

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE UN EQUIPO DE COMUNICACIÓN UTILIZANDO LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DOMÉSTICA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Ángel Kamt Marconi

ASESOR: Ing. Angelo Velarde Criado

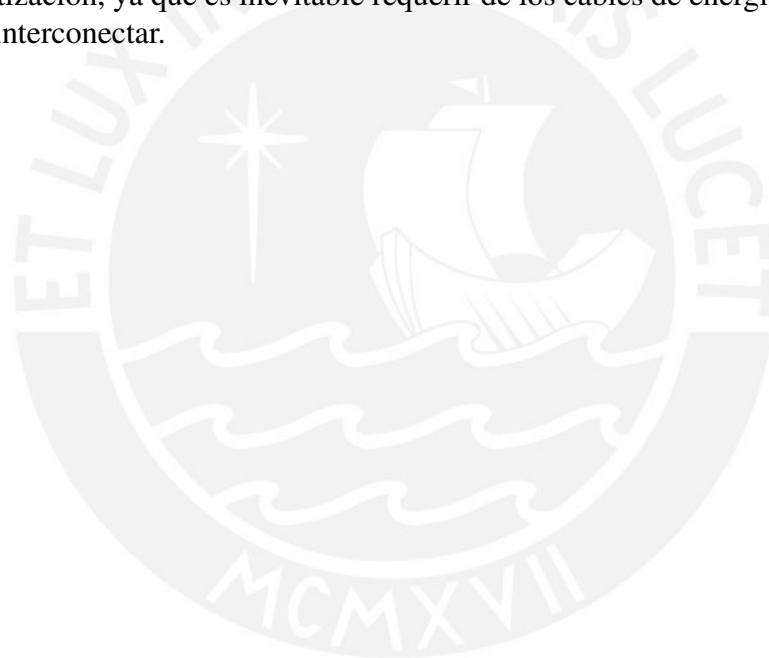
Lima, Noviembre de 2011

Resumen

En el presente proyecto de tesis se realiza el diseño de un equipo de comunicación empleando las líneas eléctricas domésticas como canal. Se optó por el uso de las líneas eléctricas debido a que reúnen las ventajas de los medios inalámbricos (ausencia de cableado adicional, omnipresencia de la red) y de los medios cableados (seguridad ante interceptación de señales, confiabilidad, no saturación del espectro electromagnético).

Para lograr los objetivos de esta tesis, se realizó un análisis del estado de las tecnologías actuales para establecer los criterios de selección de fabricantes. A partir de la selección de los fabricantes, se realizó el diseño de la estructura electrónica del equipo y las posteriores pruebas de funcionamiento.

El equipo de bajo costo obtenido y las pruebas realizadas demuestran que esta tecnología es la más adecuada para una solución libre de cables para una red de control y automatización, ya que es inevitable requerir de los cables de energía para los dispositivos a interconectar.



Índice General

Índice de Imágenes	III
Índice de Tablas	IV
Introducción	1
1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA AUTOMATIZACIÓN DOMÉSTICA	2
1.1. Identificación del entorno	2
1.2. Definición del problema	3
2. ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN	4
2.1. Hipótesis de solución	4
2.2. Análisis de las tecnologías PLC de banda angosta	5
2.2.1. Estandarización	5
2.2.2. Mercado actual	7
3. DISEÑO DEL EQUIPO DE COMUNICACIÓN	9
3.1. Introducción	9
3.2. Objetivos y Alcance del Proyecto	9
3.3. Criterios de Diseño y Selección de Componentes	10
3.3.1. Microcontrolador	10
3.3.2. Modulación de datos	11
3.3.3. Acondicionamiento de la señal	14
3.3.4. Dimensionamiento de fuente	19
3.3.5. Protección de los circuitos	21
3.3.6. Consideraciones térmicas	22
3.3.7. Consideraciones mecánicas	23
3.3.8. Recomendaciones de los fabricantes	23
3.4. Datos basados en mediciones y normas	24
3.4.1. Atenuación debida a la distancia de transmisión	24
3.4.2. Atenuación debida a equipos eléctricos	24
3.4.3. Influencia de la bifurcación de las líneas	24
3.4.4. Emisiones electromagnéticas	25
3.4.5. Distorsión armónica en la línea eléctrica	26
3.5. Software	26
3.5.1. Estructura del protocolo de comunicación	26

3.5.2. Algoritmo de interacción	27
3.5.3. Pruebas	29
4. RESULTADOS	32
4.1. Modem PLC de Banda Angosta	32
4.2. Comunicación entre equipos	34
4.3. Costos de Fabricación	36
Conclusiones	38
Recomendaciones	39
Bibliografía	40
Anexos	42



Índice de Imágenes

3.1. Diagrama de bloques de la solución propuesta	9
3.2. Diagrama de bloques del MAX2990 [1]	11
3.3. Diagrama de bloques del MAX2991 [2]	13
3.4. Diagrama de bloques del acondicionamiento de la señal	14
3.5. Circuito de acople a la línea eléctrica	15
3.6. Amplificador inversor de voltaje simétrico	16
3.7. Amplificador de corriente bidireccional [3]	17
3.8. Esquema del habilitador de transmisión sobre las dos líneas de dife- renciales	18
3.9. Diagrama de bloques de la fuente de alimentación	20
3.10. Circuitos de protección eléctrica	22
3.11. <i>Outlet box</i> , dimensiones de referencia	23
3.12. Formato de trama de datos	27
3.13. Diagrama de flujo de la rutina principal	28
3.14. Diagrama de flujo de la sub-rutina MAC_Tx	28
3.15. Diagrama de flujo de la sub-rutina PHY_Tx	29
3.16. Diagrama de flujo de la sub-rutina PHY_Rx	30
3.17. Diagrama de flujo de la sub-rutina MAC_Rx	30
3.18. Esquema del <i>set-up</i> para la prueba de comunicación	31
4.1. Capa de cobre superior del Modem (Escala 1:1)	32
4.2. Capa de componentes superior del Modem (Escala 1:1)	32
4.3. Capa de cobre posterior del Modem (Escala 1:1)	33
4.4. Capa de componentes posterior del Modem (Escala 1:1)	33
4.5. Capa de cobre única de la fuente de alimentación (Escala 1:1)	33
4.6. Capa de componentes de la fuente de alimentación (Escala 1:1)	33
4.7. Estado de las transmisiones en modo Normal vistas desde el terminal .	34
4.8. Estado de las transmisiones en modo Robusto vistas desde el terminal	34
4.9. Espectrograma de la señal transmitida y señal de <i>acknowledge</i>	35

Índice de Tablas

2.1. Caracterización de los Sistemas PLC [4]	6
2.2. Precio de equipos en el mercado	7
3.1. Comparación entre soluciones de banda angosta disponibles en el mercado [5]	10
3.2. Bandas compatibles con el MAX2990 [1]	12
3.3. Parámetros de la señal de salida del OpAmp	16
3.4. Parámetros deseados del OpAmp	17
3.5. Consumo estimado del circuito [1, 2]	19
3.6. Atenuación de los principales equipos eléctricos en una red [6]	25
4.1. Resumen de especificaciones técnicas del equipo	32
4.2. Costos de fabricación del modem	36
4.3. Costos de fabricación de la fuente	37



INTRODUCCIÓN

La automatización no es la principal característica de la mayoría de instalaciones domésticas en el Perú y esto se debe fundamentalmente a que las diferentes tecnologías disponibles no brindan soluciones al alcance de la economía del público. Además, a diferencia de las tecnologías de información (Internet, telefonía móvil, televisión, entre otros) que llegaron al mercado a facilitar el acceso del público a la información, las tecnologías de automatización no se han difundido ni han dado a conocer los beneficios de poder tener al alcance de la mano el control y monitoreo de la casa.

Esta investigación propone el uso de las redes eléctricas como canal de comunicación entre dispositivos de control y automatización doméstica, de manera que se reduzcan al mínimo los gastos de instalación (el sistema eléctrico ya existe en toda edificación) y los gastos de fabricación (equipos de bajo costo), con una solución confiable y robusta que permita brindar al público la información, el control y el monitoreo de su casa de manera práctica y económica respecto a otras soluciones.

En el primer capítulo de este documento se analiza el entorno de la automatización doméstica actual en el mundo, resaltando la situación del Perú y la opinión y nivel de conocimiento de la gente acerca de estas tecnologías.

En el segundo capítulo se fundamenta la elección de la comunicación a través de las líneas eléctricas como solución al problema y se hace un análisis de las tecnologías y los estándares afines. Asimismo, se realiza una comparación cualitativa y económica entre las soluciones ya existentes en el mercado.

En el tercer capítulo se plantea el alcance final del proyecto y se describen los criterios considerados para el diseño de la solución planteada. De igual manera, se describe la estructura y la forma de interacción que habrá entre los equipos de comunicación dentro de la red eléctrica y las pruebas realizadas.

En el cuarto capítulo se mostrarán los resultados en el diseño del hardware, las pruebas de software realizadas y el análisis de costos de fabricación y las implicancias durante la adquisición de materiales y búsqueda de proveedores.

Finalmente, se mencionan las conclusiones obtenidas mediante esta investigación y las recomendaciones que surgieron a partir del diseño de la solución.

1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA AUTOMATIZACIÓN DOMÉSTICA

1.1. Identificación del entorno

La automatización se aplica en las edificaciones desde hace varias décadas en el mundo. Existen decenas de protocolos de comunicación y medios por los cuales se transmiten las señales de control en un sistema domótico. Sin embargo, no existe una tecnología por excelencia para estas aplicaciones.

Dentro de las principales aplicaciones de las redes domóticas se encuentran la iluminación automatizada, el control de temperatura y aire acondicionado, la seguridad, multimedia, monitoreo energético, entre otras.

Actualmente, en el Perú, la automatización doméstica no está difundida en la mayoría de las instalaciones o construcciones. Intuitivamente se puede afirmar que como nunca ha existido la automatización doméstica (en décadas pasadas), actualmente la situación sigue igual. Para obtener una mejor idea de cuál es la opinión y el nivel de conocimiento de la gente respecto a las tecnologías domóticas se realizó una encuesta [7].

La encuesta fue realizada a un promedio de 150 personas, en su mayoría adulta (entre 18 y 50 años) y con estudios superiores. La mayor parte de las personas afirmaron que poseen un conocimiento regular o casi nulo acerca de tecnologías domóticas. Los demás resultados de opinión indicaron lo siguiente:

- La principal razón para automatizar la casa:
 - Ahorro de energía (50 %)
 - Ahorro de tiempo (18 %)
 - Comodidad (28 %)
 - Otros (4 %)

- La principal razón para tener el mando y monitoreo remoto en casa:
 - Tener el control total (16 %)
 - No dejar la casa sola (46 %)
 - Hacer varias cosas en menos tiempo (35 %)
 - Otros (3 %)

- El principal motivo de la ausencia de automatización doméstica en el Perú:
 - Desconocimiento de los beneficios (54 %)
 - Sistemas muy caros (39 %)
 - No existe la necesidad (2 %)
 - Otros (5 %)

Se puede, entonces, identificar el concepto que tiene la gente acerca de estas tecnologías. En general, se puede destacar su preocupación acerca de la seguridad y el ahorro, a pesar de no reconocer mayores beneficios.

1.2. Definición del problema

Los sistemas de control actuales permiten realizar una gran variedad de aplicaciones que mejoran la calidad de vida de los usuarios, pero éstos requieren de una red que sirva de medio o canal de comunicación. La factibilidad de implementación de una red de datos y control para el sistema de automatización en un edificio depende de la disponibilidad de vías para cableado, de la ubicación de los equipos a integrar y de la extensión del lugar.

Actualmente en el Perú se implementa la automatización en las construcciones más recientes. Esto implica cumplir con ciertos criterios de diseño que frecuentemente no se toman en cuenta al concebir un proyecto de construcción civil. Usualmente se tiene una edificación concluida antes de plantear la instalación de un sistema domótico. Implementar la automatización en una casa o edificio ya construido implica la mayoría de veces una modificación en la infraestructura, lo cual supera muchas veces el costo del sistema propio.

Existen sistemas de transmisión de datos que permiten implementar una red sin modificar la infraestructura, y la mayoría de ellos son inalámbricos. Existen diversas tecnologías de comunicación inalámbrica de bajo consumo y bajo costo que se pueden aplicar a la automatización. Finalmente, se puede implementar esa red de comunicación inalámbrica para evitar los cables. Pero sea cual sea el dispositivo al cual se conectarán, ese dispositivo requerirá cableado de energía.

2. ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN

2.1. Hipótesis de solución

Para implementar una red de control basada en sensores, actuadores, consolas de monitoreo, terminales de administración y otros componentes, se requiere de un medio de comunicación. Si el principal obstáculo para automatizar un inmueble es el costo elevado de los dispositivos y la instalación (según lo visto en la sección 1.2), entonces se requiere una solución que reduzca esos gastos y permita tener un sistema tan confiable como los ya existentes.

Se propone, entonces, aprovechar el sistema eléctrico de una edificación para obtener una infraestructura de comunicación, aprovechando las ventajas tanto de un sistema inalámbrico (señal omnipresente, ausencia de cableado adicional) como de los sistemas cableados (seguridad, no saturación del espectro electromagnético). Esta tecnología se conoce como PLC (*Power-Line Communications*).

La particularidad de la comunicación PLC, a diferencia de otras formas cableadas, está en la impedancia y las pérdidas en las líneas de transmisión, y en los niveles de ruido que fluctúan en mayor o menor medida dependiendo de cómo se han conectado los dispositivos a la red y de sus condiciones de operación. Para realizar una comunicación estable y de alta velocidad bajo tales condiciones, es necesario emplear alguna tecnología usada en las comunicaciones inalámbricas.[8] La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) es actualmente una forma de modulación muy empleada en las comunicaciones inalámbricas y que ha sido adquirida como estándar en la comunicación PLC por sus cualidades.

Las principales características de la tecnología OFDM son las siguientes: [9]

- Eficiencia en el uso de la frecuencia, ya que emplea portadoras ortogonales entre sí. Esto significa que las señales periódicas empleadas son armónicas (múltiplos) de una fundamental. Esto evita el empleo de bandas de guarda entre portadoras. En consecuencia, se pueden “comprimir” en un mismo rango de frecuencias varios tonos o portadoras de información.
- La transmisión de varias frecuencias en paralelo permite transmitir mayor cantidad de datos en menos tiempo. Esto significa **mayor velocidad** de transmisión.
- **Evita la interferencia** intersímbolo (ISI) debida a la multipropagación de la señal, ya que al transmitir los datos en forma paralela, permite períodos más largos entre símbolos.

- Emplear varias portadoras de forma simultánea disminuye las probabilidades de error debidas al ruido en el canal, lo cual la hace una tecnología **bastante robusta** frente a medios hostiles como las líneas eléctricas.

2.2. Análisis de las tecnologías PLC de banda angosta

Actualmente, la red eléctrica ya se usa como medio de comunicación en diversos estándares para domótica (KNX, LonWorks, X10, EIB, entre otros). La principal ventaja del PLC es que no emplea cableado adicional para formar la red, sino que aprovecha el tendido eléctrico de todo inmueble para transportar datos a través de ellos, y así intercomunicar equipos. Esto, en consecuencia, trae consigo la ventaja de tener una red presente en todo el inmueble (asumiendo que todo está electrificado).

Dentro de la red eléctrica, al igual que en el espectro electromagnético, se puede emplear un gran rango de frecuencias para las señales (desde los Hz hasta los MHz). Debido a que la longitud de onda de una señal es inversamente proporcional a su frecuencia, y la velocidad de los datos son directamente proporcionales a la frecuencia de la señal, entonces existe un compromiso entre el alcance (distancia) de una transmisión y la velocidad de la misma.

Para las aplicaciones en las que se centra la domótica (control, automatización, monitoreo de parámetros de consumo energético, etc.), la tasa de datos requerida no es tan elevada (a diferencia de la Internet o multimedia). En la tabla 2.1 se resumen las principales tecnologías aplicadas a la comunicación PLC.

2.2.1. Estandarización

La demanda actual de equipos de comunicación PLC está dada principalmente para aplicaciones de banda ancha porque permite el acceso a Internet en zonas de difícil acceso y es una opción alternativa a las redes inalámbricas y con resultados muy óptimos. Es por eso que, a pesar de ser una tecnología más compleja, las diversas entidades se han preocupado principalmente en la estandarización de la banda ancha sobre línea eléctrica (BPL)[10]. Sin embargo, las recientes tendencias de las industrias y los gobiernos hacia la eficiencia energética, la cogeneración y la creciente aparición de automóviles eléctricos comerciales, han creado la necesidad de establecer cierto grado de “inteligencia” en la red eléctrica, una cualidad que le permita a una empresa eléctrica monitorear y controlar los diversos eventos que ocurren en cada punto de su red, facturar de manera automatizada, etc. A esta nueva tendencia se le conoce como *Smart Grid* [11].

La *Smart Grid* apunta al control de carga para la eficiencia energética de una ciudad

Tabla 2.1: Caracterización de los Sistemas PLC [4]

	Banda Angosta - Baja Velocidad	Banda Angosta - Alta Velocidad	Banda Ancha
Rango de Frecuencias	9 a 148,5 kHz	Banda A 9 a 500kHz; Banda B 9 a 95kHz; Banda BCD 95 a 125kHz; Otras Bandas 95 a 148,5kHz	1,5 a 50MHz
Velocidad de Datos	≤ 10kbps	50kbps ≤ ... ≤ 1Mbps	≤ 10Mbps
Tecnología	FSK, BPSK, FFH, SFSK, DCSK	OFDM, MCM	MCM/COFDM, Bit loading
Corrección de errores (FEC)	Ninguna o baja	Alta (diseñado para alta confiabilidad)	Media (diseñado para alta velocidad)
Aplicaciones	Medición eléctrica automatizada (AMR), Bus EIB, <i>PowerLine Area Network</i>	Señalización de campos de aviación, Gestión energética, <i>Smart grids</i>	Telecomunicaciones <i>Last-mile</i> , VoIP, HDTV
Compañías / Organizaciones	Busch Jaeger, Echelon, Görlitz, Ytran, Renesas AMI Solutions, Landis+Gyr	ADD Group, iAd, Maxim, PRIME (STMicroelectronics, Usyscom, ZIV, etc.)	Amperion, Current, DS2, Homeplug, Mitsubishi, OPERA, Panasonic, Spidcom

y al monitoreo remoto de la energía. Ambas aplicaciones no requieren de un ancho de banda extremadamente grande y requieren de un área de cobertura mayor. Es por eso que las tecnologías de banda angosta sobre línea eléctrica han venido desarrollándose en los últimos dos años, por su robustez, gran alcance y velocidad adecuada para estas aplicaciones.

Los principales estándares para la comunicación PLC de banda angosta son el PRIME (surgido en España por Iberdrola¹) y el G3-PLC (surgido en Francia por ERDF²). La diferencia mas importante entre ambos es que el estándar PRIME fue inicialmente concebido para redes de baja tensión y bajo ruido, por lo que tiene una tasa de datos mayor. En cambio, el G3-PLC fue concebido para redes de media tensión de mayor ruido, por lo que se requería mayor robustez y, por lo tanto, se obtenía una menor tasa de datos.

Ambos estándares fueron cedidos a diferentes empresas y fabricantes para su desarrollo e implementación. Actualmente, ambos estándares son abiertos y brindan todas sus especificaciones para el desarrollo de soluciones para *Smart Grids*.

El desarrollo de circuitos integrados y protocolos para redes PLC de banda angosta ha crecido en el último año. Esto refleja el aumento de la demanda y la proyección a futuro de los fabricantes de equipos. En vista de esto, el IEEE anunció el inicio del planteamiento de un nuevo estándar para comunicación PLC de banda angosta (P1901.2).

¹www.iberdrola.es

²www.erdfdistribution.fr

Este estándar se centra en las comunicaciones a través de la línea eléctrica para baja frecuencia (menos de 500kHz) en interiores, exteriores y zonas rurales en media y baja tensión. Las tasas de datos pueden alcanzar los 500kbps, dependiendo de la aplicación. Se contempla la medición eléctrica automatizada (AMR/AMI), la recarga de vehículos eléctricos y las redes locales domésticas (HAN).

El enfoque principal de este estándar es el uso eficiente y balanceado del canal de comunicaciones (la línea eléctrica) de todos los dispositivos existentes, definiendo mecanismos detallados que permitan la coexistencia de los diferentes estándares de PLC Banda Angosta. Específicamente, se define la capa Física y la subcapa de control de acceso al medio de la capa Enlace, según la norma ISO y el modelo OSI.

Este estándar pretende unificar y encontrar puntos en común con los estándares ya existentes o en pleno desarrollo (PRIME, G3-PLC) para hacer de la red PLC un medio flexible, escalable y compatible con la mayoría de los fabricantes de equipos.

Actualmente se tiene definido todo el alcance del estándar, pero aún no se ha publicado oficialmente [12].

2.2.2. Mercado actual

Durante varios años se dejó de lado la investigación y el desarrollo de estas tecnologías debido a que se creían inviables y poco robustas frente a un canal tan ruidoso como la línea eléctrica. Sin embargo, las nuevas investigaciones sobre métodos matemáticos aplicados a las comunicaciones, nuevos protocolos de comunicación y nuevos avances en el desarrollo de semiconductores han hecho que los diversos fabricantes alrededor del mundo lleven al mercado nuevas soluciones [13].

Sin embargo, de manera comercial no se han encontrado soluciones PLC de banda angosta para control doméstico, industrial o *Smart Grids*. En la tabla 2.2 se muestra una comparación de precios y aplicaciones de equipos disponibles en el mercado. Hasta la fecha, existe cierta dificultad para obtener precios de mercado debido a que no están abiertos al público en general, solamente a empresas desarrolladoras de equipos de domótica y telemedición de energía eléctrica.

Tabla 2.2: Precio de equipos en el mercado

Marca	Modelo	Aplicación	Precio (US\$)
Panasonic	BL-PA300A	Internet de banda ancha	48
Sharp	HNVA401SU	Internet de banda ancha	42
Echelon	75021R	Interfaz USB - Línea Eléctrica (sin acople)	160

Este es el final de la primera etapa del diseño de una solución. Una vez elegida la tecnología de base, se iniciará la investigación y el desarrollo del equipo a la medida de la necesidad planteada.



3. DISEÑO DEL EQUIPO DE COMUNICACIÓN

3.1. Introducción

El equipo de comunicación está basado en la tecnología PLC. Este capítulo se centrará en la estructura del sistema y en todas las consideraciones que se han tomado en cuenta para obtener el producto final. La solución propuesta en la figura 3.1 será la base para lo que se mencionará a continuación.

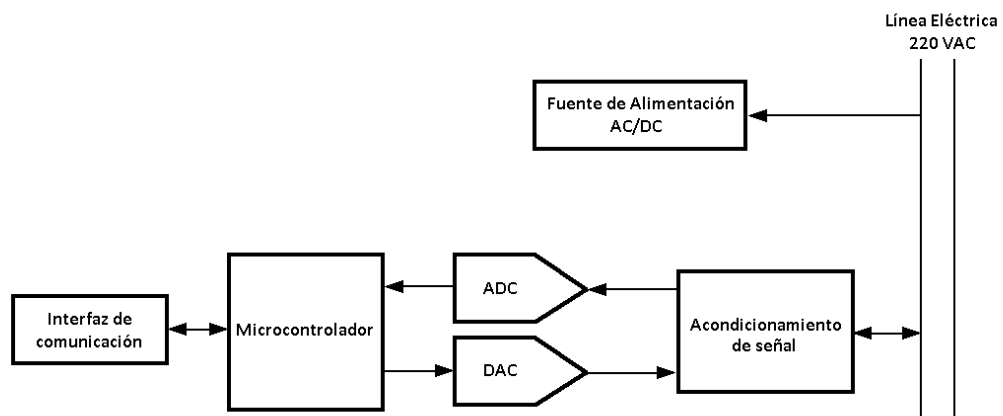


Fig. 3.1: Diagrama de bloques de la solución propuesta

3.2. Objetivos y Alcance del Proyecto

El objetivo principal de esta tesis es obtener el diseño de circuito que permita la comunicación a través de la línea eléctrica. Se entiende, entonces, que el equipo debe contar con periféricos de comunicación en ambos sentidos, que le permitan actuar como interfaz entre un dispositivo externo y la línea eléctrica como canal. Por la aplicación (control y automatización) y la menor complejidad en los protocolos de comunicación, se empleará la comunicación de banda angosta.

