este momento se utilizarán ambos nombres indistintamente. Es el encargado de iniciar la transmisión vía PLC y recibe la información que envían los equipos de medición de los clientes residenciales. Registra los parámetros eléctricos para cada una de las fases conectadas al transformador.

Tiene la importante tarea de identificar posibles pérdidas eléctricas no técnicas. El concentrador será identificado por una dirección única utilizando el protocolo de Internet (IP). En caso de existir pérdidas eléctricas no técnicas, el concentrador PLC las reportará en tiempo real a la compañía suministradora, vía Radiofrecuencia o WiMAX.

5.1.2 Medidores PLC

También llamados clientes PLC, son los encargados de registrar los parámetros eléctricos de los clientes residenciales y enviar los datos hacia el concentrador PLC por medio de la acometida eléctrica.

Para la realización de las pruebas fue necesario implementar un sistema que simulara, lo más apegado a la realidad posible, las condiciones de una red PLC, para lo cual se construyó un banco experimental eléctrico conectado por medio de conductores calibre 12 AWG^{*1}.

Para emular los clientes residenciales se construyeron módulos que permitieran conectar diversas cargas eléctricas y poder verificar el comportamiento de la red PLC.

5.2 Metodología para la identificación de pérdidas eléctricas no técnicas.

Para cumplir con el objetivo que se plantea en este documento fue necesario simular una red PLC utilizando un banco experimental monofásico conectado a una red eléctrica de baja tensión. (127 V~ a 60Hz). El banco experimental representa una red eléctrica independiente que se diseñó para trabajar bajo la Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas NOM-001-SEDE-2005 (Utilización). Ver figura 5.2

1. Marca IUSA para distancias cortas (2-3 mts), marca CONDUMEX para distancia de 100mts



5.2.1 Identificación de pérdidas eléctricas no técnicas.

En la figura 5.2 se observa un diagrama del banco experimental conectado en laboratorio. Se conectan los clientes y el concentrador a la misma fase por la cual serán enviados los datos utilizando tecnología PLC. Se observa en dicha figura que el concentrador PLC registrará la potencia consumida por todos los elementos conectados a él: los clientes. Cuando el sistema trabaja en condiciones normales de operación se puede obtener un valor estimado del porcentaje de pérdidas técnicas mediante la ecuación 5.1.

$$P_t = \frac{P_{TF} - \sum_{i=1}^{i=N} P_{Ci}}{P_{TF}} \times 100 \quad \text{Eq. 5.1}$$

P_{TF} = Potencia total registrada de la fase evaluada
 N = Número de clientes conectados a la fase evaluada
 P_{Ci} = Potencia total registrada por el medidor cliente
 P_t = Porcentaje de pérdidas técnicas.

Como se mencionó en el primer capítulo el porcentaje de las pérdidas técnicas en condiciones ideales **no debe superar el 6%** con respecto al consumo total de potencia. Para la ecuación 5.1, si el valor de P_t supera el 6% puede deducirse que existen pérdidas no técnicas. Para el banco experimental mostrado en la figura 5.2 significa que se conectó una carga ilegal en alguno de los receptáculos, ya sea entre el concentrador y los medidores clientes o entre dos medidores clientes. El concentrador evalúa la cantidad de pérdidas técnicas y no técnicas -en caso de que existan- y emite un reporte gráfico y cuantitativo.

5.2.2 Elementos del concentrador PLC.

El **concentrador PLC** esta conformado por tres elementos que a continuación se enlistan.

- **PQL-CONCENTRADOR:** Este elemento es el encargado de registrar y guardar los parámetros eléctricos en el concentrador para su posterior análisis, debe conectarse directamente a la fase que se desee medir.
- **GUI-SERVIDOR:** Es una pieza de software que se encuentra instalada en el servidor. Se encarga de recibir, procesar, analizar, almacenar en BD y evaluar los datos provenientes del PQL-Concentrador y de los medidores clientes.
- También tiene la tarea de reportar las pérdidas eléctricas no técnicas en la fase evaluada.
- **PLC-SERVIDOR:** Se encarga de la comunicación con los medidores PLC clientes, se le asigna una dirección IP única para ser identificado en la red PLC y poder ser diferenciado de otros equipos PLC.

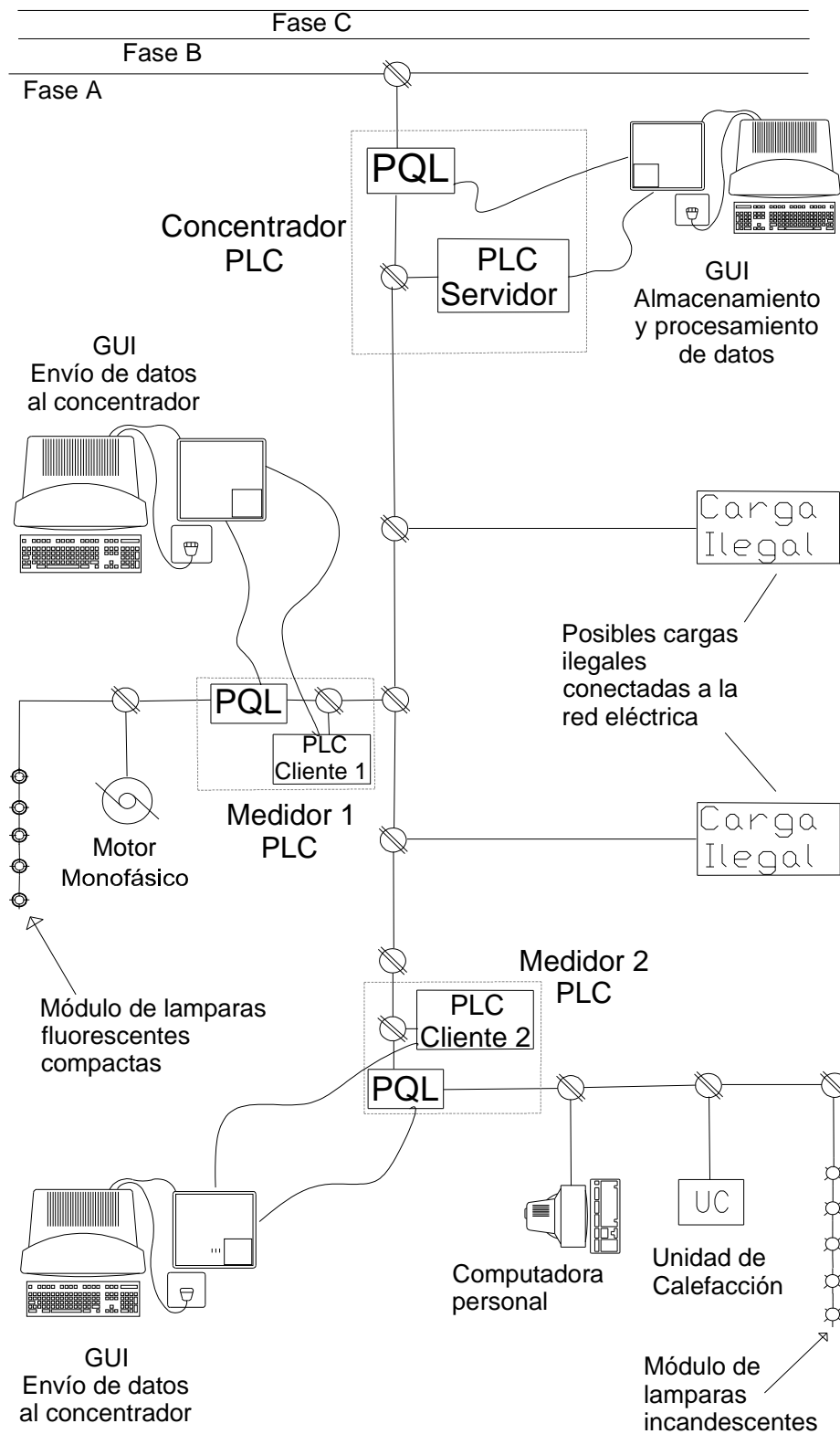


Figura 5.2. Simulación en laboratorio para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas utilizando tecnología PLC.



5.2.3 Elementos del medidor PLC.

El concentrador PLC tiene la función de habilitar los puertos de comunicación y permanecer a la espera de las conexiones de los clientes. En el concentrador se encuentra instalado el manejador de bases de datos y también se dan de alta nuevos clientes que ingresen a la red PLC. La figura 5.3 muestra los módulos conectados en laboratorio para la realización de las pruebas y que corresponden a los esquematizados en la figura 5.2.

Los **medidores PLC** también se conforman por tres elementos fundamentales.

- **PLC-CLIENTE:** Funciona como transmisor en la red PLC, se encarga de la comunicación con el PLC-Servidor y permite la transferencia de datos por medio del cable eléctrico. También cuenta con una IP que lo identifica dentro de la red PLC.
- **GUI-CLIENTE:** Es una pieza de software instalada en los clientes y se encarga de iniciar la conexión con el servidor. Envía los archivos que contienen los parámetros eléctricos del cliente hacia el concentrador para que sean procesados y almacenados en la BD.
- **PQL-CLIENTE:** Se encarga de registrar los parámetros eléctricos del cliente para su posterior envío y procesamiento.

5.3 Descripción del software utilizado para la supervisión de pérdidas eléctricas no técnicas.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior para generar el reporte de resultados fue necesario desarrollar un software que permitiera manipular los datos almacenados y comparar el consumo registrado por el concentrador y los medidores. Esto con el fin de identificar posibles pérdidas no técnicas. El software del concentrador es el más importante en el desarrollo de este proyecto ya que en él se realiza la mayoría de los procesos para obtener los reportes de pérdidas eléctricas no técnicas. Algunos de los elementos más importantes del software desarrollado se describen en la siguiente sección.

5.3.1 Software utilizado por el concentrador PLC

Concentrador

En la figura Fig. 5.4 se muestra la pantalla en la cual se presentan los datos del concentrador, también proporciona información acerca de los archivos enviados por los clientes residenciales y de las conexiones realizadas por los medidores PLC.

Tal y como se muestra la Fig. 5.4, en la parte izquierda de esta pantalla aparece el nombre que identifica al concentrador y el puerto en el cual mantiene el servicio para la conexión de los Clientes PLC. Se encuentra también un botón para actualizar los datos en la BD, es decir, realiza el proceso de manipulación de archivos CSV e inserta los datos obtenidos a la base de datos. Este proceso se explicó detalladamente en el capítulo anterior.