El circuito debe alimentarse de la misma línea eléctrica. Debido a que estos trabajan comúnmente en niveles de 3, 5 ó 12V, el requerimiento es un convertor AC/DC de 220VAC a un estimado de 12VDC. Si se toma en cuenta que el equipo completo no debe ocupar un espacio tan grande que no le permita adaptarse a la mayoría de instalaciones, se requiere, entonces, de una fuente de alimentación que cumpla con esos requerimientos de voltaje de entrada y salida, con la potencia adecuada (calculada en la sección 3.3.4) y de volumen reducido. La solución adecuada en este caso es el uso de una fuente conmutada (*switching*) que permitirá la reducción de la tensión de línea con mayor eficiencia y en un significativamente menor espacio.

El alcance del proyecto es, entonces, diseñar completamente el circuito de comunicación PLC y el de la fuente *switching*, cada uno en un área menor a 35 cm² (justificado en la sección 3.3.7).

3.3. Criterios de Diseño y Selección de Componentes

Esta sección presenta un conjunto de consideraciones que se han tomado en cuenta para el diseño del equipo de comunicación y la selección de los componentes electrónicos que lo conformarán.

3.3.1. Microcontrolador

El requerimiento principal es el de un circuito integrado con la capacidad computacional suficiente como para soportar las aplicaciones domésticas junto a la comunicación PLC. Es evidente que en el mercado existe una gran variedad de microcontroladores de propósito general y específico que podrían brindar una solución al problema. Entonces, el primer filtro de selección es el de los microcontroladores que ya integran la tecnología PLC, puesto que ello permitirá reducir el espacio y costos (menos componentes) y reducirá la complejidad de la solución.

En la tabla 3.1 se muestra el resumen de la comparación entre las diferentes soluciones ofrecidas en el mercado al inicio de esta investigación³. Cabe resaltar que, desde entonces, la disponibilidad de información ha incrementado considerablemente por el creciente desarrollo de tecnologías para redes eléctricas inteligentes (*Smart Grids*), dentro de las cuales, la domótica está incluida como parte de la integración de las redes [11].

Tabla 3.1: Comparación entre soluciones de banda angosta disponibles en el mercado [5]

Fabricante	Modelo	Modulación	Componentes externos necesarios	Disponibilidad de información
Atheros (Intellon)	INT5500/ INT1200	FSK	Circuitería de acople	Restringida a fabricantes autorizados
ST Microelectronics	ST7540, ST7538	FSK	Circuitería de acople	Hojas de datos
Echelon	PL3120, PL3150, PL3170	FSK	Circuitería de acople	Restringida a fabricantes autorizados
Maxim	MAX2990/ MAX2991	OFDM	Circuitería de acople	Hojas de datos, manual de programación, kit de evaluación y muestras gratuitas

De los cuatro fabricantes (en aquel entonces) disponibles, se eligió a Maxim Integrated Products por las siguientes razones:

³Inicio de la investigación: Segundo semestre del 2010

1. Brindaba mayor cantidad de información y facilidades para el desarrollo de equipos con sus productos, a diferencia de Atheros o Echelon.
2. En un año había llevado al mercado soluciones de última generación (tecnología OFDM sobre la red eléctrica), a diferencia de ST Microelectronics que mantenía el mismo producto desde el año 2006.
3. Permitía proyectar los desarrollos hacia aplicaciones a futuro, ya que estaba previsto que Maxim desarrollaría las soluciones basadas en el estándar G3-PLC⁴, que hoy ya se tiene disponible.

3.3.2. Modulación de datos

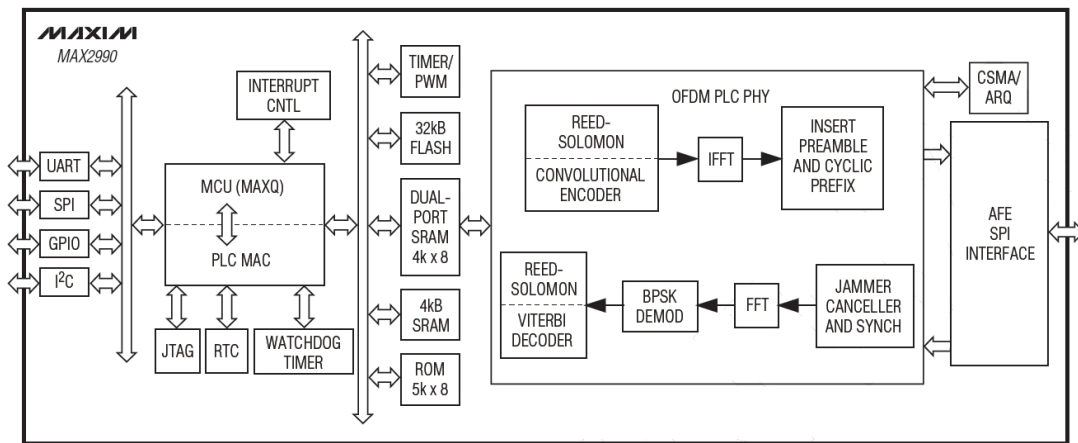


Fig. 3.2: Diagrama de bloques del MAX2990 [1]

La presente solución está basada en un microcontrolador de la familia MaximTM. El **MAX2990** es un circuito integrado cuyo principal periférico es un modem PLC. Combina tanto la capa física (PHY) como la capa de enlace y control de acceso al medio (MAC) en un controlador de 16 bits de arquitectura MAXQ (RISC).

El microcontrolador MAX2990 presenta una solución PLC que codifica y decodifica datos en un rango de 10kHz a 490kHz utilizando técnicas de modulación OFDM con saltos binarios de fase (BPSK). Cada portadora transmite individualmente a una tasa relativamente baja, logrando mayor confiabilidad. Todas las portadoras transmitidas en conjunto logran un *throughput* de aproximadamente 100kbps. La comunicación en el MAX2990 es *half-duplex* (turnos individuales para transmisión o recepción, no simultáneas).

El MAX2990 puede operar (de forma configurable) con las bandas compatibles con los estándares CENELEC, FCC y ARIB (ver tabla 3.2).

⁴Nota de prensa en: http://www.maxim-ic.com/company/newsroom/pr_products/show.mvp/npk/1353

Tabla 3.2: Bandas compatibles con el MAX2990 [1]

Norma	Origen	Banda (kHz)
CENELEC A	Europa	10 - 95
CENELEC B	Europa	95 - 120
CENELEC C	Europa	120 - 140
FCC	EE.UU.	10 - 490
ARIB	Japón	10 - 450

Dentro de las características particulares más importantes del MAX2990 se pueden mencionar [1]:

- Mecanismo de corrección de errores hacia adelante (FEC), incluyendo bits de redundancia en la transmisión.
- Mecanismo de comprobación de redundancia cíclica (CRC-16, CRC-32), efectivo para la detección de errores ocasionados por el ruido del canal.
- Cancelación de interferencia de señales sinusoidales.
- Encriptación de datos estándar (DES) embebido en hardware.
- Acceso múltiple por detección de portadora (CSMA) con evasión de colisiones (CSMA/CA), ya que se trabaja con un medio con características similares al medio inalámbrico.
- Solicitudes automáticas de retransmisión (ARQ) al detectar paquetes erróneos.
- 4 puertos de propósito general y puertos de comunicación serial UART, SPI e I²C.
- Programación vía JTAG.

Básicamente, la función del periférico PLC del MAX2990 (ver bloque “OFDM PLC PHY” de la figura 3.2) consiste en codificar los bloques de información a transmitir de forma que se distribuyan entre las portadoras de una banda para un instante dado. Esta información se transmite de forma serial mediante líneas de datos hacia el bloque externo DAC. De forma análoga, las señales digitales provenientes del bloque externo ADC se reciben de forma serial. El periférico PLC se encargará de identificar cada portadora y decodificar la información.

El MAX2990 se alimenta típicamente con 1,8V en su núcleo (procesador de bajo consumo) y con 3,3V en sus periféricos (para compatibilidad con otros dispositivos), es decir, requiere de ambos niveles para su funcionamiento. Las especificaciones completas del MAX2990 se pueden encontrar en el Anexo B.

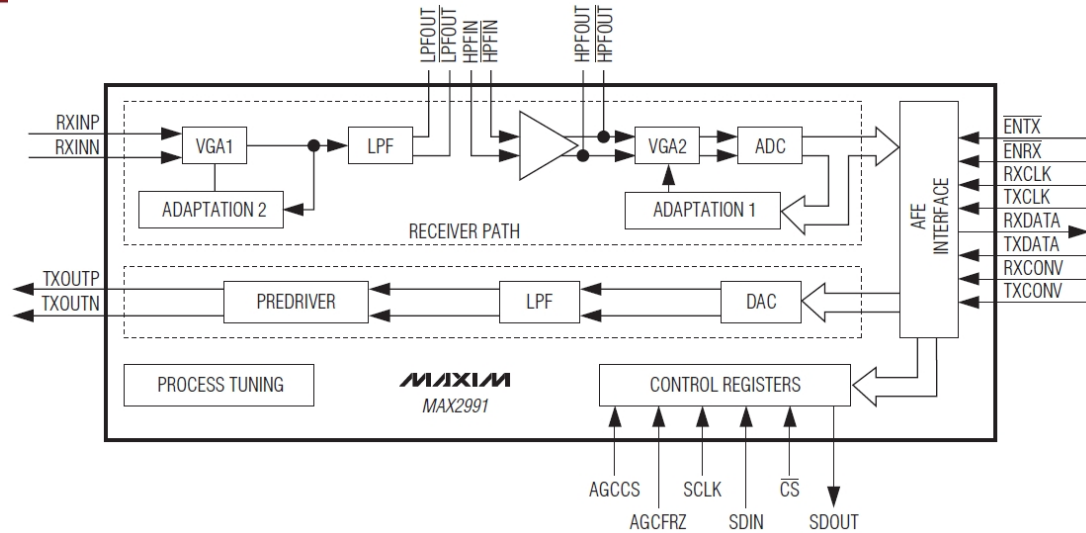


Fig. 3.3: Diagrama de bloques del MAX2991 [2]

El MAX2990 está diseñado para trabajar junto a otro circuito integrado que tiene la función de convertir las señales digitales transmitidas en señales analógicas y viceversa. Es decir, los bloques externos ADC y DAC de la solución propuesta están incluidos dentro de un mismo circuito integrado del mismo fabricante: el **MAX2991**.

El MAX2991 (ver figura 3.3) es el *front-end* del sistema PLC encargado de la transmisión y recepción de las señales analógicas que viajarán por la línea eléctrica. Entre sus principales características se encuentran [2]:

- Ruta de Recepción
 - Filtro selector de banda integrado
 - Control de ganancia automática
 - 10 bits de resolución de ADC
- Ruta de Transmisión
 - Filtro conformador de onda
 - Etapa preamplificadora programable
 - 10 bits de resolución de DAC
 - Rango dinámico de 60dB
- Tasa de muestreo máxima de 1,2 Msps
- Señales diferenciales tanto en transmisión como en recepción

En conjunto, el MAX2990 y el MAX2991 conforman un sistema de modulación OFDM de banda angosta (10 - 490kHz) de bajo costo en el que puede implementarse directamente alguna aplicación (dentro del microcontrolador) y con capacidad de comunicación serial o paralela para su integración con distintos dispositivos o sistemas, ya sean sensores, actuadores o plataformas de gestión de datos.

Se trabajará con la banda del FCC que permite un mayor *throughput*, ya que los estándares del FCC son típicamente aceptados en el Perú y no existen restricciones respecto al uso de estas frecuencias para comunicación PLC. Otros criterios respecto al uso de las frecuencias se mencionan en la sección 3.4.

3.3.3. Acondicionamiento de la señal

En esta sección se describen los criterios considerados para el acondicionamiento de las señales transmitidas y recibidas a la línea eléctrica y los circuitos obtenidos en cada etapa.

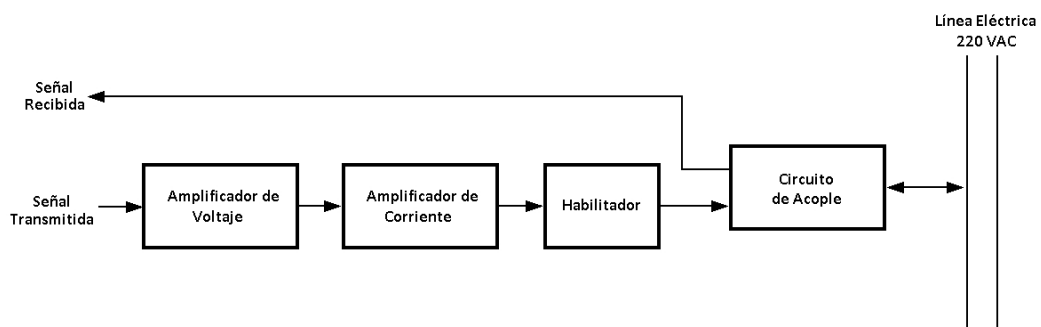


Fig. 3.4: Diagrama de bloques del acondicionamiento de la señal

A continuación se describen las etapas vistas en la figura 3.4:

- Acoplamiento a la red eléctrica

El primer paso para diseñar un circuito de acople es determinar el valor mínimo de la impedancia de la línea eléctrica. Según los resultados de [14] y [15], se puede generalizar una impedancia de la línea eléctrica entre 1Ω y $1k\Omega$. Para el acoplo de la señal se emplea típicamente un transformador de alta frecuencia.

En la sección 3.3.8 se indican los parámetros del transformador de acoplo recomendados por el fabricante. Además del transformador, es necesario emplear condensadores no polarizados que actúen como una alta impedancia para la señal de 220V/60Hz pero como una pequeña impedancia para la señal de 10 a 490 kHz. Estos condensadores se ubicarán en ambas líneas diferenciales del transmisor/receptor, en el lado primario y en el secundario del transformador.

Se calcula un valor de $1\mu\text{F}$, adecuado para el requerimiento antes mencionado. En la figura 3.5 se muestra el resultado del circuito. Este valor calculado corresponde a los 4 condensadores. Debe tomarse en cuenta que el voltaje máximo soportado debe ser superior a 110V (dos condensadores en serie a la línea de 220VAC).

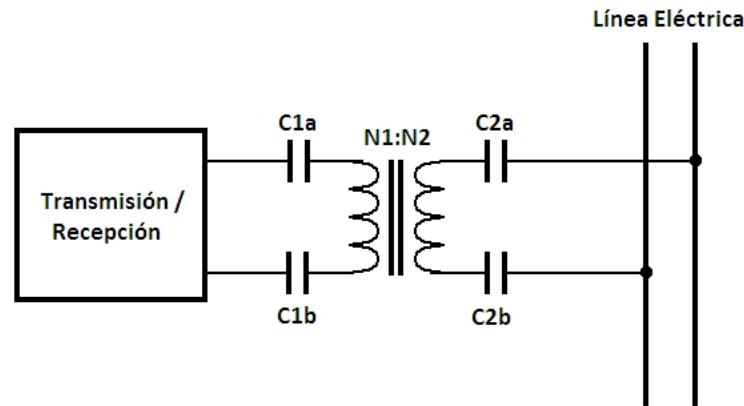


Fig. 3.5: Circuito de acople a la línea eléctrica

■ Transmisión

Amplificador de Voltaje.-

De [2] se obtienen las características de las señales que se transmitirán desde el MAX2991. Se sabe que el sistema trabaja con señales diferenciales, es decir, dos señales invertidas respecto a una referencia de **1,5V**. A una ganancia de **0dB** (por defecto) se obtiene una amplitud de señal de aproximadamente $0,7V_{p-p}$.

En [2, p. 20] se puede observar que el MAX2991 posee una etapa preamplificadora en el bloque de transmisión (ver figura 3.3). Este circuito permite una ganancia configurable de hasta **6dB** (el doble del voltaje). Esto significa una amplitud máxima de $1,5V_{p-p}$.

Se desea incluir una etapa de amplificación de voltaje para mejorar la señal de salida del transmisor. Por la simplicidad del diseño, se empleará un amplificador inversor en base a un OpAmp como el visto en la figura 3.6.

En la tabla 3.3 se resumen los parámetros de la señal amplificada deseada, asumiendo una fuente de alimentación de **12VDC**.

La ecuación de ganancia de voltaje del circuito de la figura 3.6 está dada por:

$$A_v = \frac{V_{OUT_{p-p}}}{V_{IN_{p-p}}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Para determinar la ganancia se considerará un voltaje máximo menor al voltaje de alimentación (12V). Para un voltaje de salida máximo de $11V_{p-p}$ y un voltaje

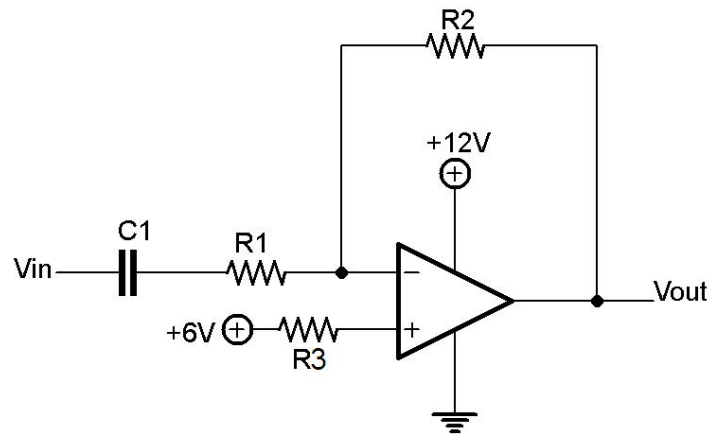


Fig. 3.6: Amplificador inversor de voltaje simétrico

Tabla 3.3: Parámetros de la señal de salida del OpAmp

	Parámetros de la señal		Valor	Unidades
1	Frecuencia máxima	f_{max}	490	kHz
2	Voltaje de referencia (<i>offset</i>)	V_{offset}	6	V
3	Voltaje pico a pico máximo	V_{maxp-p}	12	V

máximo de entrada de $1,5V_{p-p}$ se obtiene una ganancia de voltaje (en lazo cerrado) aproximada de **7,33 V/V**. Se tomarán en cuenta los OpAmps de voltaje de salida más cercano al de alimentación.

Para la selección del OpAmp adecuado se debe tomar en cuenta el valor pico de la señal de salida y la frecuencia máxima, con los cuales se halla la velocidad de respuesta o *slew rate*. Este valor de *slew rate* se obtendrá en base a los parámetros de la tabla 3.3, de donde se deduce que el voltaje pico máximo de la señal es **6V**.

Adicionalmente, una consideración importante para la selección del OpAmp es el producto ganancia-ancho de banda (GBP), constante que indica el balance entre ambos parámetros. Es decir, a mayor ganancia de lazo cerrado, menor ancho de banda posible, y viceversa [3, pp. 680-700].

Las resistencias R_1 y R_2 de la figura 3.6 deben cumplir con el parámetro 1 de la tabla 3.4. La resistencia R_3 debe tener un valor cercano a la resistencia equivalente en paralelo entre R_1 y R_2 , ya que su función es compensar los posibles efectos no deseados debidos a imperfecciones en el funcionamiento de los amplificadores operacionales reales (resistencia de balance) [3].

De acuerdo a los cálculos y criterios resumidos en la tabla 3.4, se seleccionará el OpAmp **TLE2142** de Texas InstrumentsTM, por cumplir adecuadamente con todos los parámetros buscados y por tener menor precio que otros OpAmps con similares características.

Amplificador de Corriente.-

Tabla 3.4: Parámetros deseados del OpAmp

	Parámetros del OpAmp	Ecuación	Valor	Unidades
1	Ganancia de voltaje en lazo cerrado	$A_{v(CL)} = \left \frac{V_{OUT_{p-p}}}{V_{IN_{p-p}}} \right = \left -\frac{R_2}{R_1} \right $	7,33	V/V
2	Ancho de banda mínimo	$BW = f_{max}$	500	kHz
3	Velocidad de respuesta mínima	$SR = 2\pi f \cdot V_P$	18,5	V/μs
4	Producto Ganancia-Ancho de banda mínimo	$GBP = BW \cdot A_{v(CL)}$	4	MHz

Se asume que la corriente de salida en cortocircuito de un amplificador operacional común es menor a 100mA. Una forma de obtener mas corriente de salida es con un amplificador de corriente, un transistor de potencia u otro dispositivo que tenga una ganancia de corriente y una limitacion de corriente mayor que la del amplificador operacional.

Una forma simple de obtener esa ganancia de corriente es empleando un transistor seguidor de emisor, y el OpAmp solo se encargará de proporcionar la corriente de base. Debido a que se está trabajando con una referencia de 6V y una onda que tiene valores por encima y por debajo de esta referencia, se debe tomar en cuenta la amplificación de corriente en ambos sentidos. Entonces se debe replicar el seguidor de emisor para obtener la ganancia de corriente también para valores debajo de 6V. [3, p. 799-801]

El circuito de acondicionamiento de la señal de transmisión se aprecia en la figura 3.7 para una sola línea.

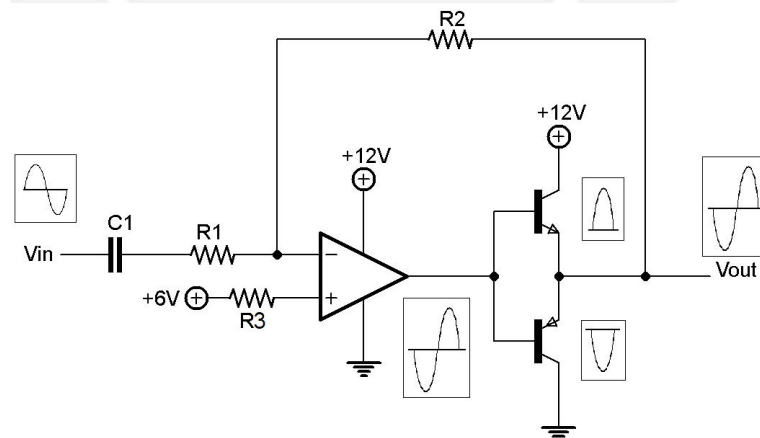


Fig. 3.7: Amplificador de corriente bidireccional [3]

Para la selección de los transistores, básicamente se requiere de dos BJT (bipolares) de la misma familia (para obtener parámetros idénticos) en tipo NPN y PNP. Estos deben superar los 500mA de corriente de colector y tener un ancho de banda mayor a 500kHz. Tomando el criterio del bajo costo, se eligió a los

transistores **PZT751** y **PZT651** de ON Semiconductor™.

Habilitador.-

A pesar de contar con un habilitador de transmisión y recepción en las líneas de datos entre el MAX2990 y MAX2991, el fabricante recomienda aislar ambas ramas del circuito durante la recepción de datos. Esto se debe a que los voltajes de salida de los amplificadores se pueden superponer a las señales que van a las entradas receptoras (tomando en cuenta que se emplea el mismo circuito de acople y el mismo canal de comunicación).

Para cumplir este requerimiento se emplean transistores tipo MOSFET de canal N en régimen de corte-saturación, ya que manejan una impedancia muy pequeña ($m\Omega$) durante la conducción, y prácticamente no requieren de corriente para saturarse, solo de un voltaje superior a su voltaje umbral en su entrada. Entonces, conmutar sus estados será sencillo con la pequeña señal digital de 3,3V de la línea habilitadora del MAX2990.

Se empleará el transistor **Si5468DC** del fabricante Vishay™. La configuración se muestra en la figura 3.8.

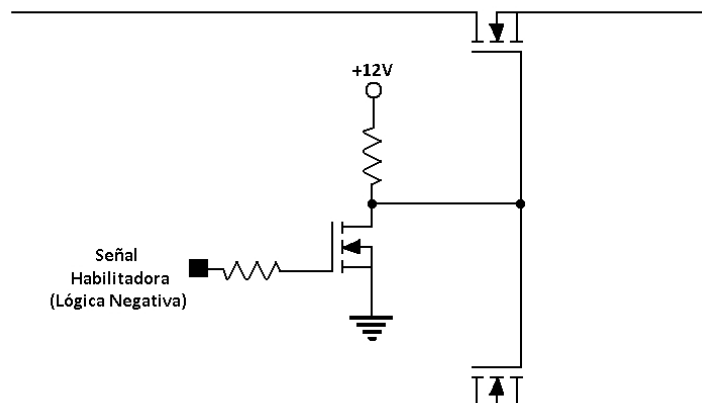


Fig. 3.8: Esquema del habilitador de transmisión sobre las dos líneas de diferenciales

■ Recepción

En la figura 3.3 se puede observar que el MAX2991 cuenta con bloques de ganancia automática y filtros integrados. La principal tarea del acondicionamiento de recepción es, entonces, limitar la amplitud de la señal de entrada proveniente del circuito de acople.