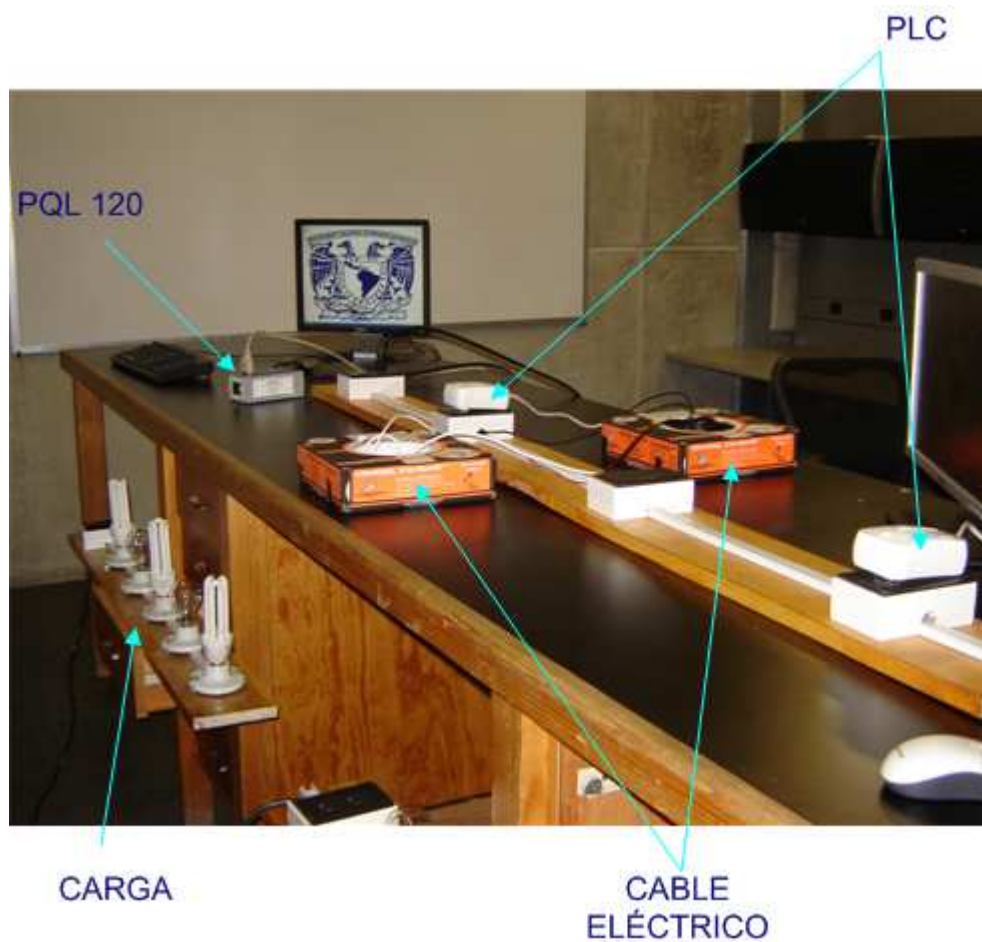


Figura 5.3. Desarrollo de la red PLC en laboratorio

Parámetros necesarios para la generación del reporte

Esta pantalla (ver figura 5.5) nos permite generar el reporte de las pérdidas eléctricas registradas durante el intervalo de tiempo que haya sido definido por el operador. De contar con registros anteriores, el sistema tendría la capacidad de obtener resultados con 20 años de antigüedad. Esta pantalla contiene los campos que deben ser llenados para la generación del reporte de pérdidas eléctricas. Del lado izquierdo de la pantalla se muestran dos campos de fecha en donde debe ser introducido el intervalo de tiempo (días, meses o años) del reporte que se desee generar. También debe elegirse la fase (A, B o C) que será evaluada. El reporte generado se obtendrá con base a la fase en la que los clientes se encuentren conectados. Una vez que han sido seleccionados los parámetros para la generación del reporte estos se envían para ser procesados. En el lado derecho de la pantalla se encuentra un resumen con los parámetros enviados para la generación del reporte.

Del lado derecho de la pantalla existe un cuadro de texto en donde se muestra el status de las conexiones realizadas, y el nombre y la fecha en que los archivos han sido recibidos. Cuenta con una barra de estado que se activa durante el tiempo en que el concentrador está recibiendo los datos.



Figura 5.4 Pantalla del concentrador

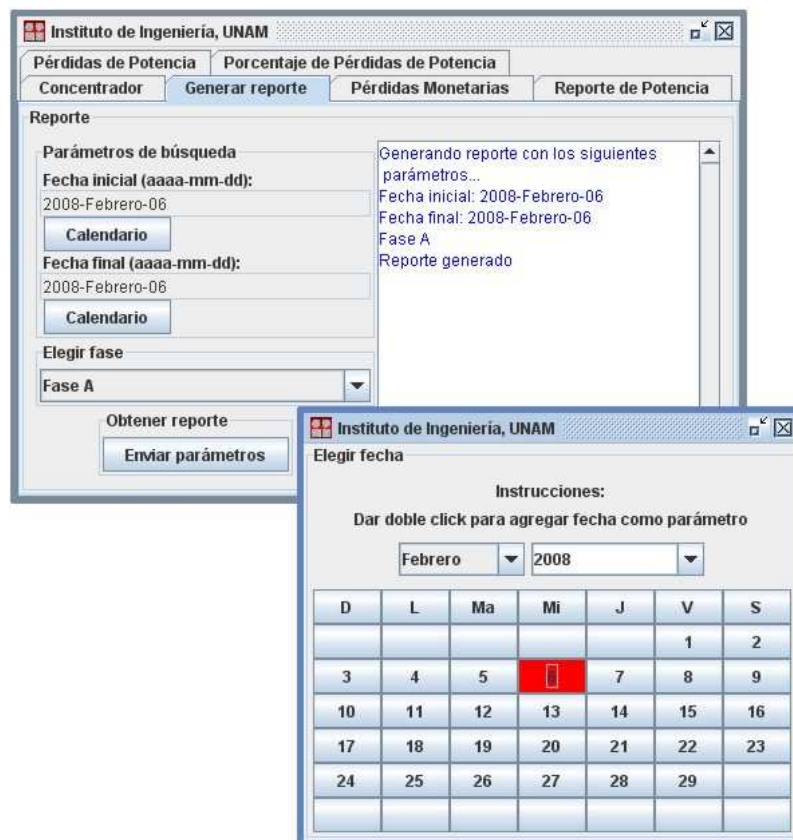


Figura 5.5 Pantalla para la generación del reporte de pérdidas eléctricas.



Pérdidas monetarias

En esta pantalla se obtiene principalmente el reporte de pérdidas económicas producidas por la conexión de cargas ilegales en el sistema eléctrico. En caso de existir diferencias mayores al 6% entre el registro del concentrador y el total de los datos obtenidos por los medidores clientes, el sistema obtendrá las pérdidas monetarias. Las pérdidas registradas se contabilizaron conforme a la Tarifa 1A (Ver Apéndice C), tarifa establecida para este proyecto. Para obtener la cantidad en pesos Mexicanos de energía perdida se utilizó la ecuación 5.2.

$$P_m = H_f \times P_p \times T_e \quad \text{Eq. 5.2}$$

P_m = Pérdidas monetarias en pesos

H_f = Horas Facturadas

P_p = Potencia promedio en kW

T_e = Tarifa eléctrica elegida, Tarifa 1A consumo básico e intermedio (hasta 150 kilowatts-hora) [18]

El reporte de las pérdidas monetarias se presenta en la figura 5.6. La información obtenida en esta figura es la siguiente:

- El número de horas facturadas con base en el intervalo elegido para el reporte.
- La cantidad de potencia consumida en kW
- El total de energía eléctrica consumida en kWh
- Y finalmente la cantidad de pérdidas monetarias en Pesos Mexicanos (\$) conforme a lo descrito en la ecuación 5.2.

Reporte de potencia.

En esta pantalla (ver figura 5.7) se presenta la gráfica de potencias consumidas por los clientes residenciales y por el concentrador. Se pretende observar y evaluar el comportamiento del sistema y su confiabilidad ante diversos eventos o pruebas a que sea sometido. Esta gráfica permite observar el momento preciso en que las cargas ilegales han sido conectadas al sistema consumiendo energía y generando pérdidas eléctricas no técnicas. Se observa el comportamiento de dos líneas. La línea que presenta valores máximos con respecto a la otra corresponde a los datos registrados por el concentrador para la fase determinada, mientras que la línea que permanece relativamente constante, pertenece a los datos registrados por los medidores clientes. En ausencia de tomas ilegales ambas gráficas deberían ser muy similares. Sin embargo al conectar las cargas ilegales la primera línea descrita muestra las pérdidas eléctricas no técnicas.

Reporte de Pérdidas de potencia.

En la figura 5.8 se observa gráficamente la cantidad de potencia que se pierde en un intervalo previamente establecido por el operador. Se presenta una gráfica con las



variaciones del consumo de potencia (en Watts) que no ha sido facturado por la compañía suministradora, es decir, el consumo por pérdidas eléctricas.

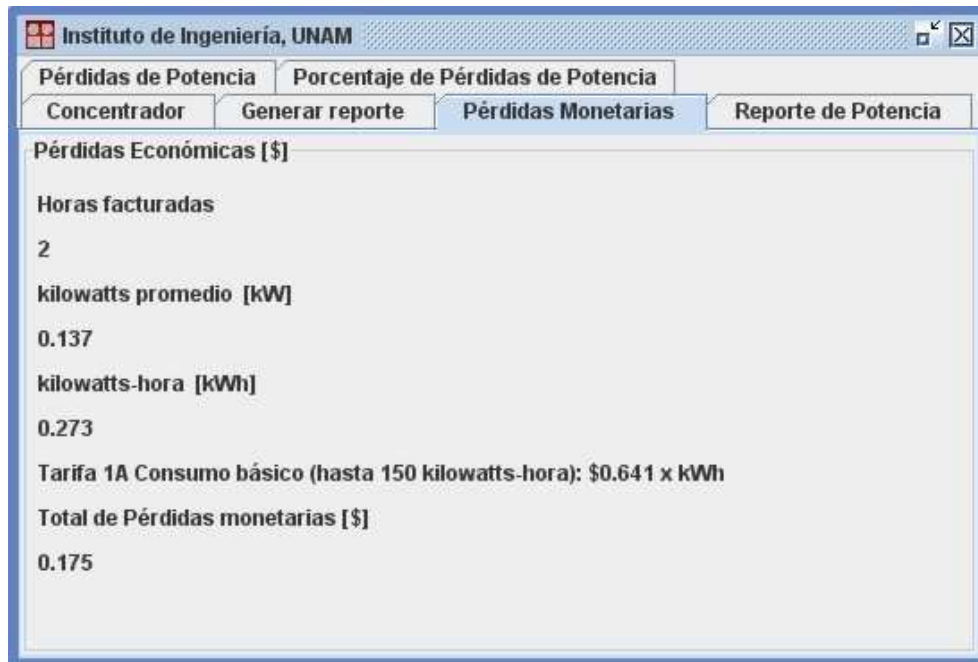


Figura 5.6 Pantalla de pérdidas monetarias

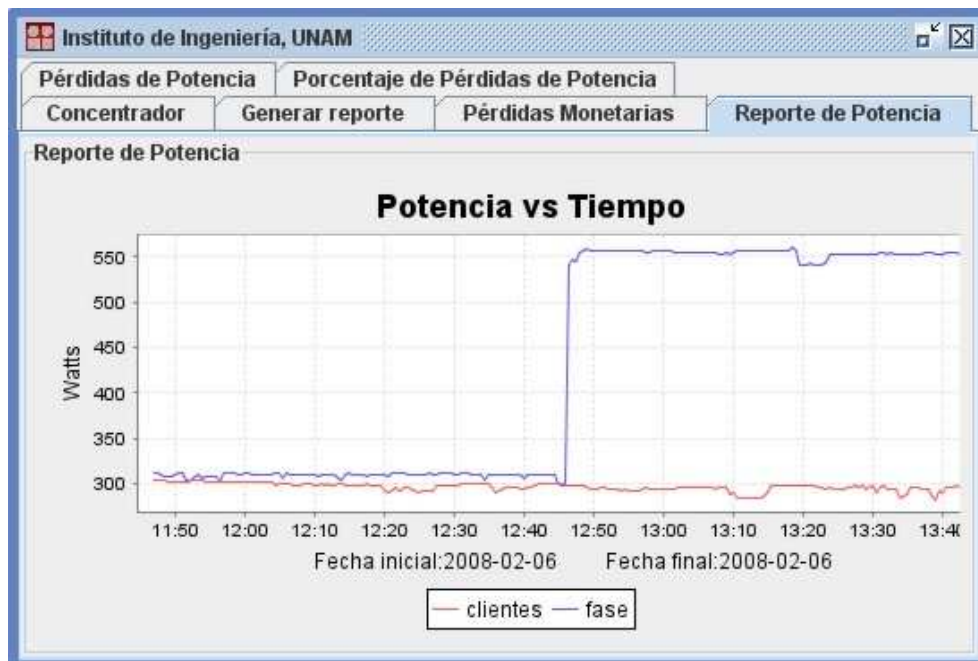


Figura 5.7 Reporte de consumo de potencia registrada en el concentrador y el consumo registrado por los medidores clientes.



Reporte de Porcentaje de Pérdidas de Potencia.

En esta pantalla se observa la cantidad de energía no facturada durante un intervalo de tiempo definido. Ver figura 5.9. El sistema evalúa los resultados obtenidos en esta gráfica. Si las pérdidas eléctricas superan el 6% el sistema enviará un aviso o alarma al operador de la compañía suministradora indicándole el momento preciso en el que se registro el primer evento de pérdidas de energía. Ver figura 5.10

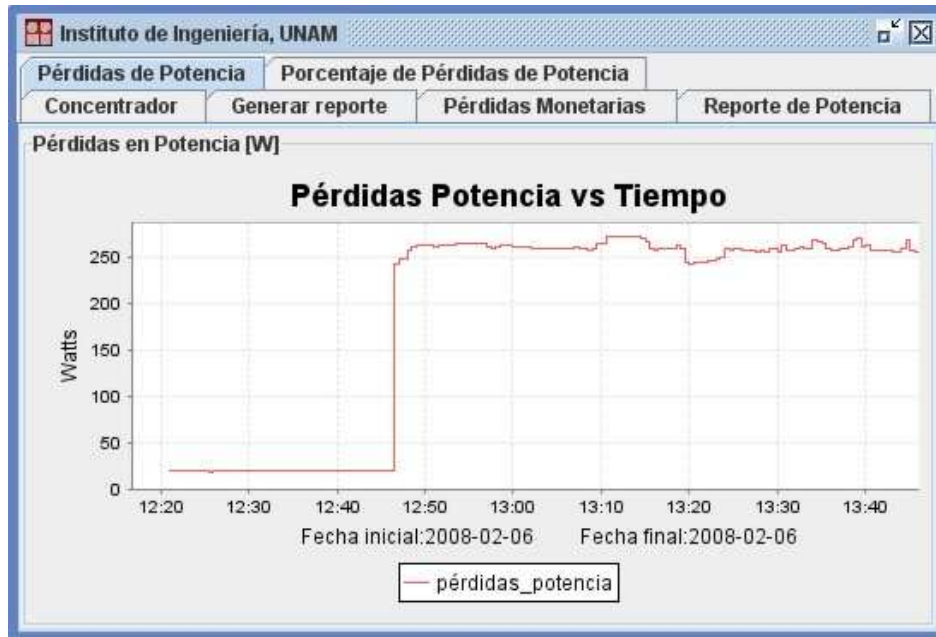


Figura 5.8 Reporte de pérdidas de consumo de energía eléctrica en Watts.

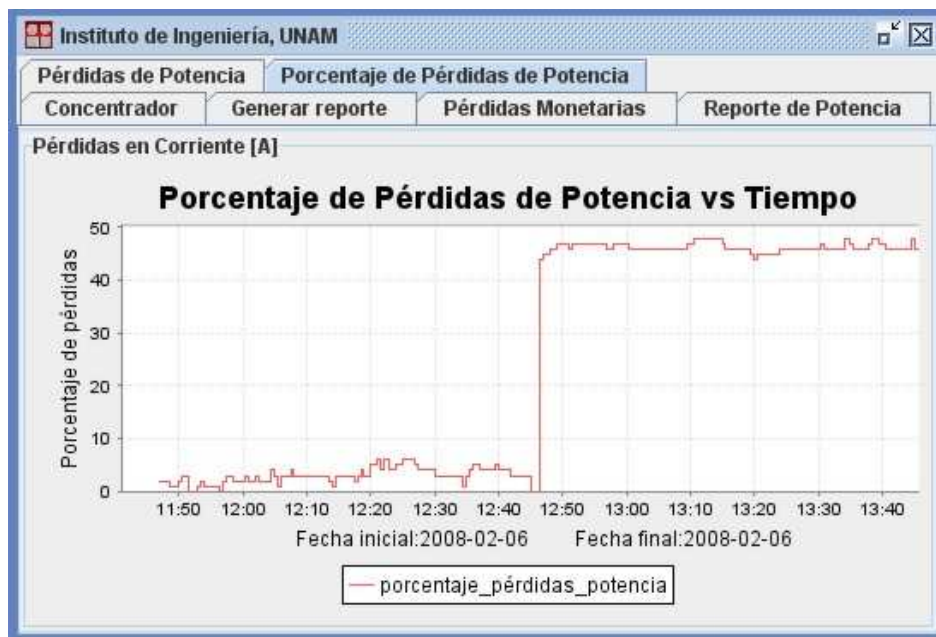


Figura 5.9 Reporte pérdidas eléctricas no técnicas en porcentaje.



Figura 5.10 Aviso que indica la fecha y hora en la que ocurrió la pérdida de energía

5.3.2 Software utilizado por los medidores PLC

Medidor Residencial

Esta pantalla, mostrada en la Figura 5.11, se activa cuando el medidor PLC cliente inicia la comunicación hacia el concentrador e inicia la transmisión de los archivos. En esta pantalla se encuentra registrada la dirección IP del concentrador al que se le enviarán los datos, la dirección IP del medidor cliente así como también el puerto en servicio del concentrador por el cual los clientes tendrán acceso para enviar los archivos. Por último un campo que identifica el nombre del archivo que está siendo enviado y una barra de estado que se activa durante el envío de los datos.

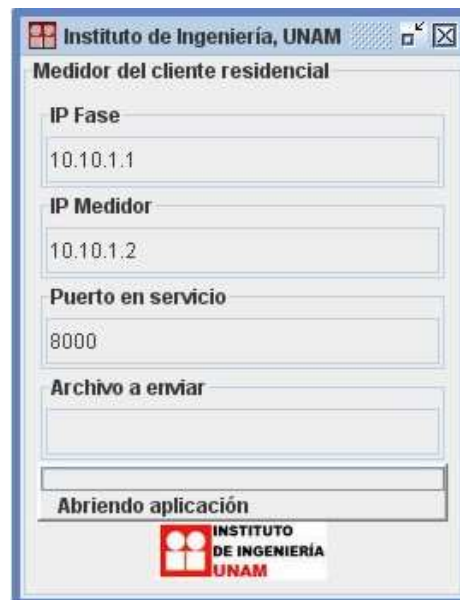


Figura 5.11 Pantalla del medidor PLC Cliente.

5.4 Pruebas realizadas en laboratorio

Para verificar el comportamiento del sistema se realizaron diversas pruebas en laboratorio en donde se conectaron, principalmente, cargas inductivas y resistivas. En la tabla 5.1 se



presentan las cargas utilizadas para las pruebas, la potencia consumida y el tipo de carga del que se trata.

Las pruebas realizadas al sistema pretenden verificar, entre otras cosas, lo siguiente:

- La correcta transmisión de los datos enviados, desde y hacia el concentrador por los medidores clientes, es decir, que no se interrumpa la comunicación por la operación de las cargas conectadas a la red PLC.
- La correcta manipulación de los archivos procesados en el concentrador.
- Verificar la confiabilidad de los datos obtenidos por el PQL comparándolos con otros dispositivos de medición, como son Voltmetros, Ampermetros, etc.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos utilizando diferentes tipos de cable y diferentes distancias de transmisión.
- Verificar que las gráficas obtenidas correspondan a los datos almacenados en la BD.

Todas las pruebas se realizaron por periodos máximos de tres horas con muestras registradas en el PQL cada 30 seg. A continuación se presentan las pruebas realizadas y sus respectivos resultados.

5.4.1 Primera prueba, cliente residencial con consumo de iluminación, carga ilegal resistiva.

En esta prueba se pretende observar el comportamiento del sistema con una carga resistiva (plancha eléctrica) conectada como carga ilegal y una carga combinada por dos lámparas incandescentes y tres lámparas fluorescentes compactas simulando consumo de iluminación residencial. La prueba se realizó durante 3 horas continuas y con

| Equipo Conectado | Tipo de carga | Potencia |
|---|------------------|--|
| Calentador Eléctrico | Carga resistiva | 1500 W |
| Módulo de 5 lámparas fluorescentes compactas. | Carga inductiva. | 3 lámparas de 22 W. 2 lámparas de 15 W. |
| Módulo de 5 lámparas incandescentes. | Carga resistiva | 75 W cada lámpara |
| Plancha eléctrica | Carga Resistiva | 1200 W |
| Monitor | Carga variable | 250 W |
| CPU | Carga variable | 500 W Aprox. |
| Taladro Eléctrico | Carga inductiva | 100 W Aprox. |
| Licuada eléctrica | Carga inductiva | 350 W Aprox. |

TABLA 5.1
CARGAS UTILIZADAS EN EL BANCO EXPERIMENTAL



muestras cada 30 segundos, se registraron un total de 361 muestras.

El resultado de la prueba se observa en la figura 5.12. Se muestran súbitas variaciones de potencia que se deben a la transición entre encendido y apagado de la carga resistiva, por lo cual se presentan valores máximos y mínimos en la gráfica. Esta prueba muestra que el sistema es capaz de sensar las diferentes variaciones que se presenten en la red eléctrica cuando la carga ilegal se conecta solamente por periodos cortos de tiempo.

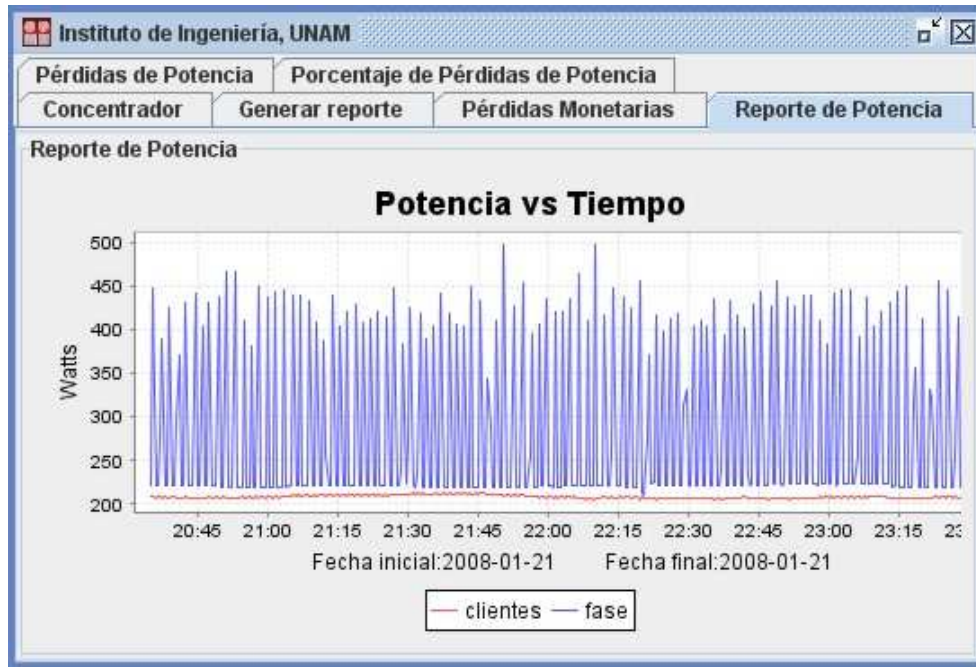


Figura 5.12 Carga ilegal variable conectada a la red eléctrica.

5.4.2 Segunda Prueba, cliente residencial con carga variable. Sistema de iluminación como carga ilegal.

Para esta prueba se conectó el Monitor especificado en la tabla 5.1 como carga del cliente residencial, también se utilizó un módulo de dos lámparas incandescentes y 3 lámparas fluorescentes compactas conectado como carga ilegal. El resultado de esta prueba nos muestra la variación de la carga ilegal por un periodo largo de tiempo. (Ver figura 5.13) En esta prueba se presentan pérdidas superiores al 65% debido a que la carga ilegal consume una mayor energía del total consumido por los clientes residenciales. En la figura 5.14 se muestra el porcentaje de pérdidas registrado para esta prueba.

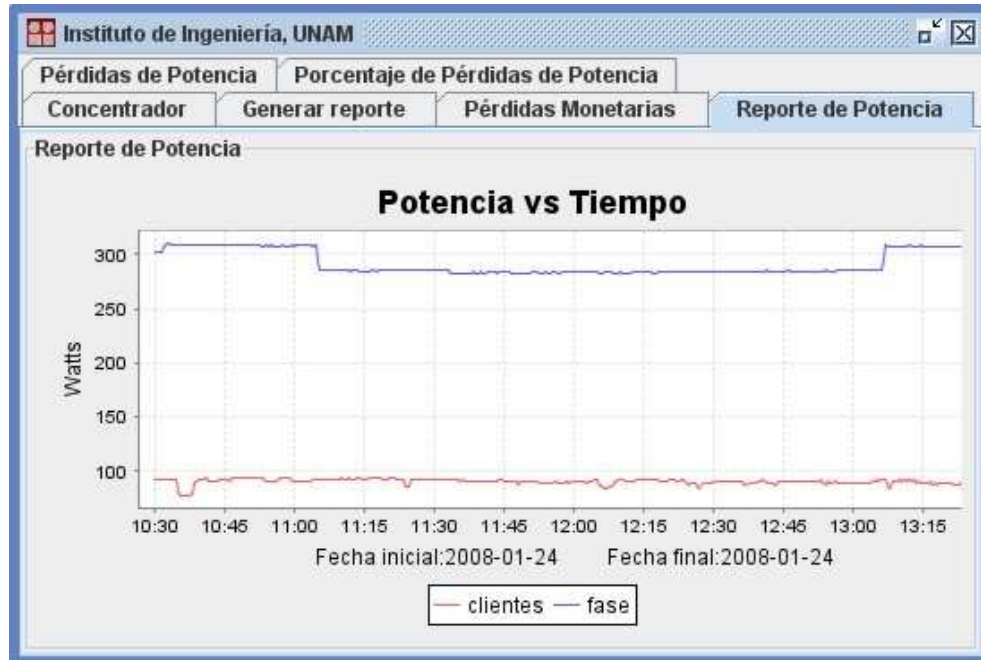


Figura 5.13 Prueba que registra pérdidas no técnicas de energía eléctrica.