Según [2], la impedancia de entrada del receptor se puede modelar como una resistencia de 850Ω cuando sus bloques internos se encuentran en máxima ganancia. Asimismo, el rango dinámico del receptor es de 60dB. Esto significa que es sensible a variaciones de hasta 1000 veces la amplitud de la señal.

En la sección 3.3.5 se sabe que la señal recibida estará limitada a un máximo de 30V de amplitud. Si se emplean resistencias de un valor cercano a la impedancia del receptor (una para cada línea), entonces llegará un tercio del voltaje de entrada. Esto significa que llegará un máximo de 10V a los pines de recepción del MAX2991. Esto limitará la corriente de entrada del receptor, que no debe superar los 15mA.

Es importante mencionar que ambos circuitos (de transmisión y recepción) se replican para acondicionar dos líneas, ya que se está trabajando con señales diferenciales. Ambas líneas se acoplan a cada polo de la línea eléctrica a través del transformador.

3.3.4. Dimensionamiento de fuente

En las secciones anteriores se identificaron los principales circuitos que conformarán el modem PLC. Estos requerirán de un máximo de 12V, que en algunos casos se utilizarán directamente (en el driver) y en otros se reducirán mediante reguladores lineales para obtener el valor requerido (en los circuitos integrados). En la tabla 3.5 se resumen los consumos de corriente máxima para cada etapa principal del modem.

Tabla 3.5: Consumo estimado del circuito [1, 2]

Etapas	Corriente máxima (mA)
MAX2990 (Periféricos I/O)	80
MAX2990 (Núcleo)	35
MAX2991	100
Driver	100
Reserva (circuitos externos)	200
TOTAL	515

Debe considerarse que para cada uno de los circuitos se tomó el caso de máximo consumo, es decir, el peor de los casos. Para el MAX2990 se consideró el caso de entrega máxima de corriente por sus puertos y de máxima capacidad computacional de su núcleo. En el MAX2991 se consideró el caso de transmisión continua y prolongada a máxima ganancia. En el driver se asumió la mínima impedancia de carga al mayor voltaje posible.

Para fines prácticos, se sabe que ninguno de estos casos ocurrirá de forma prolongada ni simultánea, pero es un criterio que se toma para evitar sobrecarga de la fuente. Por lo tanto, se estima que la fuente de alimentación debe entregar un máximo de **500mA a 12V**, que serán suficientes para la correcta alimentación de todo el circuito.

Un requerimiento importante para el diseño de este modem es el tamaño total de circuito, que incluye también esta fuente de alimentación. Para solucionar este problema se empleará una fuente conmutada (*switching*) de tipo *flyback*. Al emplear semiconductores de potencia en el régimen de corte-saturación, permite conmutar una señal

DC a alta frecuencia para reducirla mediante un transformador de pequeño volumen y alto ancho de banda en su núcleo (ferrita). Esto favorece al diseño en términos de tamaño y eficiencia de la fuente. [16, p. 601-636]

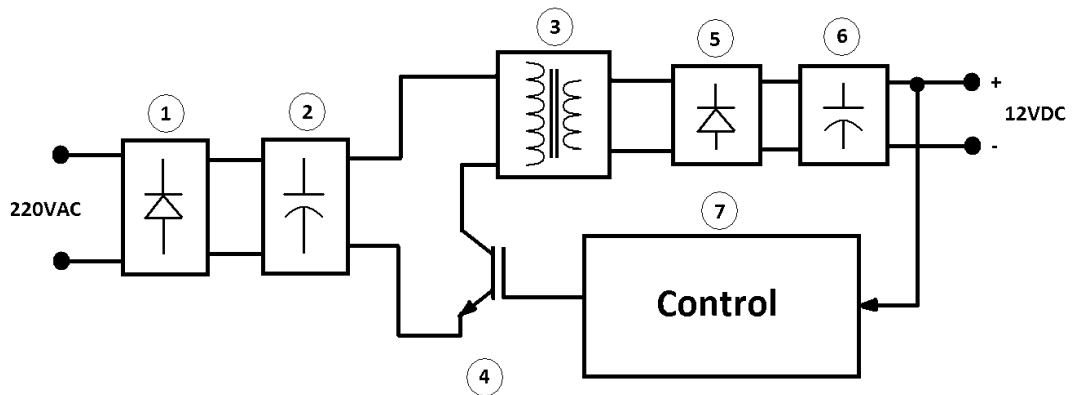


Fig. 3.9: Diagrama de bloques de la fuente de alimentación

El fabricante Power Integrations™ ofrece una solución para fuentes tipo *flyback* con pocos componentes y a bajo costo [17]. En la figura 3.9 se aprecian las etapas que conformarán la fuente de alimentación. El funcionamiento de cada bloque se detalla a continuación:

1. Etapas de rectificación de entrada.- La señal de entrada de $220V_{rms}$ ($311V_{pico}$) se rectifica mediante un puente de diodos común.
2. Etapas de filtrado de entrada.- Un juego de bobinas y condensadores minimizan el rizado hasta obtener el voltaje pico de entrada aproximadamente en DC.
3. Etapas de reducción de voltaje.- Un transformador de ferrita reduce el voltaje de 311VDC mediante conmutaciones de alrededor de 130kHz.
4. Etapas de conmutación.- El semiconductor de potencia de tecnología MOSFET conmuta entre conducción y corte a la corriente del transformador. Ligeras variaciones en la frecuencia de conmutación harán que el voltaje en el lado secundario del transformador varíe.
5. Etapas de rectificación de salida.- Un diodo rápido rectificador de media onda capturará la señal de salida del transformador.
6. Etapas de filtrado de salida.- Un juego de bobina y condensadores disminuirán al mínimo el rizado en la señal de salida.

7. Etapas de realimentación y control.- Un diodo Zener en serie al diodo de entrada de un optoacoplador (caídas de tensión constantes) enclavarán la tensión en la salida. La conmutación del optoacoplador dependerá de su corriente de diodo, y ésta dependerá de la corriente que demande la carga de la fuente. El pequeño sistema de control se encargará de sensar esa corriente y de esa forma variará la frecuencia de conmutación del transformador para compensar las demandas de la carga.

En el Anexo A se pueden apreciar con mayor detalle las etapas dentro del circuito de la fuente.

3.3.5. Protección de los circuitos

- Protección contra cortocircuitos en la fuente

El conmutador TNY274 soporta una corriente de drenador de hasta 400mA (excepcionalmente hasta 750mA para voltajes de entrada menores a 400V) [17, p. 12]. Se empleará una resistencia limitadora de corriente en serie a la línea de entrada, que a la vez cumplirá la función de resistencia fusible. Para el cálculo del valor de esta resistencia se asumirá una corriente máxima de 400mA y un valor nominal (comercial) de 10Ω . Por efecto Joule se calcula una potencia requerida de 1,6W. Se elegirá, entonces, un valor comercial de **$10\Omega/2W$** , que limitarán hasta un máximo de aproximadamente 450mA, que pueden ser soportados por el TNY274 ya que se trabaja con un voltaje menor a 400V.

- Protección contra sobretensiones en la fuente

Para reducir picos en la tensión de la línea, típicamente se emplean varistores. Los varistores equivalen a resistencias no-lineales, cuyo valor óhmico equivale a una alta impedancia para una tensión menor a un valor nominal. Para tensiones superiores a ese valor nominal, el valor óhmico decae drásticamente a un valor cercano a cero, suprimiendo el pico de tensión [16, p. 791-832].

Se elige un valor menor a 400VDC para proteger a los condensadores de filtrado de entrada (de $2,2\mu F/400VDC$). Nominalmente, el valor inmediato inferior es de 385VDC para varistores ($300V AC_{rms}$) (ver tabla de varistores en el Anexo B).

- Protección contra tensiones inducidas en el modém

Si se inducen tensiones superiores a 12V o inferiores a 0V en el transformador, estos excesos quedarán suprimidos por los diodos de respuesta rápida ubicados de forma inversa en el lado primario (ver figura 3.10, punto 1). Estos “enclavarán” toda señal en las líneas dentro de la ventana de 0 a 12V.

- Protección contra amplitud de la señal recibida

A diferencia de los diodos inversos, que protegen de voltajes superiores al de la fuente (y negativos), se emplea un diodo de efecto Zener de respuesta bidireccional (**SMAJ30CA**) en paralelo al lado primario del circuito de acople para suprimir los voltajes diferenciales entre ambas líneas (ver figura 3.10, punto 2). Esto evitará que amplitudes de señal superiores a 30V alcancen al receptor. Cabe resaltar que debido a las resistencias en la entrada del receptor que dividen entre 3 el voltaje de llegada, la amplitud máxima posible será de 10V.

En el lado secundario del circuito de acople se cuenta con dos condensadores de $1\mu F/250VAC$. Ambos se encargarán de reducir significativamente el voltaje de la línea a 60Hz, de manera que al transformador llegará solo la señal en la banda superior a 10kHz. Para proteger a ambos condensadores se empleará un diodo bidireccional de 440V (**SMAJ440CA**) que suprimirá tensiones superiores a ese valor y protegerá al circuito de acople (ver figura 3.10, punto 3).

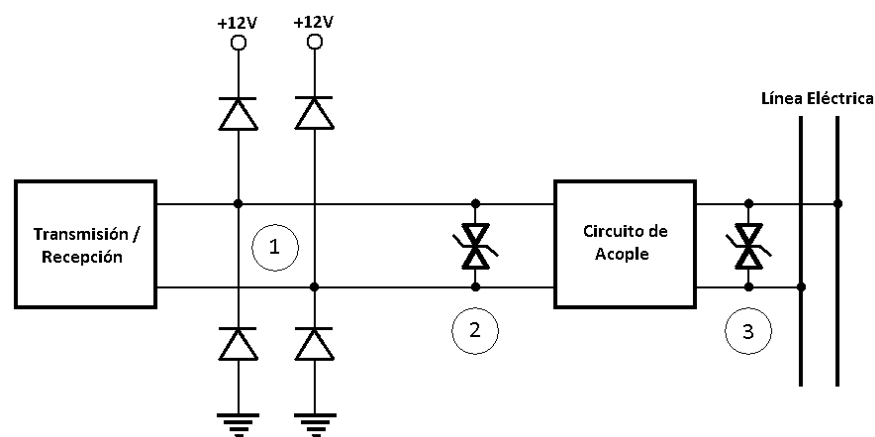


Fig. 3.10: Circuitos de protección eléctrica

3.3.6. Consideraciones térmicas

Las principales consideraciones de protección térmica se han tomado en cuenta para la fuente de alimentación, debido al flujo de corriente de mayor magnitud que en el resto del circuito.

El empaque del conmutador TNY274 de la fuente (DIP - *Dual In-line Package*) no presenta una zona de disipación de calor, a diferencia de otros semiconductores de potencia comunes. Es por eso que se recomienda extender las líneas que se conectan a él, de manera que ocupen el mayor área posible. Esto mejorará la disipación del calor a través de la misma placa del circuito.

En el caso de la tarjeta del modem, se seguirá un criterio similar, según especificaciones detalladas en [18], como medida de seguridad para incrementar la confiabilidad

y robustez del sistema electrónico.

3.3.7. Consideraciones mecánicas

El criterio más importante para determinar las dimensiones de el circuito se basa en la aplicación y la practicidad del sistema. Si la principal aplicación del sistema es el control y automatización doméstica empleando la línea eléctrica, entonces se toma como referencia al sistema eléctrico residencial. Típicamente, se emplean cajas de tomacorriente (*outlet box*) de pequeñas dimensiones ($102 \times 60 \times 48$ mm) en las instalaciones.

Para cumplir con el requerimiento de practicidad (fácil instalación), el equipo de comunicación debe tener dimensiones menores a esa referencia (ver figura 3.11).



Fig. 3.11: *Outlet box*, dimensiones de referencia

Para un área de $10,2 \times 6 \approx 61,2\text{cm}^2$ dentro del *outlet box*, se espera obtener un circuito en un área menor (aproximadamente la mitad).