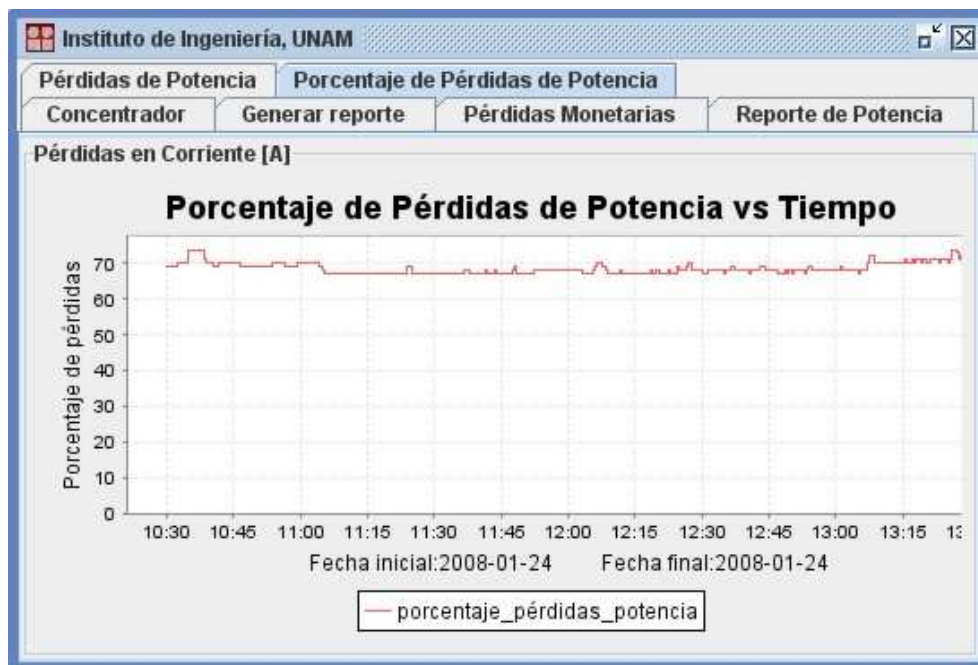


Figura 5.14 Porcentaje de pérdidas eléctricas superiores al 65% medidas en la segunda prueba.



5.4.3 Tercer prueba, dos clientes residenciales y carga ilegal variable conectada al sistema.

Para esta prueba se consideraron dos clientes PLC conectados a una misma fase. Al primer cliente, cuya IP es 10.10.1.2, se conectó un módulo de lámparas incandescentes mientras que al segundo cliente, con IP 10.10.1.3, se conectaron 5 focos fluorescentes compactos.

La carga ilegal conectada fue el Monitor y una Computadora personal cuyo tipo de carga es variable. La prueba se realizó durante 2 horas con muestras cada 30 segundos obteniendo 241 muestras. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.15.

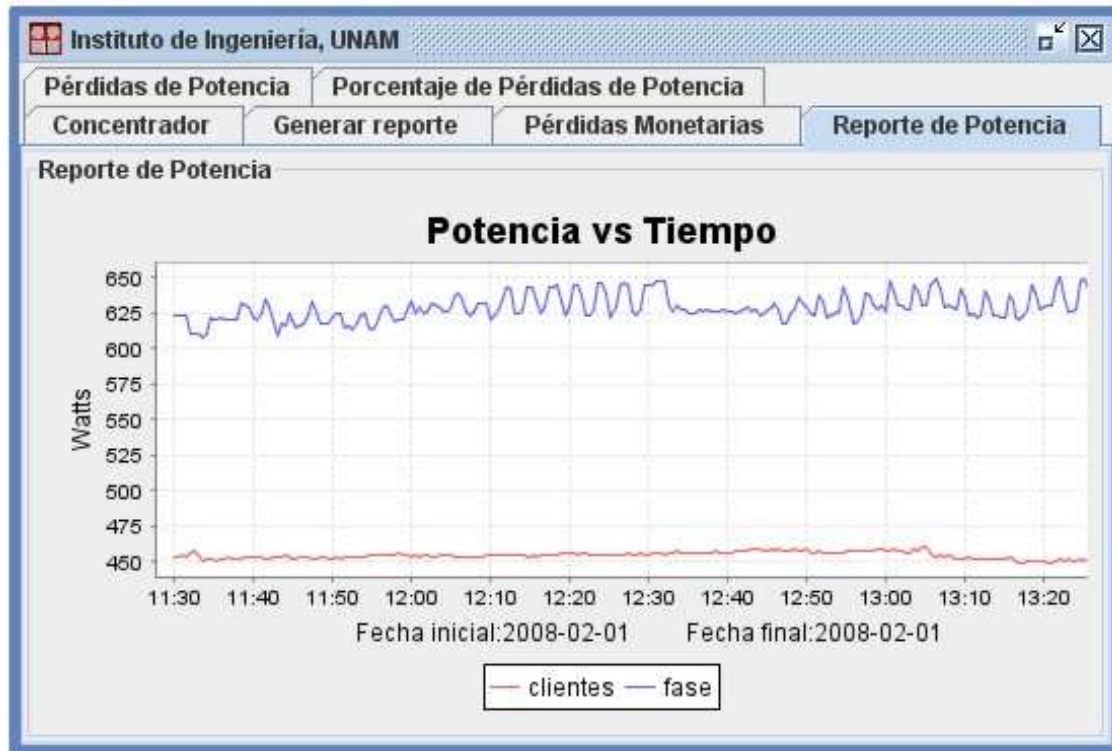


Figura 5.15 Prueba realizada con dos clientes conectados al mismo concentrador de datos.

Con los resultados de esta prueba se consiguió demostrar que el sistema está habilitado para la conexión de dos o más clientes a la red PLC. La línea superior representa el consumo registrado por el concentrador y la línea inferior, tal y como se planteó en la ecuación 5.1, representa el consumo total de los clientes. Dicho consumo es el resultado de la contribución de cada medidor residencial conectado a la fase evaluada.

El resultado obtenido es confiable y el porcentaje de pérdidas registrado para esta prueba supera el 25%

5.4.4 Cuarta prueba, dos Clientes residenciales y un sistema de iluminación incandescente como carga ilegal conectados a la red eléctrica.

Para esta prueba se conectaron dos clientes residenciales a la red PLC durante 2 horas. La distancia del cable utilizado fue de 3 m. La carga de un sistema de iluminación con lámparas fluorescentes compactas fue conectada a uno de los medidores clientes



mientras que al otro se conectó un monitor. La carga ilegal conectada entre los dos medidores consistió en un módulo de lámparas incandescentes. Las características de todas las cargas se mencionaron en la Tabla 5.1.

Para esta prueba se obtuvieron los siguientes resultados:

- No existió interrupción alguna durante la transmisión de los datos.
- Los datos se procesaron de manera satisfactoria dando como resultado la figura 5.16, en donde se presenta la potencia consumida por los medidores y el concentrador. En esta gráfica se observa el comportamiento de dos líneas. La línea que presenta valores máximos con respecto a la otra corresponde a los datos registrados por el concentrador, mientras que la línea que permanece relativamente constante, pertenece a los datos registrados por los medidores clientes. La primera línea descrita generó pérdidas no técnicas a la compañía suministradora.
- La figura 5.17 es el resultado de aplicar la ecuación 5.1 al sistema, es esta gráfica la que determina la existencia de pérdidas no técnicas y es este proceso en el que envía un aviso o alarma al operador de la compañía suministradora. En este aviso se indica el momento preciso en el que se registra el primer evento de pérdidas de energía.

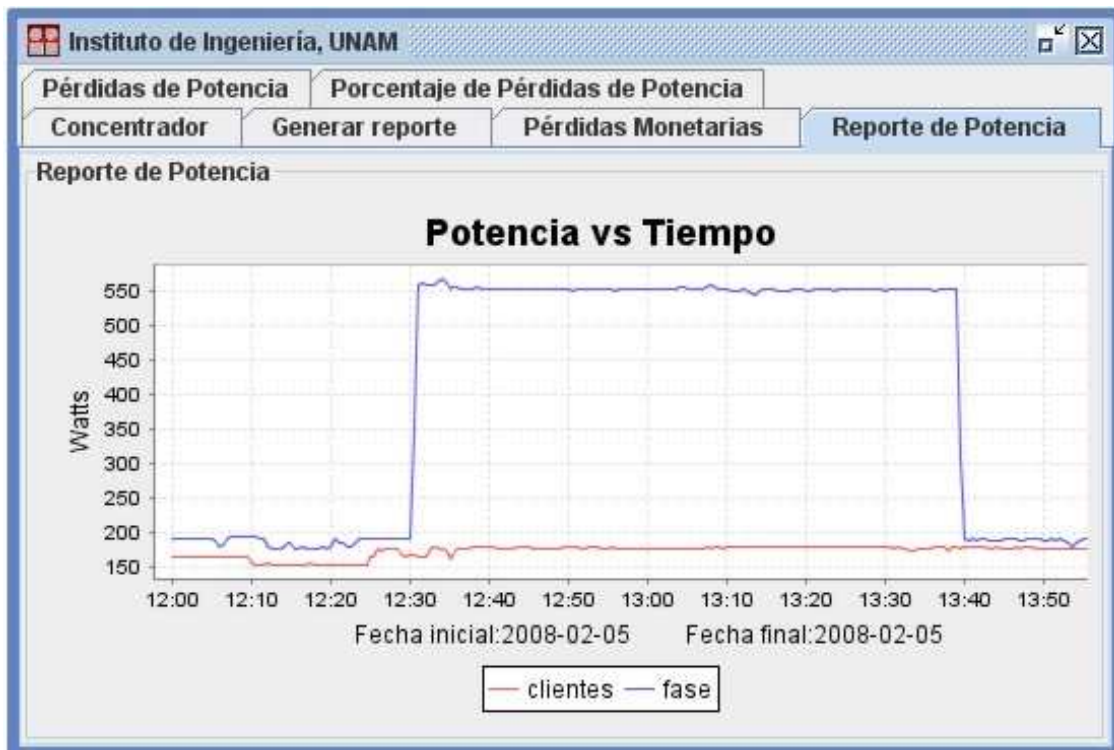


Figura 5.16 Carga ilegal conectada por un intervalo de tiempo.

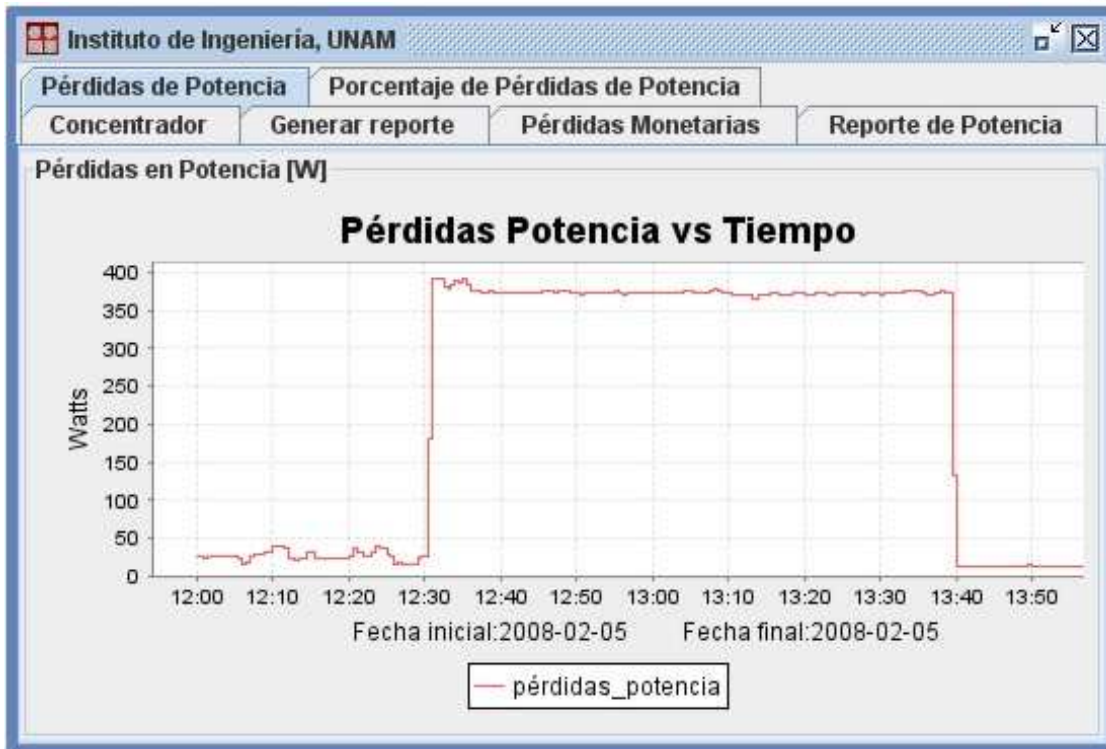


Figura 5.17 Pérdidas de energía registradas para esta prueba.

5.4.5 Quinta prueba, sistemas de iluminación incandescente, fluorescente y motor eléctrico monofásico.

Se conectó un sistema de iluminación incandescente y un motor monofásico en el cliente residencial. Un segundo motor fue conectado como carga ilegal junto con un sistema de iluminación fluorescente. El segundo motor se encendió sólo por algunos intervalos de tiempo. Los motores en los sistemas eléctricos provocan caídas de tensión cuando son encendidos debido a que necesitan consumir una corriente de arranque, que, dependiendo del diseño y la capacidad del motor, puede ser 2 o 3 veces la corriente nominal a la que funciona el motor normalmente. Dicha caída de tensión puede provocar problemas en el funcionamiento de los dispositivos conectados al circuito.

Los resultados de esta prueba se presentan a continuación (ver figura 5.18):

- La caída de tensión provocada por el arranque de los motores no significó ningún problema para la transmisión de los datos.
- Debido al funcionamiento de los motores los parámetros eléctricos (Volts, Ampers, Watts) no sufrieron modificaciones significativas que pudieran alterar los resultados de las pruebas.
- Los gráficos obtenidos satisfacen al comportamiento del encendido de los motores y permiten observar el momento preciso en que el segundo motor, que funcionó como carga ilegal, fue conectado.



- En la línea superior de la grafica se encuentran los datos registrados por el concentrador y se observan las variaciones del motor. El sistema registra variaciones espontáneas y con periodos de corta duración.
- La facturación se tomó por un periodo de una hora y generó pérdidas en potencia de 411 [W], lo que representa un costo de \$0.264 según la ecuación 5.2

En la figura 5.19 se observan el porcentaje de pérdidas registradas para esta prueba. Dicho porcentaje supera el 80% de pérdidas en algunos intervalos de tiempo.

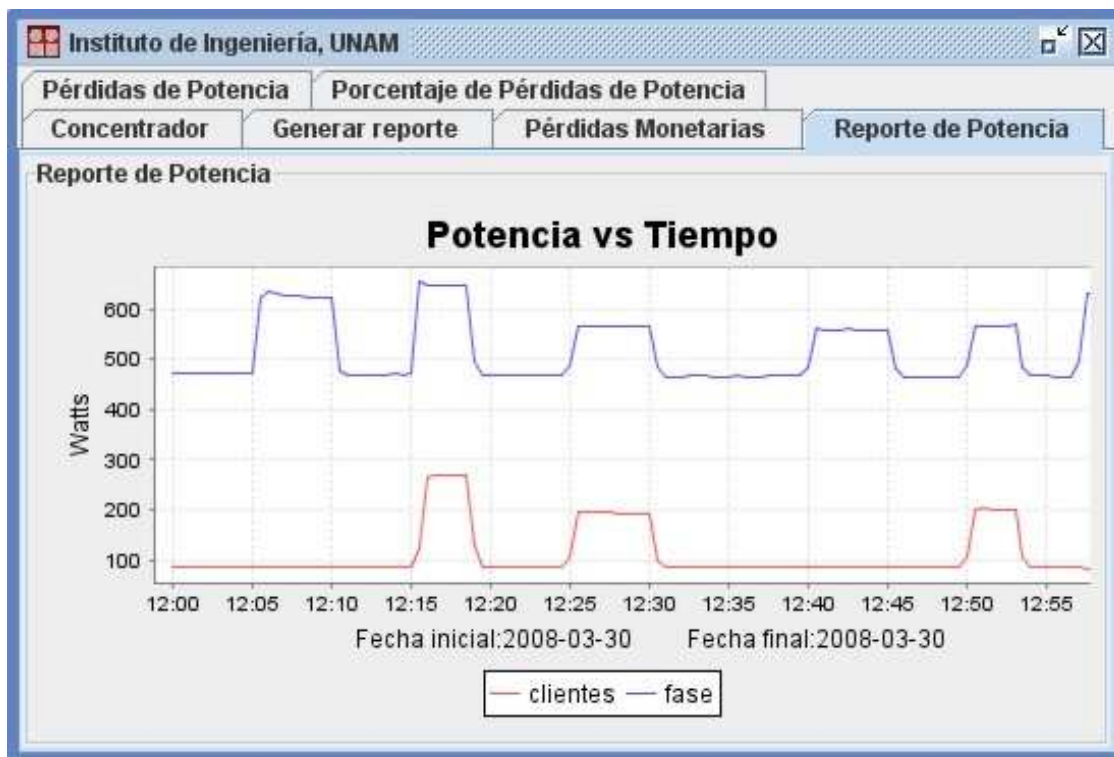


Figura 5.18 Prueba realizada utilizando motores monofásicos.

5.4.6 Sexta prueba, sistemas de iluminación incandescente y fluorescente.

Las acometidas monofásicas que instala CFE deben cumplir una distancia máxima de 35m entre el medidor y el registro -en caso de ser subterránea- o entre el medidor y el poste -en caso de ser aérea-[3]. Lo anterior se menciona para justificar la prueba que a continuación se describe. En esta prueba se pretende observar el funcionamiento del sistema para distancias mayores a 35m, se utilizó cable calibre 12 AWG con longitud de 100 mts.

En esta prueba se utilizaron sistemas combinados de iluminación. Se conectaron 3 lámparas fluorescentes compactas y dos incandescentes al medidor residencial y se conectó como carga ilegal un sistema de 3 lámparas incandescentes y dos fluorescentes compactas. El resultado de pérdidas de potencia en porcentaje observan en la figura 5.19.

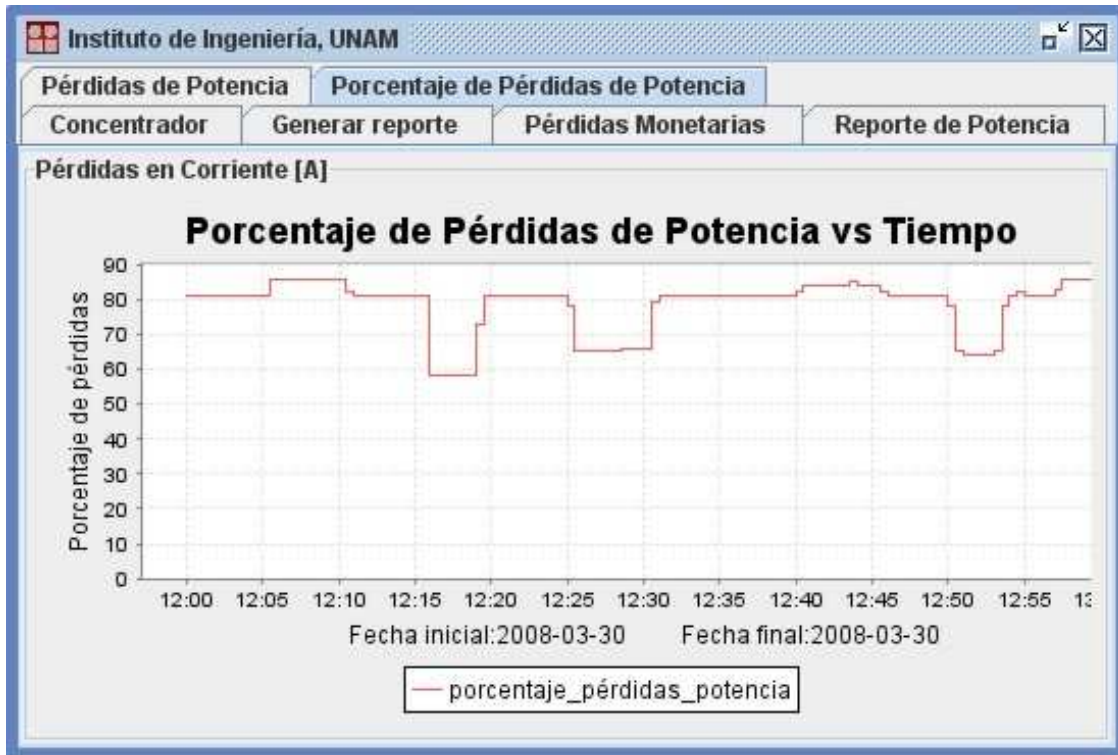


Figura 5.19 Pérdidas de energía en porcentaje utilizando motores monofásicos.

En la figura 5.20 se observan que los resultados muestran la comparación entre la energía que es cuantificada (línea inferior) y la que no lo es (línea superior), lo cual es generado por las pérdidas de energía producidas por una carga ilegal conectada entre el medidor y el concentrador. Para este caso el periodo de la prueba fue de 2 horas.

De igual manera a lo ocurrido con las distancias cortas, no existió interrupción durante la transmisión de los datos. De esta manera se demuestra la utilidad de la tecnología PLC aquí propuesta para operar en distancias superiores a lo que, en principio, es necesario. Las pérdidas monetarias se calcularon con lo especificado en la ecuación 5.2 y se presenta el reporte en la figura 5.21.

Se concluye que el sistema teóricamente podría trabajar para una acometida residencial monofásica que cumpla con las normas que establecen las especificaciones de la compañía suministradora y que cumpla también con la Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas NOM-001-SEDE-2005

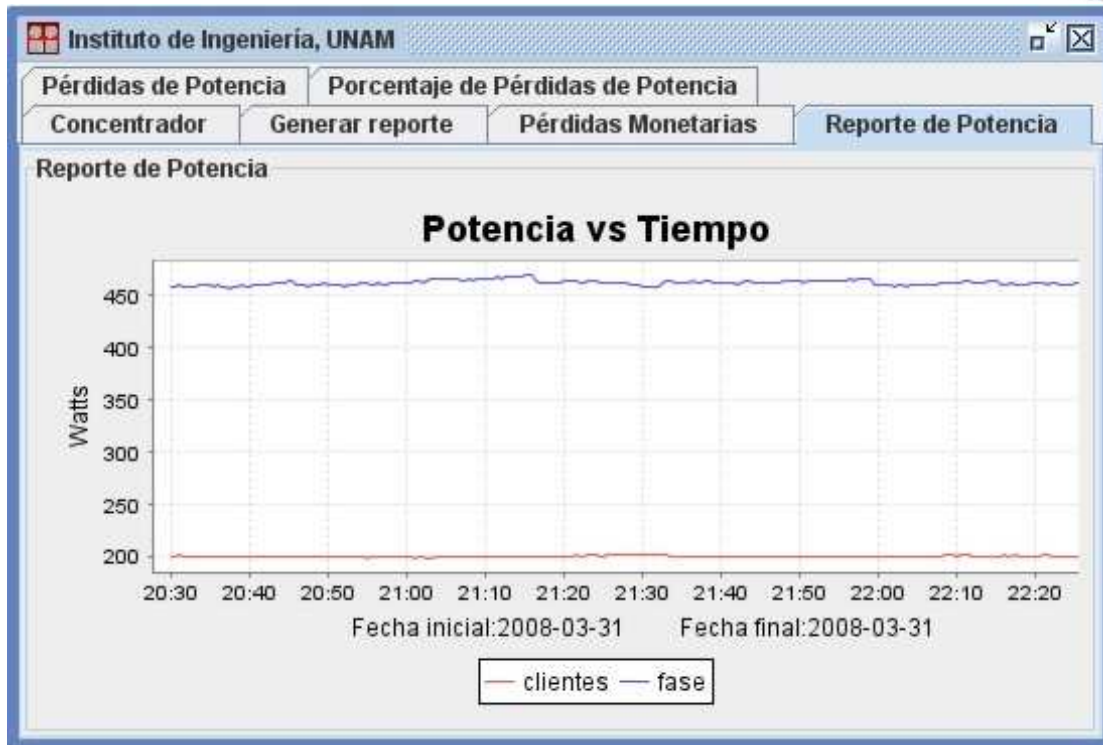


Figura 5.20 Verificación del sistema para longitudes mayores a los 35m.