3.3.8. Recomendaciones de los fabricantes

Para el diseño de este equipo se han asumido ciertos criterios por recomendación de los fabricantes:

- Filtro pasa altos externo para la señal recibida

Es un filtro pasivo RC cuyos valores de resistencias y condensadores están indicados en tablas en [2] para frecuencias de corte ubicadas en el inicio de cada banda (CENELEC, FCC o ARIB). Debe notarse que a pesar de tener la capacidad de seleccionar por software las frecuencias portadoras con las que se trabajará, es necesario que este filtro permita el paso de ese rango de frecuencias.

- Transformador de acople de relación 1:1

MaximTM recomienda el uso de los transformadores de la marca VacuumschmelzeTM. Dentro de la línea de transformadores PLC de este fabricante se encuentran los parámetros que específicamente recomienda para el juego MAX2990-MAX2991⁵. A pesar de ello, no se tomó a este fabricante como proveedor debido a su alto costo. Sin embargo, se consideraron las especificaciones técnicas sugeridas para hacer la búsqueda de otro proveedor. Mayores detalles en la sección 4.3

3.4. Datos basados en mediciones y normas

Esta sección presenta los resultados de mediciones previas al diseño del equipo de comunicación. Estas mediciones son tomadas como referencias o fuentes de datos para una correcta estimación del funcionamiento del equipo.

Asimismo, se mencionan ciertos aspectos importantes en el diseño de equipos de comunicación. De acuerdo a las normas vigentes, se explica de qué forma se han tomado en cuenta.

3.4.1. Atenuación debida a la distancia de transmisión

A pesar de los resultados vistos en [19], que indican rangos de alcance de hasta 12km para transmisiones de banda angosta, no se tuvo la infraestructura adecuada para realizar dicha prueba.

La prueba realizada estuvo basada en la distancia efectiva (de punto a punto) y no en la distancia real (longitud real de la trayectoria de la señal sobre la línea eléctrica). Se conectó un transmisor y un receptor a una distancia efectiva de aproximadamente **50m**. La transmisión de datos se realizó correctamente.

Para fines prácticos, en una red doméstica no se espera que un equipo esté aislado más de 50m, de manera que se puede afirmar que este equipo satisface los requerimientos mínimos.

3.4.2. Atenuación debida a equipos eléctricos

Al igual que las ondas electromagnéticas en el espacio, las señales PLC sufren atenuaciones en el medio debidas a la obstaculización. En la tabla 3.6 se resumen de manera aproximada los efectos del paso de las señales a través de los dispositivos eléctricos frecuentemente presentes en una instalación doméstica, según [6, p. 20].

3.4.3. Influencia de la bifurcación de las líneas

En [8] se llevan a cabo simulaciones que demuestran que la señal OFDM se atenúa dentro de la línea eléctrica debido a la bifurcación del camino. Más aún, la bifurcación

⁵Ver tabla resumen en el Anexo B.

Tabla 3.6: Atenuación de los principales equipos eléctricos en una red [6]

Equipo eléctrico	Atenuación (dB)	Comentarios
Medidor electromecánico	15	El medidor electromecánico atenúa la señal PLC pero no la bloquea. La señal puede traspasar los límites de la instalación eléctrica doméstica.
Medidor electrónico	15	Equivalente al medidor electromecánico.
Interruptor termomagnético	5	Si la señal entre dos módems PLC atraviesa varios interruptores, ésta puede quedar muy atenuada.
Supresor de picos	10	La calidad en la construcción del supresor de picos influye en la atenuación. Por consiguiente, es recomendable evitar conectar dispositivos PLC a supresores de picos.
Medidor + Interruptor	20 a 30	La combinación de ambos puede atenuar suficientemente la señal e impedir su salida de la instalación doméstica.

de las líneas crea el efecto de “multicamino”, que en comunicaciones inalámbricas es causado por la reflexión de las ondas electromagnéticas en diferentes cuerpos antes de llegar de la fuente al receptor. Esto causa distorsión en la recepción de la señal.

A pesar de estas atenuaciones y distorsiones de la señal que causan la disminución del *throughput*, la modulación OFDM resulta ser robusta y efectiva ante eso.

3.4.4. Emisiones electromagnéticas

Según [20, p. 24-25], las frecuencias del espectro radioeléctrico en el rango de 10 a 500kHz están destinadas a la radionavegación marítima y aeronáutica. Las señales PLC viajan a través de las líneas eléctricas, que bajo ciertas condiciones pueden considerarse como antenas que inducen ondas electromagnéticas.

Para esta aplicación doméstica puede considerarse despreciable alguna posible interferencia por las siguientes razones:

- La atenuación debida al bloqueo del concreto en una construcción.
- Las señales diferenciales en un par trenzado (los dos polos de la línea eléctrica) pueden contribuir a anular los campos inducidos.

- Se considera muy lejana la distancia entre la zona de navegación marítima y aérea respecto a la zona urbana.

3.4.5. Distorsión armónica en la línea eléctrica

De acuerdo a las especificaciones técnicas y legales vistas en [21], los armónicos de 60Hz significativos para la evaluación de la calidad de la energía se consideran hasta el N°40, es decir, hasta 2,4kHz. Es por eso que se considera que las señales de comunicación, el rango de frecuencias en el que van a trabajar (10 - 490kHz) y su magnitud (menor al 2 % del voltaje de línea), no serán un factor que afecte a la calidad de la red.

3.5. Software

3.5.1. Estructura del protocolo de comunicación

Al igual que el aire o el vacío para las comunicaciones inalámbricas, las comunicaciones a través de la línea eléctrica también comparten el canal, de manera que físicamente las señales llegarán a todos los dispositivos de la red. Entonces, se requiere de alguna forma de identificar los mensajes que se envíen de un punto a otro para evitar errores en la comunicación.

El MAX2990 tiene la capacidad de encapsular las tramas de datos en paquetes que permiten el direccionamiento de la información. Según [22], la trama de bits de un bloque de datos está estructurada de la forma vista en la figura 3.12. A continuación se detallan las funciones de cada bloque:

- Preámbulo.- Barrido en frecuencia que permite el control de ganancia automática, la sincronización en tiempo y frecuencia y el sensado de la portadora (CS-MA).
- Encabezado
 - Control de recepción.- Incluye los bits de solicitud de calidad de canal, encriptación, solicitud de *acknowledge*, nivel de prioridad y modo de direccionamiento.
 - Control de segmento.- Incluye bits de contadores de secuencia de paquetes y longitud de paquete.
- Dir. Destino.- Número de 2 ó 6 bytes que indica la dirección física del dispositivo PLC hacia el cual se enviará el paquete.
- Dir. Fuente.- Número de 2 ó 6 bytes que indica la dirección física del dispositivo PLC desde el cual se enviará el paquete.

- Datos.- Contenido del mensaje. Su longitud y encriptación dependerá de lo establecido en el encabezado.
- Relleno.- Bloque de puros ceros que se emplea para completar un bloque completo de transmisión.
- Verificación (CRC-16).- Bloque de comprobación de redundancia cíclica que permitirá determinar si el paquete transmitido llegó correctamente a su destino.

Preámbulo (N símbolos)	Encabezado (4 bytes)	Dir. Destino (2-6 bytes)	Dir. Fuente (2-6 bytes)	Datos (N bytes)	Relleno (M bytes)	Verificación (CRC-16) (2 bytes)
---------------------------	-------------------------	-----------------------------	----------------------------	--------------------	----------------------	------------------------------------

Fig. 3.12: Formato de trama de datos

Por recomendación de MaximTM, se empleó el entorno IARTM Embedded Workbench[23] para la programación del microcontrolador en Lenguaje C.

3.5.2. Algoritmo de interacción

Cada uno de los modems tiene programada la misma rutina de interacción con el medio. Ésta consiste básicamente en repetir una secuencia de transmisión y recepción de paquetes y ejecutar una acción (en este caso, la impresión del texto en el terminal). Estas secuencias de transmisión o recepción están cada una dividida en dos etapas: una de capa física (PHY) y otra de capa de enlace y control de acceso al medio (MAC). A continuación, se muestra el detalle de cada etapa de esta secuencia (vista en la figura 3.13):

- Sub-rutina “Inicialización”.- Configura los estados iniciales de los puertos, temporizador, comunicación serial, parámetros de capa física (ejm: frecuencias portadoras), parámetros de encriptación (si se requiriese), entre otros.
- Sub-rutina “MAC_Tx”.- Chequea si existen datos disponibles para el envío. Si es así, encripta los datos (si fuese requerido), los encapsula junto al encabezado y habilita la transmisión. (Ver figura 3.14)
- Sub-rutina “PHY_Tx”.- Si el paquete está listo (datos encapsulados junto a los bytes del encabezado y otros segmentos), lo transmite al *front-end*. Si estuviese configurado el *acknowledge*, espera la recepción de esta señal durante un tiempo determinado. Si ésta no llega, retransmite el mismo paquete. (Ver figura 3.15)
- Sub-rutina “PHY_Rx”.- Chequea el estado del buffer de recepción. Si se ha completado la recepción, habilita la posterior extracción de los datos (hecha por la siguiente sub-rutina). Analiza el encabezado del paquete y elimina los paquetes repetidos, basado en el número de secuencia. (Ver figura 3.16)

- Sub-rutina “MAC_Rx”.- Si el paquete está listo (recibido completamente), extrae los datos del bloque y los descripta (si se requiere), analiza el encabezado y chequea si existen bits erróneos. (Ver figura 3.17)
- Sub-rutina “Imprime Estado”.- Lee los registros que contienen el conteo de paquetes exitosos y fallidos, realiza el cálculo de la tasa de datos y envía una cadena de texto a través del puerto serial UART con esa información para ser vista por el usuario. (Ver resultados en la sección 3.5.3)

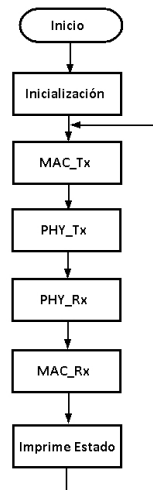


Fig. 3.13: Diagrama de flujo de la rutina principal

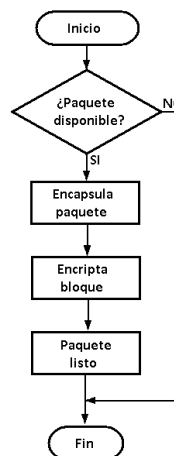


Fig. 3.14: Diagrama de flujo de la sub-rutina MAC_Tx

Cabe resaltar que el modem transmisor se diferencia del receptor en que el transmisor habilita datos para enviar. En el receptor no se espera tener ningún dato disponible para enviar (la respuesta de *acknowledge* no se considera un dato, es parte del protocolo). Por otra parte, aunque el transmisor reciba algún dato de la línea (durante sus sub-rutinas de recepción), no hará nada con éstos pues no es su propósito.

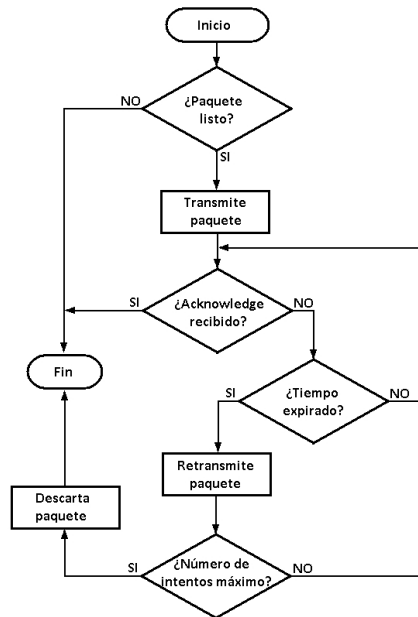


Fig. 3.15: Diagrama de flujo de la sub-rutina PHY_Tx

3.5.3. Pruebas

Se realizó una prueba de comunicación entre dos equipos PLC conectados a la red eléctrica. Cada equipo se conectó a través de su periférico serial UART a una PC. En cada PC se visualizó el terminal a una velocidad configurada de 115200bps, 8 bits de datos, sin paridad, 1 bit de stop. La instalación se muestra en la figura 3.18.

Uno de los equipos se configuró como transmisor, de tal forma que enviaba una trama continua de datos a la dirección predeterminada del otro equipo. Evidentemente, el otro equipo se configuró como receptor, de tal forma que captaba toda la trama de la línea eléctrica e imprimía una estadística cada 2 segundos en el terminal.