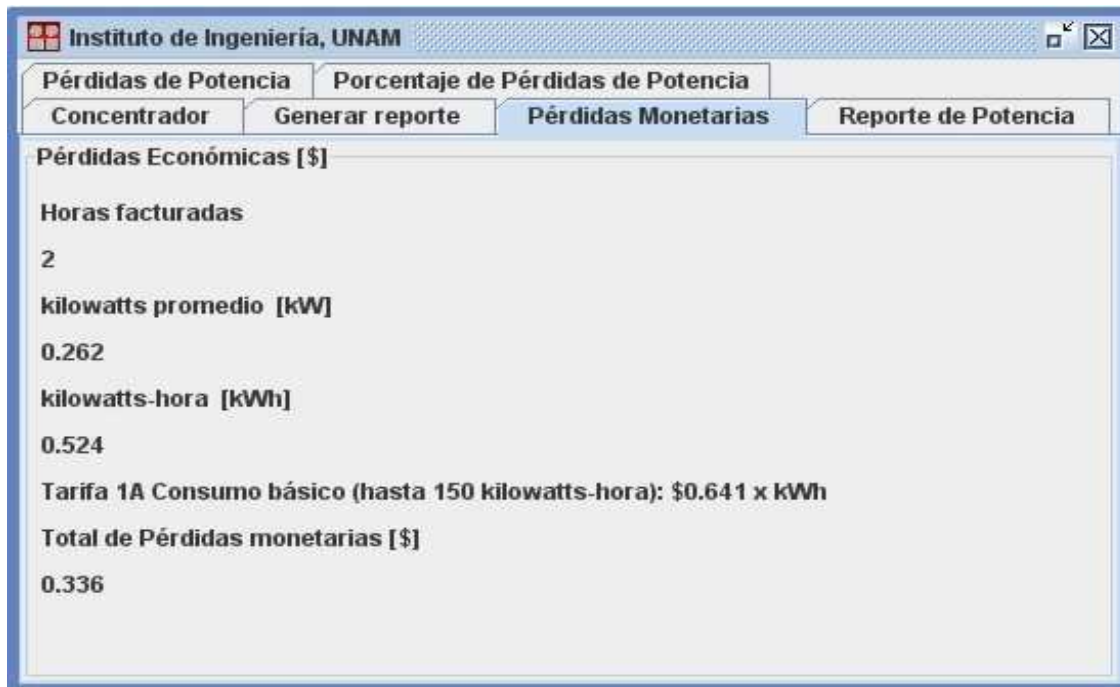


Figura 5.21 Reporte de pérdidas monetarias.



5.5 Conclusiones de los resultados obtenidos.

Después de analizar los resultados de las pruebas, se concluye lo siguiente:

- El sistema funciona para corto (3 m) y largo (100m) alcance. Esta última distancia es suficiente para cumplir con los requerimientos de una acometida eléctrica residencial [3].
- Si la distancia entre el poste –acometida aérea- o el registro –acometida subterránea- y el transformador fuese mayor a los 300m, distancia máxima de transmisión para los dispositivos PLC probados, podrían ser instalados repetidores de señal para asegurar la recepción de los datos en el concentrador.
- Los adaptadores PLC utilizados para intercomunicar el concentrador y los clientes son inmunes al ruido producido por fuentes que podrían degradar la calidad de la señal transmitida, como son, motores, lámparas fluorescentes compactas y computadoras para cumplir con las necesidades de transmisión de la aplicación estudiada.
- El ancho de banda proporcionado por la tecnología de comunicación propuesta (PLC) cumple adecuadamente las necesidades de la aplicación estudiada.
- El procesamiento de los datos satisface los requerimientos del sistema y las gráficas obtenidas son el resultado de la correcta manipulación de los mismos.
- El software es portable, es decir, puede ser instalado en cualquier computadora que soporte los requerimientos mínimos para su buen funcionamiento.
- El sistema trabaja correctamente en una red eléctrica desarrollada en un ambiente de laboratorio que cumple con las especificaciones mínimas de la Norma Oficial Mexicana, la NOM-001-SEDE-2005 (Utilización).
- El sistema cumple el objetivo de identificar las pérdidas eléctricas no técnicas en la red eléctrica monofásica montada en el laboratorio, independientemente del tipo de carga de que se trate.

En el Capítulo 6 se presentarán las conclusiones finales del presente documento así como también los trabajos que pueden desarrollarse a partir de esta investigación en el futuro.



Capítulo 6

Conclusiones Generales

Este último capítulo presenta las conclusiones del trabajo desarrollado en los cinco capítulos anteriores.

El trabajo presentado pretende demostrar la factibilidad de implementar un sistema similar al estudiado en una red de distribución real, con el fin de que las compañías suministradoras puedan evaluar de una manera más eficiente y prácticamente instantánea sus pérdidas de energía y así poder tomar las acciones pertinentes. Queda a consideración de las compañías suministradoras el estudio de una implementación en campo para los fines antes mencionados. Se espera que el desarrollo e investigación aquí presentados ayude a estimular la creación de herramientas, en hardware y software, que permitan reducir, en la medida de lo posible, el grave problema de las pérdidas eléctricas no técnicas en México a corto plazo. Este documento presenta una aplicación en la que los equipos PLC sean utilizados con fines de control y monitoreo de parámetros eléctricos y pretende también potencializar el uso de los sistemas PLC.

Los objetivos planteados al inicio de este documento se cumplieron satisfactoriamente y se logró implementar una red PLC en laboratorio que nos permitió obtener resultados confiables y precisos. Las pruebas realizadas con diversas cargas permitieron la verificación del buen comportamiento en la transmisión de datos vía PLC, debido a que en ningún momento se vio afectada la comunicación entre el concentrador y los medidores clientes conectados a la red.

Se comentó acerca de los procesos que se realizan en la modulación OFDM y se desarrolló una explicación para cada uno de ellos. Como ya se mencionó en la tesis, la modulación OFDM es el proceso en el cual se basan los sistemas PLC para la transmisión y recepción de datos vía cable eléctrico.

El software desarrollado logró el objetivo de integrar los diferentes elementos del sistema así como obtener los resultados de manera gráfica y entendible para cualquier usuario con conocimientos mínimos de los sistemas eléctricos de distribución. Es preciso mencionar que la configuración del software es altamente modificable y puede ser adaptado fácilmente para la manipulación de nuevos requerimientos en el sistema, además de las ventajas de la portabilidad mencionadas en el capítulo anterior y del análisis de pérdidas monetarias propuesto permite obtener un estimado del costo real provocado por las pérdidas eléctricas no técnicas para el sistema tarifario utilizado, queda para posteriores investigaciones el desarrollo para las tarifas eléctricas no consideradas en este documento.

Es importante mencionar que para garantizar el buen funcionamiento de la red PLC es necesario que el sistema de distribución en donde pretenda ser probado e instalado cumpla con los requerimientos que exige la Norma Oficial Mexicana para las instalaciones eléctricas, la NOM-001-SEDE-2005(Utilización), de otra manera los datos pueden perderse e incluso pueden sufrir daños los adaptadores PLC y los equipos de medición.

En el desarrollo del proyecto se redujeron los costos al máximo sin poner en riesgo la confiabilidad de los resultados, esto se logró gracias a la realización de convenios con empresas como FONKEL y Corinex para la adquisición del PQL120 y del AV200 respectivamente, además de que la pieza de software desarrollada fue totalmente programada utilizando herramientas de software libre como JAVA y Postgresql.



6.1 Trabajos Futuros.

El trabajo presentado pretende contribuir con la investigación para posteriores aplicaciones y desarrollos de los sistemas PLC.

La siguiente fase de investigación para este proyecto es la integración de los equipos PQL con los adaptadores PLC en un mismo dispositivo que tenga una capacidad de conducción de corriente mayor a los 15[A] utilizados en este proyecto. Es necesario también crear un módulo protección para los dispositivos electrónicos así como también el diseño de un sistema de respaldo de energía que permita al sistema trabajar de manera independiente al suministro de electricidad provisto por las compañías suministradoras, esto con el fin de garantizar el funcionamiento en todo momento y evitar la pérdida de información.

Generalmente los equipos para el control de parámetros eléctricos y el software que los hace funcionar son importados, lo que deriva en fuertes inversiones para la industria eléctrica, por lo cual este documento propone la realización de investigaciones que permitan un control de los parámetros eléctricos con inversión reducida y con resultados altamente confiables. Basándose en los principios desarrollados en este documento puede realizarse la investigación orientada a la creación de medidores de energía remotos que permitan detectar cargas ilegales, controlar el balanceo de cargas, detectar las señales armónicas, en resumen, monitorear en tiempo real los parámetros eléctricos con el fin de prevenir y corregir problemas en las redes de distribución eléctrica utilizando PLC.

6.2 Costos estimados para la realización del proyecto en campo.

Actualmente en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se continúa trabajando para implementar el proyecto que se plantea en este documento y poder crear prototipos del concentrador y cliente PLC, para que posteriormente puedan ser probados en campo.

A continuación se presenta un estimado del costo total necesario a invertir en el proyecto tomando en cuenta la inversión hecha hasta septiembre de 2008.

Se necesita integrar una tarjeta electrónica en la que se encuentren incluidos el medidor PQL y el adaptador PLC para la generación del cliente. Dicha tarjeta debe contar con una etapa de seguridad y respaldo de energía. Para la generación de esta tarjeta se estima un costo aproximado de \$8000 pesos.

Para el concentrador PLC, es necesario considerar el desarrollo del software en el cual se incluye la implementación de un servidor de base de datos. La integración de un sistema de comunicación que sea capaz de transmitir los datos de facturación a la compañía suministradora y la integración del concentrador sistema de distribución a través del transformador. Se estima un costo aproximado de \$20,000 pesos.

Considerando el costo de la investigación, desarrollo del proyecto y sueldos se estima un aproximado de \$500,000 pesos durante un año de trabajo para un equipo conformado por 5 investigadores.

Es importante mencionar que la estimación de los costos antes mencionados esta sujeto a variaciones por diversos factores, y que pueden ser, incluso, ajenos al proyecto.



Apéndice A

Transformada de Fourier para señales analógicas.

El par de transformadas de Fourier para el tiempo continuo son las siguientes.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad \text{Eq. A1}$$

Transformada de Fourier en tiempo continuo

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad \text{Eq. A2}$$

Transformada inversa de Fourier en tiempo continuo

$f(t)$: Es función compleja de variable (t) en tiempo continuo.

$F(\omega)$: Es la función compleja de variable $(\omega = 2\pi f)$ de frecuencia.

$$e^{\pm j\omega t} = \cos(\omega t) \pm j\text{sen}(\omega t)$$

Transformada de Fourier para señales digitales. (TDF)

$$X_d(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad \text{Eq. A3}$$

Transformada de Fourier en tiempo discreto

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_d(k)e^{j2\pi kn/N} \quad \text{Eq. A4}$$

Transformada inversa de Fourier en tiempo discreto

N : Número de muestras consideradas

n : Índice de tiempo de muestreo, sus valores son $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

k : El índice para el grupo de componentes de frecuencia calculados.

$$e^{\pm j2\pi kn/N} = \cos(2\pi kn/N) \pm j\text{sen}(2\pi kn/N)$$

En el caso de la modulación OFDM se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT) que utiliza los mismos principios que la DFT sólo que sus procesos los realiza en un menor tiempo.



Diferencias entre DFT y FFT

Un inconveniente cuando se utiliza el DFT es la cantidad de tiempo requerida para computar la salida. Esto se debe a que los índices k y n , deben variar de 0 a $N-1$, para conseguir el rango de salida completo, y por tanto se debe realizar N^2 operaciones.

La diferencia principal entre estos dos métodos radica en que la FFT calcula sólo la mitad de los coeficientes de Fourier, esto es, sólo aquellos en el dominio de las frecuencias positivas debido al carente sentido de calcular los coeficientes de frecuencias negativas, ya que estas últimas representan una duplicidad de las frecuencias positivas para funciones reales de tiempo.

El objetivo de la transformada rápida de Fourier (FFT) y su inversa (IFFT) es usar esta redundancia para reducir el número de cálculos necesarios.

Otra diferencia importante es que en la mayoría de los casos la DFT puede ser programada con lenguajes de alto nivel (BASIC, FORTRAN, C, JAVA) y los algoritmos de la FFT se programan en lenguajes de bajo nivel (Ensamblador).

La tabla A1 muestra las diferencias en la complejidad entre los procesos DFT y FFT.

| N | <i>DFT</i> | | <i>FFT</i> | | <i>Ratio of DFT multiplications to FFT multiplications</i> | <i>Ratio of DFT additions to FFT additions</i> |
|------|--|------------------------------------|--|------------------------------------|--|--|
| | <i>Number of complex multiplications</i> | <i>Number of complex additions</i> | <i>Number of complex multiplications</i> | <i>Number of complex additions</i> | | |
| 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 |
| 4 | 16 | 12 | 4 | 8 | 4 | 1.5 |
| 8 | 64 | 56 | 12 | 24 | 5.3 | 2.3 |
| 16 | 256 | 240 | 32 | 64 | 8.0 | 3.75 |
| 32 | 1024 | 992 | 80 | 160 | 12.8 | 6.2 |
| 64 | 4096 | 4032 | 192 | 384 | 21.3 | 10.5 |
| 128 | 16384 | 16256 | 448 | 896 | 36.6 | 18.1 |
| 256 | 65536 | 65280 | 1024 | 2048 | 64.0 | 31.9 |
| 512 | 262144 | 261632 | 2304 | 4608 | 113.8 | 56.8 |
| 1024 | 1048576 | 1047552 | 5120 | 10240 | 204.8 | 102.3 |
| 2048 | 4194304 | 4192256 | 11264 | 22528 | 372.4 | 186.1 |
| 4096 | 16777216 | 16773120 | 24576 | 49152 | 682.7 | 341.3 |
| 8192 | 67108864 | 67100672 | 53248 | 106496 | 1260.3 | 630.0 |

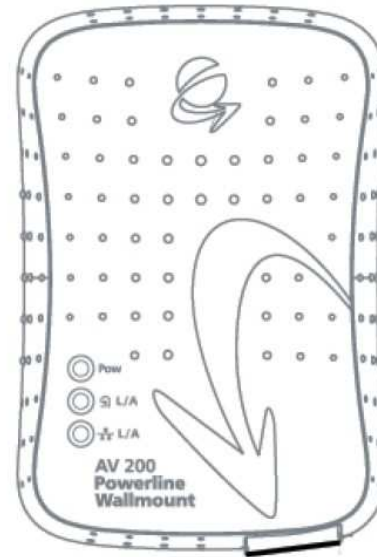
Tabla A1. Diferencias entre DFT y FFT.



Apéndice B

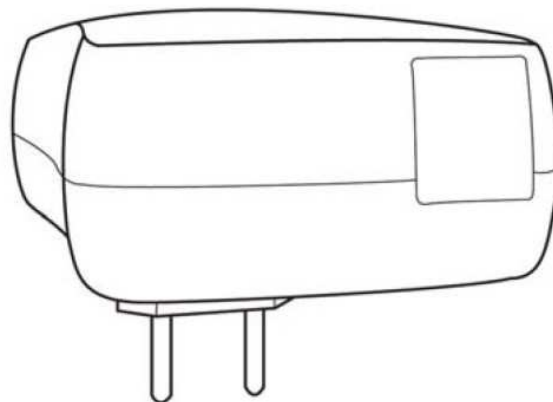
Descripción Física

Definiciones de la señal de luz LED (LEDs de izquierda a derecha)



| | | |
|---------------------|-------|--|
| 1. Encendido | Verde | On: Encendido Off: Apagado |
| 2. PLC | Verde | On: Powerline activity Off : No hay actividad Powerline Intermitente: Recibiendo/Transmitiendo datos |
| 3. ETHERNET | Verde | On: Enlace a LAN Off: No hay enlace a LAN Intermitente: Recibiendo/Transmitiendo datos |

Definiciones de los conectores





I. LAN: Puerto Ethernet 1x RJ-45 LAN10/100

Especificaciones Técnicas

| | |
|---|--|
| Estándar | IEEE 802.3u |
| Velocidad | 200 Mbps en nivel físico |
| AC Enchufe de corriente | USA, EU , UK y Australia |
| LED Señal de luz | Power, Enlace/Actividad PLC, Enlace Ethernet |
| Interfase | 10/100BaseT Fast Ethernet, Powerline |
| Rango de alcance | 2 – 34 MHz |
| Entrada de poder | 85 a 265 V AC, 50/60 Hz |
| Dimensiones | 148 mm L x 106 mm W x 47 mm H |
| Densidad espectral de la energía transmitida | -56 dBm/Hz |
| Consumo de energía | 5W |
| Seguridad y EMI | UL/EN 60950, FCC Part 15, limites EN 55022 EMC |

Corinex AV200 Powerline Ethernet Wall Mount

Información obtenida del Manual del Usuario



Apéndice C

| Tarifas específicas 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F (Año 2008) | |
|--|--|
| 1 | Servicio doméstico |
| 1A | Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 25 grados centígrados. |
| 1B | Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 28 grados centígrados. |
| 1C | Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 30 grados centígrados. |
| 1D | Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 31 grados centígrados. |
| 1E | Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 32 grados centígrados. |
| 1F | Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 33 grados centígrados. |
| Tarifas DAC, Servicio Doméstico de Alto Consumo | |
| DAC | Esta tarifa solo se suministra en baja tensión y se aplica a los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente doméstico, en función de la región y la temporada del año |
| Tarifas específicas 5, 5A, y 6 (Año 2008) | |
| 5 | Servicio para alumbrado público zonas conurbadas del Distrito Federal, Monterrey y Guadalajara. |
| 5A | Servicio para alumbrado público en todo el país. 6 Servicio para bombeo de aguas potables o negras, de servicio público. |
| 6 | Servicio para bombeo de aguas potables o negras, de servicio público. |
| Tarifas específicas 9 y 9-M (Año 2008) | |
| 9 | Servicio para bombeo de agua para riego agrícola en baja tensión. |
| 9M | Servicio para bombeo de agua para riego agrícola en media tensión. |
| 9CU | Tarifa de estímulo para bombeo de agua para riego agrícola con cargo único. |
| 9N | Tarifa de estímulo nocturna para bombeo de agua para riego agrícola. |
| Tarifas generales en baja tensión 2, 3 y 7 | |
| 2 | Servicio general hasta de 25 kW de demanda. |
| 3 | Servicio general para más de 25 kW de demanda. |
| 7 | Servicio temporal. |
| Tarifas generales en media tensión OM, HM y H-MC | |
| OM | Tarifa ordinaria para servicio general en media tensión con demanda menor a 100 kW. |
| HM | Tarifa horaria para servicio general en media tensión con demanda de 100 kW o más. |



| | |
|--|--|
| H-MC | Tarifa horaria para servicio general en media tensión con demanda de 100 kW o más, para corta utilización. En la región Baja California, Sinaloa y Sonora. |
| Tarifas generales en alta tensión HS, HS-L, HT y HT-L | |
| HS | Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel subtransmisión. |
| HS-L | Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel subtransmisión, para larga utilización. |
| HT | Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel transmisión. |
| HT-L | Tarifa horaria para servicio general en alta tensión, nivel transmisión, para larga utilización. |
| Tarifas de respaldo en media tensión HM-R, HM-RF y HM-RM | |
| HM-R | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para falla y mantenimiento en media tensión. |
| HM-RF | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para falla en media tensión. |
| HM-RM | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para mantenimiento programado en media tensión. |
| Tarifas de respaldo en alta tensión HS-R, HS-RF, HS-RM, HT-R, HT-RF y HT-RM | |
| HS-R | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para falla y mantenimiento en alta tensión, nivel subtransmisión. |
| HS-RF | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para falla en alta tensión, nivel subtransmisión. |
| HS-RM | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para mantenimiento programado en alta tensión, nivel subtransmisión. |
| HT-R | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para falla y mantenimiento en alta tensión, nivel transmisión. |
| HT-RF | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para falla en alta tensión, nivel transmisión. |
| HT-RM | Tarifa horaria para el servicio de respaldo para mantenimiento programado en alta tensión, nivel transmisión. |
| Tarifas en alta tensión I-15 y I-30 | |
| I-15 | Tarifa para servicio interrumpible. |
| I-30 | Tarifa para servicio interrumpible. |

Tabla realizada con base en lo establecido en la página Web de la Comisión Federal de Electricidad



Glosario de Términos

API

Del inglés Application Programming Interface - Interfaz de Programación de Aplicaciones es el conjunto de funciones y procedimientos (o métodos si se refiere a POO) que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software como una capa de abstracción.

CSMA / CD (Carrier Sense Multiple Access / Detección de colisión) es el protocolo utilizado en redes Ethernet para asegurar que sólo un nodo de red transmita en un momento dado. *Permite que cada* dispositivo Ethernet escucha el cable Ethernet antes de que los intentos de transmitir. Si el dispositivo Ethernet sensa otro dispositivo que está transmitiendo, se espera que transmita. *Acceso múltiple* significa que más de un dispositivo Ethernet puede ser de percepción (a la espera de escuchar y transmitir) a la vez. *Detección de colisión* significa que cuando múltiples dispositivos Ethernet accidentalmente transmitir al mismo tiempo, son capaces de detectar este error.

IP

Una **dirección IP** es un número que identifica de manera lógica y jerárquica a una interfaz de un dispositivo (habitualmente una computadora) dentro de una red que utilice el protocolo IP (*Internet Protocol*)

JAVA

Java es un lenguaje de Programación Orientado a Objetos (POO), el arte de descomponer un enorme problema complejo en múltiples problemas pequeños fáciles de resolver. JAVA fue desarrollado por Sun Microsystems, esta diseñado para ser una maquina virtual que pueda correr en cualquier plataforma (Windows, Linux, Solaris, MAC, etc).

Onda corta Banda de radiofrecuencias comprendidas entre los 2.3MHz y los 30 MHz en la que transmiten (entre otras) las emisoras de radio internacionales y las estaciones de radioaficionados. También se conoce como radio de alta frecuencia [HF].

OSI (Open Systems Interconnection) Modelo.

Modelo que establece las bases para la definición de protocolos de comunicación para sistemas informaticos, propuesto por la Organización Internacional de Normalización (ISO).