La estadística generada por el receptor consiste en un **conteo de paquetes recibidos exitosamente**, el **conteo de paquetes erróneos o corruptos** y el **cálculo de la tasa efectiva** mediante el conteo de paquetes recibidos en cada intervalo de 2 segundos.

Los objetivos de esta prueba son los siguientes:

- Establecer la correcta comunicación entre dos modems.
- Demostrar la capacidad de integración de la red con sistemas externos mediante sus periféricos.
- Estimar el rendimiento real de la comunicación de estos equipos con respecto a lo esperado teóricamente.
- Verificar cuantitativamente la calidad de la transmisión de datos con señales OFDM a través de la línea eléctrica.

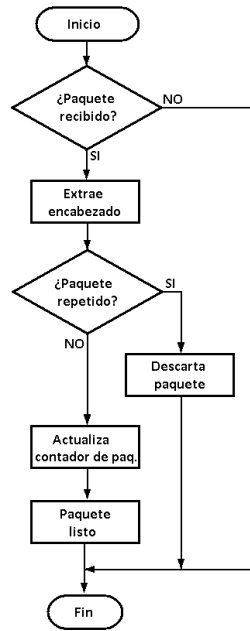


Fig. 3.16: Diagrama de flujo de la sub-rutina PHY_Rx

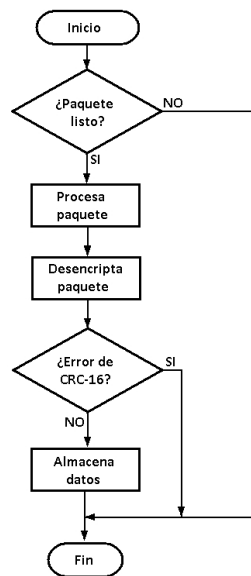


Fig. 3.17: Diagrama de flujo de la sub-rutina MAC_Rx

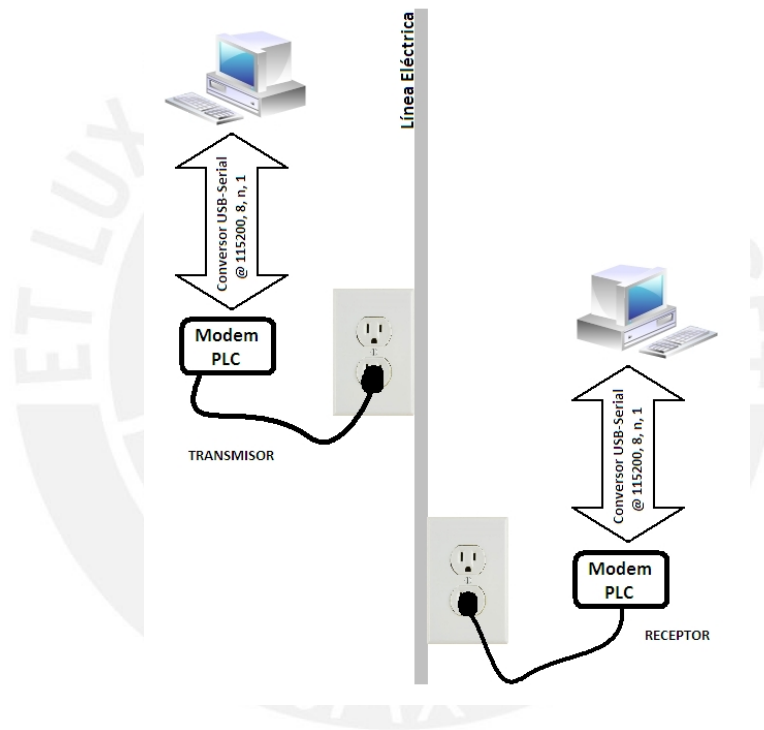


Fig. 3.18: Esquema del *set-up* para la prueba de comunicación

4. RESULTADOS

4.1. Modem PLC de Banda Angosta

En esta sección se presentan los resultados del hardware obtenido. En conjunto, el modem PLC y la fuente de alimentación conforman al equipo de comunicación cuyas especificaciones finales se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resumen de especificaciones técnicas del equipo

Parámetro	Valor	Unidades
Voltaje de operación	220 \pm 20 %	V(AC)
Consumo máximo	7	W
Consumo en modo reposo	15	mW
Rango de frecuencias	10 - 490	kHz
Dimensiones	81 \times 35 \times 40	mm

En las figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ,4.5 y 4.6 se muestran en escala 1:1 los diseños de los circuitos impresos (capas de cobre y capas de componentes). El equipo está conformado por las dos tarjetas (modem y fuente) conectadas de sus cuatro esquinas y ubicadas como placas paralelas.

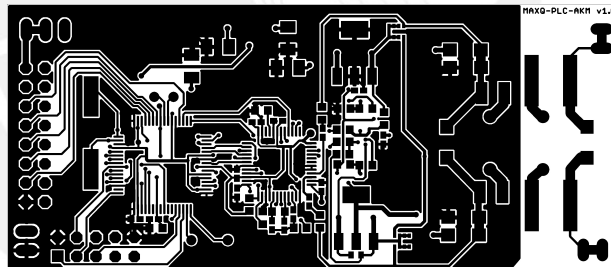


Fig. 4.1: Capa de cobre superior del Modem (Escala 1:1)

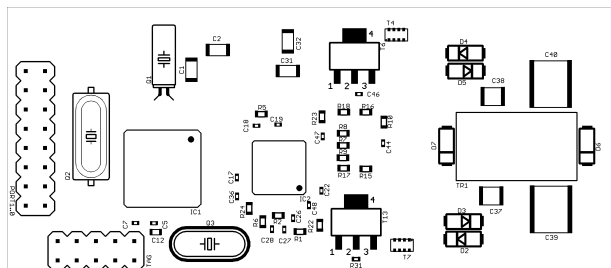


Fig. 4.2: Capa de componentes superior del Modem (Escala 1:1)

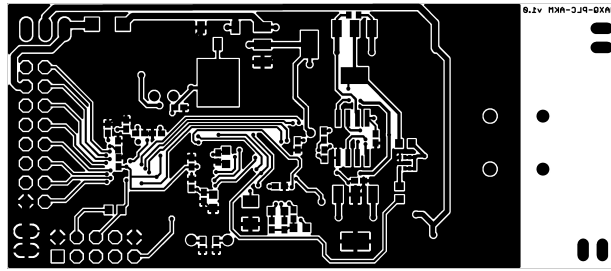


Fig. 4.3: Capa de cobre posterior del Modem (Escala 1:1)

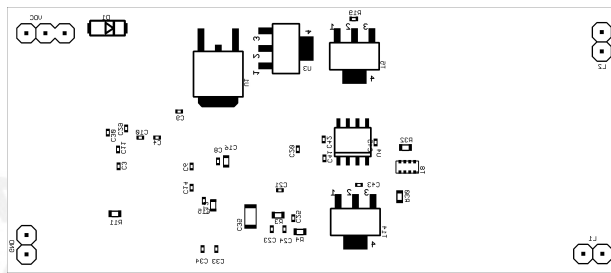


Fig. 4.4: Capa de componentes posterior del Modem (Escala 1:1)

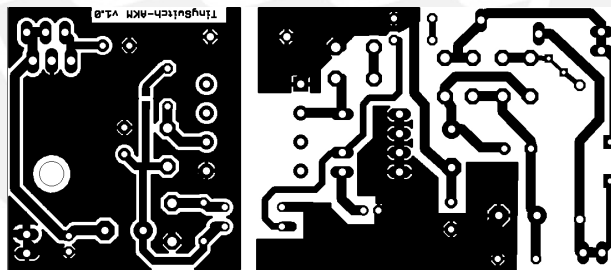


Fig. 4.5: Capa de cobre única de la fuente de alimentación (Escala 1:1)

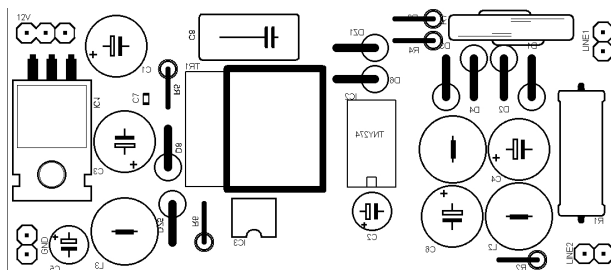


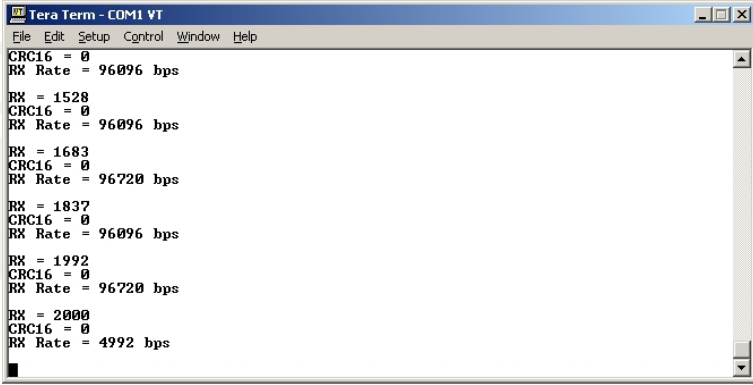
Fig. 4.6: Capa de componentes de la fuente de alimentación (Escala 1:1)

4.2. Comunicación entre equipos

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas de comunicación entre dos equipos de comunicación. En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran las ventanas del terminal en las cuales se recibe cada segundo el estado de la transmisión (función programada en el microcontrolador) a través de su puerto serial UART. Se programó para realizar una transmisión de 2000 paquetes (de 1 byte de dato). En cada impresión se puede identificar tres parámetros:

- “RX”.- Indica el número de paquetes recibidos correctamente.
- “CRC16”.- Indica el número de paquetes corruptos o erróneos.
- “RX Rate”.- Indica el resultado del cálculo interno de velocidad de transmisión, de acuerdo al tráfico de paquetes y al tiempo transcurrido.

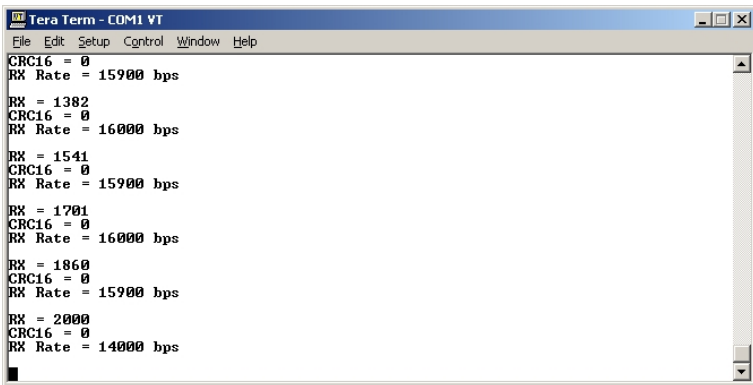
Cabe resaltar que el parámetro “RX Rate” es menor en el modo Robusto debido al tiempo adicional que existe entre paquetes por la espera de respuesta (*acknowledge*).



```

Tera Term - COM1 VT
File Edit Setup Control Window Help
CRC16 = 0
RX Rate = 96096 bps
RX = 1528
CRC16 = 0
RX Rate = 96096 bps
RX = 1683
CRC16 = 0
RX Rate = 96720 bps
RX = 1837
CRC16 = 0
RX Rate = 96096 bps
RX = 1992
CRC16 = 0
RX Rate = 96720 bps
RX = 2000
CRC16 = 0
RX Rate = 4992 bps
  
```

Fig. 4.7: Estado de las transmisiones en modo Normal vistas desde el terminal



```

Tera Term - COM1 VT
File Edit Setup Control Window Help
CRC16 = 0
RX Rate = 15900 bps
RX = 1382
CRC16 = 0
RX Rate = 16000 bps
RX = 1541
CRC16 = 0
RX Rate = 15900 bps
RX = 1701
CRC16 = 0
RX Rate = 16000 bps
RX = 1860
CRC16 = 0
RX Rate = 15900 bps
RX = 2000
CRC16 = 0
RX Rate = 14000 bps
  
```

Fig. 4.8: Estado de las transmisiones en modo Robusto vistas desde el terminal

En la figura 4.9 se muestra el resultado del Espectrograma realizado a un paquete enviado en modo Robusto (incluyendo la señal de *acknowledge*). Se puede identificar la zona inicial del Preámbulo en la que se realiza un barrido repetitivo en toda la banda, idéntico a la zona de respuesta. El paquete completo tiene una duración aproximada de 15ms.