Capas del modelo OSI.

| | |
|-----------------------------|---|
| 1. Nivel Físico | Características mecánicas y eléctricas de la red |
| 2. Nivel de enlace de datos | Establece y mantiene el flujo de datos. Detección y corrección de errores |
| 3. Nivel de red | Administración y gestión de los datos. Regulación del tráfico. |
| 4. Nivel de transporte | Asegura la transferencia de la información a pesar de fallos en niveles anteriores. Busca rutas alternativas de transmisión. |
| 5. Nivel de sesión | Tareas de seguridad, contraseñas y administración del sistema. |
| 6. Nivel de presentación | Se encarga de traducir lenguajes de bajo y medio nivel a lenguajes de alto nivel (nivel de usuario). |
| 7. Nivel de Aplicación | Se encarga del intercambio de información entre los usuarios y el sistema operativo (se incluye la transferencia de archivos y los programas de aplicación) |



1.8 Bibliografía

- [1] CFE, “Estado de resultados financieros”. Diciembre 2007:
<http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/finanzas/estadosfinancieros/2007/alcierredel2007/>
- [2] LyFC , “Estado de resultados financieros”, Diciembre 2007:
http://www.lfc.gob.mx/files/active/0/Imagenes/edo_res2007.gif
- [3] Velasco Enrique, Gutiérrez Ramon, Angeles Cesar; “Supervisión de Pérdidas Eléctricas no Técnicas en un Laboratorio utilizando PLC”. Memorias del Congreso RVP-AI 2008, Acapulco, México. Ponencia 187
- [4] CFE, Inversión para la generación de energía eléctrica de la presa “El Cajón”. Nayarit, México: <http://www.cfe.gob.mx/CAJON/es/InformacionBasica/>
- [5] Benedict, E., Collins, T., et al: “Losses in Electrical Power Systems”, *Electrical and Computer Engineering, ECE Technical Report, Purdue libraries, Purdue University, 1992.*
- [6] Hickok, H. N.: “Electrical Power Losses in Power Systems”, *IEEE trans. on industry application, Vol. 1A-14, No. 5, Sep/Oct. 1978.*
- [7] Energy Australia, “Energy Distribution Loss Factor”, Calculation Methodology Paper Febrero 2007
- [8] Suriyamongkol, D., “Non-Technical Losses in Electrical Power Systems”, Tesis presentada para a obtención de grado de Master of Science, Ohio University, 2002.
- [9] Perez, E.H.; Nkanka, B.N.; et al: “Analysis of technical losses in distribution networks of large cities in underdeveloped African countries.” Case of the City of Kinshasa / Dem. Rep. of Congo. Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE
- [10] Indicadores de pérdidas de energía para CFE y L Y FC
<http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/index.jsp?id=304>
- [11] López Fernando; “Power Line Communications – Internet de alta velocidad a través de líneas eléctricas” everis México.
- [12] Presidencia 2000-2006; “Inicia CFE telefonía e internet, por red eléctrica”, página oficial de la presidencia, Febrero de 2005
<http://fox.presidencia.gob.mx/buenasnoticias/?contenido=16627&pagina=296>
- [13] Cuadros Adrián; “¿Internet y teléfono en el contacto eléctrico?” Artículo publicado por MasterMagazine en Septiembre 2006
<http://www.mastermagazine.info/articulo/10635.php>



- [14] Majumder A., Caffery Jr. J; "Power line communications: an overview" IEEE POTENTIALS octubre/noviembre



2.4 Bibliografía

- [1] T.A. Short, "Electric Power Distribution". Editorial CRC Press pp 2-4.
- [2] Richard E. Brown, "Electric power Distribution Reliability". p.p. 7-9
- [3] Pacheco José, Crisóstomo Jesús; "Prácticas recomendadas para lograr una alta disponibilidad en el servicio de energía eléctrica en líneas de distribución aéreas de media y baja tensión." Tesis presentada para la obtención de grado de Ingeniero Eléctrico, Facultad de Ingeniería, UNAM. 2006. p.p. 36 – 40.
- [4] Ventas internas de energía eléctrica, Secretaría de Energía con datos de Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro. http://portal.energia.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/ee/Ventas_Internas_de_Energia_Electrica.pdf. (Consultado 28 Julio 2008)
- [5] Benedict, E., Collins, T., et al: "Losses in Electrical Power Systems", Electrical and Computer Engineering, ECE Technical Report, Purdue libraries, Purdue University, 1992.
- [6] Hickok, H. N.: "Electrical Power Losses in Power Systems", IEEE trans. on industry application, Vol. 1A-14, No. 5, Sep/Oct. 1978.
- [7] Energy Australia, "Energy Distribution Loss Factor", Calculation Methodology Paper Febrero 2007
- [8] Suriyamongkol, D., "Non-Technical Losses in Electrical Power Systems", Tesis presentada para a obtención de grado de Master of Science, Ohio University, 2002.
- [9] Perez, E.H.; Nkanka, B.N.; et al: "Analysis of technical losses in distribution networks of large cities in underdeveloped African countries." Case of the City of Kinshasa / Dem. Rep. of Congo. Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE
- [10] K.V. Prasad, "Principles of Digital Communications Systems and Computers Networks". Editorial: Charles River Media. p.p. 17 – 18
- [11] Gibson, Jerry D., "Principles of digital and analog communications" Editorial: MacMillan
- [12] DS2, "Empresa española dedicada a la investigación y desarrollos de los sistemas PLC". <http://www.ds2.es>
- [13] Grupo ICE, "Aplicación AMR-PLC en zonas rurales, Costa Rica" http://www.grupoice.com/esp/temas/noticias/prensa_ice/saladeprensa/com_pren/ice_med_ele_aut.html



- [14] *D. Gutiérrez; Luis M. Torres; Francisco Blasco; Judit Carreras; Juan Riveiro, "In-Home PLC Ready for Triple Play", Departamento de investigación y desarrollo, DS2. España 2005*

- [15] *IEC, "Electromagnetic Compatibility, International electrotechnical Vocabulario", Capítulo 161, IEC Publication 50(161), 1989.*

- [16] *Halid Hrasnica; Abdelfatteh Haidine; Ralph Lehnert;, "Broadband PowerLine Communications, Network Design", Editorial Wiley, pp. 55-57, 60 2004*

- [17] *EMC, "Compatibilidad electromagnetica", http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/ksgbm001.html*



3.7 Bibliografía

- [1] Simois Tirado Francisco José; “Aplicación de la precodificación lineal en la modulación multiportadora”. Tesis Doctoral, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. España 2005.
- [2] M.L. Doeltz, E.T. Heald and D.L. Martin, “Binary Data Transmission Techniques for Linear Systems”, Proc. I.R.E., vol. 45, pp. 656-658, May 1957.
- [3] BURTON R. SALTZBERG. “Performance of an Efficient Parallel Data Transmission System”. pp. 805-806 Diciembre, 1967
- [4] Weinstein S. B. “Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform”. pp. 628-634 Octubre, 1971
- [5] Yu, Chia-Hao. “Orthogonal Frequency Division Multiplexing”. Course in Radio Communications, pp. 3. Febrero, 2006
- [6] Montiel Oliveros, Alejandro; “Simulación de un transmisor OFDM basado en el estándar IEEE 802.11a usando serenade”. Universidad de Carabobo, Venezuela
- [7] Halid Hrasnica, Abdelfatteh Haidine, Ralph Lehnert, “Broadband PowerLine Communications, Network Design” Editorial Wiley, pp. 83-89, 109. Año 2004
- [8] Gregorio, Fernando H.; “802.11A - OFDM PHY CODING AND INTERLEAVING”, Helsinky University of Technology, Finlandia
- [9] K.V.V PRASAD; “Principles Digital Communications Systems and Computer Networks”, pp. 117-118
- [10] Henrik Schulze, Cristian Lüders; “Theory and applications of OFDM and CDMA Wideband Wireless Communications” Editorial Wiley, 181-183
- [11] Sigfredo Pagel; “El sistema OFDM. La estructura de transmisión de la radio digital DRM”, Radiodifusión Digital. Dpto. Tecnologías de las Comunicaciones ETSE Telecomunicación. Universidad de Vigo, pp. 84-93. Mayo 2007
- [12] Mike Predko; “Digital electronics”, McGraw Hill. pp. 231-233
- [13] Sigfredo Pagel, “La radiodifusión en las bandas sub 30MHz, el sistema DRM”, Dpto. Teoría de la señal. Universidad de Vigo pp. 5
- [14] Kari Pietikäinen; “Orthogonal Frequency Division Multiplexing”, Postgraduate Course in Radio Communications. Helsinki University of Technology.
- [15] Dr. Hinostraza Zubía, Víctor Manuel; “Apuntes del curso de Comunicaciones II, Técnicas de acceso múltiple. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. México



- [16] Mark Balch; "Complete Digital Design, a comprehensive guide to digital electronics and computer system architecture", McGraw Hill pp. 97-98
- [17] Condumex Cables; "Manual Técnico de instalaciones eléctricas en baja tensión. Grupo Condumex, pp. 63. Agosto 2007
- [18] T.A. Short; "Electric Power Distribution", Editorial CRC Press LLC. pp 2-4. 2004
- [19] Nortel; "OFDM Tecnología de 4G", http://www.nortel.com/corporate/technology_new/technologies_sp.html
- [20] Proceso de codificación; "Diagrama de Trellis", <http://www.isa.cie.uva.es/proyectos/codec/marco4.html>
- [21] Modulaciones digitales; "Codificación M-ario", <http://rtfogrupo13.blogspot.com/>
- [22] Sam W. Ho; "Adaptive Modulation (QPSK, QAM)" Intel in Communications
- [23] Ronald J. Tocci; "Sistemas Digitales. Principios y aplicaciones" Prentice all, Quinta Edición pp. 519, 574, 575
- [24] Uribe Parada José, Fierro Morineaud Nestor; "Implementación en Tiempo Real de la Sincronización en OFDM". Instituto de Electricidad y Electrónica. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile.
- [25] Escobar Salguero Larry Hipólito; "Estudio comparativo y aplicaciones de algoritmos de filtrado adaptable." Ingeniería. Investigación y Tecnología, abril-junio, año/vol. V, número 2. pp. 101-102. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [26] Almarza Hernán-Pérez Fernando; "Introducción a los sistemas DRM". Radiodifusión digital. pp. 113 Septiembre 2006.



4.4 Bibliografía

- [1] Página oficial Corinex, <http://www.corinex.com/>
- [2] Página oficial ASCOM, <http://www.ascom.com>
- [3] Página oficial HOMEPLUG, <http://www.homeplug.org>
- [4] Página oficial LinkSys, <http://www.linksys.com>
- [5] Página oficial DS2, <http://www.ds2.es/>
- [6] Página oficial MainNet, <http://www.mainnet-plc.com>
- [7] Página oficial NetGear, <http://www.netgear.com>
- [8] Página oficial llevo, <http://www.ilevo.com/>
- [9] Página oficial OvisLink, <http://www.mainnet-plc.com>
- [10] Página oficial XAVi, <http://www.xavi.com.tw>
- [11] Página oficial Tecnocom, <http://www.tecnocom.biz>
- [12] Página oficial Ambient, <http://www.ambientcorp.com>
- [13] Corinex; “AV200 Powerline Ethernet Wall Mount Manual del Usuario”, pp. 5-6. Marzo, 2006
- [14] AP IWAN; “Tecnologías de convergencia sobre Redes de Video Cable y Redes Eléctricas”, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. ExpoComm, Argentina 2006
- [15] Estándar IEEE 802.3u, <http://www.patentstorm.us/patents/6366567-description.html>
- [16] AMR, Automatic Meter Reading. http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_meter_reading
- [17] CONAE; “Tarifas eléctricas aplicables en México”, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, pp. 3. Marzo 2002.
- [18] Tarifas CFE, <http://www.cfe.gob.mx/es/InformacionAlCliente/conocetutarifa/>
- [19] Elliotte Rusty Harold ; “Java Network Programming”. O’Reilly, pp. 271. Segunda edición, Agosto 2000.
- [20] “The Java Reference Library”, Version 1.2. O’Reilly & Asociados, pp. 174, 191. 1996-1997



- [21] API CSV para JAVA, <http://javacsv.sourceforge.net/>
- [22] Base de datos relacional orientada a objetos, PostgreSQL;
<http://www.postgresql.org/>
- [23] Robert Eckstein, Marc Loy, Dave Wood; "JAVA Swing", O'Reilly, pp-11. 1998
- [24] Raya José Luis, Raya Cristina; "TCP / IP en Windows NT Server".
Alfaomega, 1999 pp. 22-23
- [25] IEC; "Electromagnetic Compatibility, International"
Electrotechnical Vocabulario, Capitulo 161, IEC Publication 50(161),
1989.
- [26] Halid Hrasnica, Abdelfatteh Haidine, Ralph Lehnert; "BroadbandPowerLine
Communications, Network Design" Editorial Wiley, pp. 55-57, 60 2004
- [27] UPA Universal Powerline Association; www.upapl.org
- [28] EMCWeb, http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/ksgbm001.html



5.6 Bibliografía

- [1] Norma Oficial Mexicana, “NOM-001-SEDE-2005 Instalaciones Eléctricas (utilización)”. Secretaría de Energía. pp. 13-15.
- [2] Tarifa 1A, Pruebas realizadas en los meses Febrero y Marzo 2008, <http://www.cfe.gob.mx/es/InformacionAlCliente/conocetutarifa/>
- [3] Especificación para servicio monofásico con carga hasta 5kW en Baja Tensión Área Urbana, Red Aérea y Red Subterránea Comisión Federal de Electricidad. pp.2