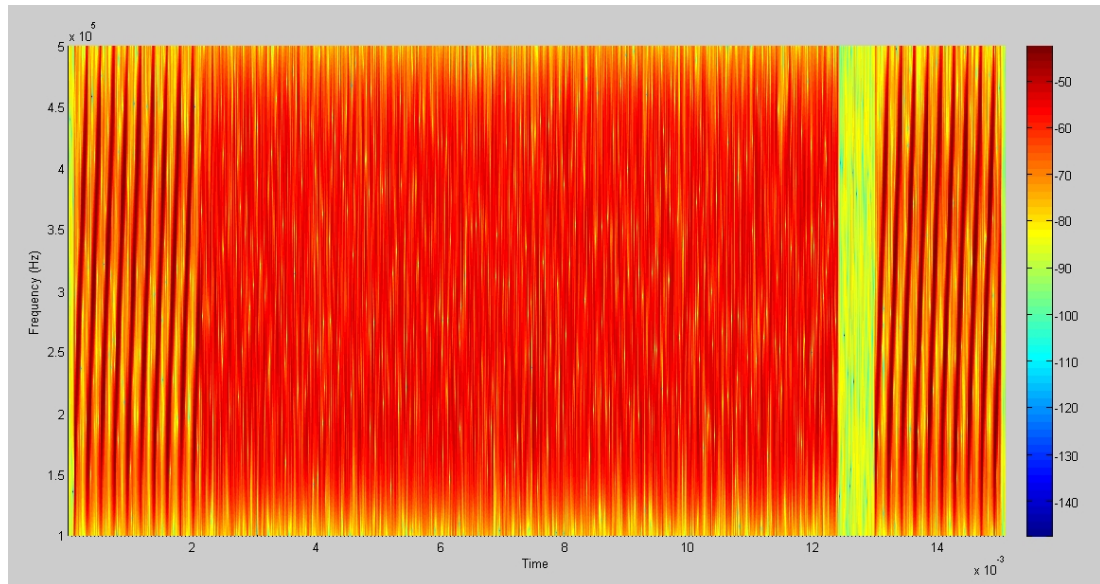


Fig. 4.9: Espectrograma de la señal transmitida y señal de *acknowledge*

4.3. Costos de Fabricación

Se puede considerar que prácticamente todos los componentes requeridos se han adquirido mediante distribuidores extranjeros. El distribuidor Mouser Electronics⁶ fue el principal proveedor de componentes electrónicos.

Específicamente, el juego MAX2990-MAX2991 fue adquirido directamente de Maxim Integrated Products⁷. Como se mencionó en la sección 3.3.8, se eligió un proveedor de transformadores diferente al recomendado. Debido a que se requería del transformador de acople y el de la fuente de alimentación, se eligió al fabricante Zhongkai Electronic⁸ por su bajo costo y su rapidez en la entrega de materiales. Asimismo, para la fabricación de la tarjeta del modem (por su complejidad) se eligió al fabricante Speedy-Circuits⁹ por experiencia previa.

En las tablas 4.2 y 4.3 se detallan de forma agrupada los costos por tipo de componente para el circuito del modem y de la fuente. No se incluyen costos de Ingeniería. Los costos de Ingeniería (que están sujetos básicamente a criterios de tiempo dedicado, esfuerzo, complejidad del proyecto y el uso de otros recursos) para este proyecto se considera que ascienden a un mínimo de \$10000.

En total, se obtiene un costo aproximado de S/.130 en materiales, alrededor de US\$47. En comparación a lo visto en la tabla 2.2, el costo del equipo es muy cercano a los modems de banda ancha (para Internet y HDTV) menor al precio de los equipos de banda angosta aplicados a automatización y *Smart Grid*.

Tabla 4.2: Costos de fabricación del modem

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO TOTAL (S/.)
ADC/DAC	1	22.68
Condensador	44	16.39
Conector	6	1.60
Cristal	3	3.28
Diodo	6	3.89
Microcontrolador	1	24.75
Opamp	1	5.96
Regulador	2	2.05
Resistencia	19	0.52
Tarjeta	1	13.75
Transformador	1	0.96
Transistor	7	4.06
TOTAL		99.93

⁶<http://www.mouser.com/>

⁷<http://www.maxim-ic.com/>

⁸<http://www.dgzhk.com/>

⁹<http://www.speedy-circuits.com.tw>

Tabla 4.3: Costos de fabricación de la fuente

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO TOTAL (S/.)
Condensador	7	2.28
Conector	3	0.80
Conmutador	1	2.22
Diodo	7	2.58
Inductor	3	4.12
Optoacoplador	1	0.5
Regulador	1	1
Resistencia	6	0.37
Tarjeta	1	15
Transformador	1	0.88
TOTAL		29.78

CONCLUSIONES

La tecnología PLC es la opción más adecuada para una solución libre de cables para una red de control y automatización, ya que es inevitable requerir de los cables de energía eléctrica para los diferentes dispositivos. A diferencia de otras soluciones que incorporan buses de datos y control para interconectar dispositivos sensores o actuadores con control centralizado, esta solución PLC permite inteligencia distribuida, ya que cada modem cuenta con un microcontrolador de 16 bits con capacidad computacional y de comunicación necesaria y suficiente para aplicaciones de control, reduciendo así el tráfico dentro de la red.

Los resultados de las pruebas demuestran que en un caso normal, para una comunicación de punto a punto, se logra un *throughput* de 96kbps. Se estima que bajo mejores condiciones en la red (menor distancia, menor atenuación) se puede lograr al máximo de 100kbps. Se comprueba además las características de la señal en el rango de frecuencias FCC en el tiempo.

De acuerdo a los objetivos planteados, se ha demostrado que puede desarrollarse un modem PLC suficientemente reducido para su uso dentro de instalaciones domésticas, de forma que eviten las alteraciones de la infraestructura.

El costo aproximado de S/.130 del equipo completo está basado en compras y cotizaciones por pequeñas cantidades. Incrementar las cantidades para la producción reducirá los costos de materiales significativamente. Reducir costos tanto en materiales como en la instalación hace de esta tecnología una solución viable, económica y efectiva para la automatización doméstica, en la cual no se tiende a invertir dinero.

Puede aprovecharse el ancho de banda disponible en la línea eléctrica para esta aplicación debido a que en el Perú aún no se cuenta con la normativa específica, ni del Ministerio de Energía y Minas ni del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La presente investigación inició en el segundo semestre del año 2010. Desde entonces, la disponibilidad de información (hojas de datos técnicos de circuitos integrados, estándares de comunicación, etc.) ha crecido considerablemente. A pesar de que esta solución no está basada en ningún estándar específico antes mencionado, es la precursora para el posterior desarrollo de soluciones estandarizadas hoy disponibles en el mercado.

RECOMENDACIONES

1. Se considera que para la obtención de un producto final de valor comercial hace falta el diseño del recubrimiento plástico para este equipo. Deben tomarse en cuenta los diferentes tipos de materiales disponibles (ejemplo: plásticos), considerando criterios como la resistencia al calentamiento, la no-inflamabilidad del material, la resistencia mecánica, el precio, entre otros.
2. Se asume que toda instalación del sistema se realizará únicamente con las líneas desenergizadas. El equipo está diseñado para operar de manera oculta dentro de la infraestructura de la edificación. Operar el circuito de manera expuesta significa un riesgo de descarga eléctrica para la persona. Se recomienda proteger de la manipulación para reducir el riesgo empleando lo mencionado en el punto anterior.
3. La aplicación de este sistema en una edificación requiere el uso de filtros de línea para aislar las señales de las diferentes viviendas.
4. Los códigos en lenguaje C pueden reescribirse en lenguaje ensamblador para mejorar la eficiencia del software, tanto en velocidad de ejecución como en espacio ocupado en la memoria de programa.
5. Esta investigación puede servir de base para el desarrollo de equipos de banda ancha mediante la misma tecnología de modulación de datos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Maxim Integrated Products, *10kHz to 490kHz OFDM Based Power Line Communication Modem (MAX2990)*, Datasheet, Maxim Integrated Products, 2010.
- [2] —, *Power-Line Communications (PLC) Integrated Analog Front-End Transceiver (MAX2991)*, Datasheet, Maxim Integrated Products, 2010.
- [3] A. P. Malvino, *Electronic Principles*, 6th ed. McGraw-Hill, 1999.
- [4] Arivus iAd™, “OFDM-Based High-Speed Narrowband PLC Approved for Smart Metering and Smart Grids,” in *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*. IEEE, Marzo 2009.
- [5] HomePlug PowerLine Alliance. (2010) HomePlug PowerLine Alliance Member Roster. [Online]. Disponible: <http://www.homeplug.org/about/roster> (Consulta: Diciembre 2010).
- [6] X. Carcelle, *Power Line Communications in Practice*. Artech House, 2009.
- [7] DOMEISI PUCP, “Encuesta sobre la automatización doméstica en el Perú,” Grupo de Domótica, Edificios Inteligentes y Servicios Integrados (PUCP), Agosto 2011. [Online]. Disponible: <http://goo.gl/vs6t0>
- [8] M. Tokuda, S. Hosoya, T. Yamagata, and T. Matsuo, “Influence of Branching a Power Line on PHY rate for PLC System using OFDM,” in *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*. IEEE, 2010.
- [9] A. Bahai, B. R. Saltzberg, and M. Ergen, *Multi-carrier digital communications: theory and applications of OFDM*, 2nd ed. Springer, 2004.
- [10] HomePlug Power Alliance Homepage. HomePlug Power Alliance. [Online]. Disponible: <https://www.homeplug.org/home/> (Consulta: Diciembre 2010).
- [11] Department of Energy of the USA. (2010) Smart Grid. Office of Electricity Delivery & Energy Reliability. [Online]. Disponible: <http://energy.gov/oe/technology-development/smart-grid> (Consulta: Enero 2011).
- [12] IEEE. (2011, Julio) Low-Frequency Narrow-Band Power Line Communications Working Group. IEEE. [Online]. Disponible: <http://grouper.ieee.org/groups/1901/2/> (Consulta: Noviembre 2011).

- [13] D. Shaver, “Low Frequency, Narrowband PLC Standards for Smart Grid - The PLC Standards Gap!” in *Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, Diciembre 2009.
- [14] J. P. de Lima Neto, S. Tsuzuki, Y. Kawakami, and Y. Yamada, “In-door Power-line Impedance Measurement up to High Frequency (10kHz - 70MHz),” in *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*. IEEE, 2003.
- [15] P. A. Janse Van Rensburg and H. C. Ferreira, “Step-by-Step Design of a Coupling Circuit with Bi-Directional Transmission Capabilities,” in *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*. IEEE, 2004.
- [16] M. H. Rashid, *Power Electronics: circuits, devices and applications*, 3rd ed. Prentice Hall, Inc., 2004.
- [17] Power Integrations, *Energy-Efficient, Off-Line Switcher With Enhanced Flexibility and Extended Power Range (TNY274)*, Datasheet, Power Integrations, Inc., 2009.
- [18] Electronic Industries Alliance, *High Effective Thermal Conductivity Test Board for Leaded Surface Mount Packages. (JESD51-7)*, EIA/JEDEC Solid State Technology Association, 1999.
- [19] D. W. Rieken and M. R. Walker, “Distance Effects in Low-Frequency Power Line Communications,” in *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*. IEEE, 2010.
- [20] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2005, Abril) Plan Nacional de Atribución de Frecuencias. [Online]. Disponible: <http://www.mtc.gob.pe/portal/comunicacion/concesion/mlegal/planes/pnaf.pdf> (Consulta: Abril 2011).
- [21] Ministerio de Energía y Minas (MINEM), *Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos*, Dirección General de Electricidad Std., 1997.
- [22] Maxim Integrated Products, *MAX2990 Integrated Powerline Digital Transceiver Programming Manual*, Maxim Integrated Products, 2010.
- [23] IAR Systems, *MAXQ IAR C Compiler Reference Guide for Dallas Semiconductor/Maxim’s MAXQ Microcontroller*, 5th ed., IAR Systems AB., 2008.

ANEXOS

A Diagramas Esquemáticos y de Circuito Impreso

B Hojas de Datos de los Componentes Electrónicos

