

**Estudio y Diseño Preliminar de un Sistema de
Transmisión de Información mediante el uso de la
Red de Distribución Eléctrica**

**Huber Oswaldo Muñoz Cerón
Carlos Alejandro Puerto Guzmán**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Popayán, 2003**

Estudio y Diseño Preliminar de un Sistema de Transmisión de Información mediante el uso de la Red de Distribución Eléctrica



**Huber Oswaldo Muñoz Cerón
Carlos Alejandro Puerto Guzmán**

Monografía para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Ing. Aldemar Holguín Rojas

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación Sistemas de Radiocomunicaciones
Popayán, 2003

*A mis padres y mis hermanas
por su voluntad indeclinable de apoyarme
en la consecución de mis objetivos.
A mis amigos por su lealtad y cariño,
porque siempre encontré en ellos
una mano extendida y una sonrisa.
A todas las personas que siempre
han creído en mí y que me entregaron
su confianza sin reservas.
A los profesores que me brindaron
todo su conocimiento y experiencia.*

Carlos Alejandro Puerto Guzmán

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MODELO DEL CANAL DE TRANSMISIÓN	5
1.1. IMPEDANCIA EN LAS LÍNEAS DE POTENCIA	6
1.2. RUIDO	7
1.3. ONDAS ESTACIONARIAS	9
1.4. PÉRDIDAS TÍPICAS POR CONEXIÓN	9
1.5. LIMITACIONES DE ANCHO DE BANDA	11
1.6. COMPORTAMIENTO VARIANTE EN EL TIEMPO DE LA RED	12
2. DISEÑO Y SELECCIÓN DEL MODELO DE LABORATORIO	13
2.1. PRUEBAS PRELIMINARES	13
2.1.1. Modulación FSK	14
2.1.1.1. Fuente de Datos (Random Integer Generator)	16
2.1.1.2. Modulador FSK	16
2.1.1.3. Canal AWGN	16
2.1.1.4. Demodulador FSK	17
2.1.1.5. Medidor de tasa de error de bit	17
2.1.1.6. Despliegue	17
2.1.2. Modulación PSK	17
2.1.2.1. Modulador PSK	19
2.1.2.2. Demodulador PSK	19
2.1.3. Modulación QAM	19

2.1.3.1. Modulador QAM	21
2.1.3.2. Demodulador QAM	21
2.1.4. Pruebas de tasa de error de bit (BER)	21
2.1.4.1. Parámetros de la prueba	21
2.1.4.2. Resultados Obtenidos	23
2.1.4.3. Segunda Prueba de BER	24
2.1.5. Selección del Esquema de Modulación	25
2.2. PROTOTIPO DE LABORATORIO	27
2.2.1. Modulación	27
2.2.1.1. Sección de Transmisión	29
2.2.1.2. Sección de Recepción	30
2.2.1.3. Funciones Adicionales	31
2.2.1.3.1. Base de Tiempo	31
2.2.1.3.2. Reset y Watch Dog	31
2.2.1.3.3. Detección de Señal	32
2.2.1.3.4. Amplificador de potencia externo con control BIAS	33
2.2.2. Etapa de Amplificación	33
2.2.3. Etapa de Acople	35
3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE LABORATORIO	37
3.1. ADAPTACIÓN DEL MODELO SELECCIONADO	37
3.1.1. Transmisor y Receptor	37
3.1.2. Interfaz con el Computador	43
3.1.3. Alimentación	45
3.1.4. Diagramas eléctricos finales	46
3.1.5. Costo del prototipo	46
3.2. HERRAMIENTAS PARA LAS MEDICIONES DE BER	49

3.3. PRUEBAS DE ESCRITORIO	53
3.3.1. Entorno de Simulación	53
3.3.2. Parámetros de Simulación	54
3.3.2.1. Resistencia Kilométrica	55
3.3.2.2. Coeficiente de Autoinducción	56
3.3.2.3. Capacitancia o Capacidad por Kilómetro	56
3.3.3. Modelo de Simulación	57
3.3.4. Resultados de la Simulación	59
3.4. PRUEBAS DE CAMPO	61
3.4.1. Entorno de realización de Pruebas	62
3.4.2. Pruebas realizadas	65
3.4.2.1. Medidas de Portadora	65
3.4.2.2. Medidas de Portadora con el efecto de una fuente Switching	66
3.4.2.3. Medidas de BER	68
3.4.3. Análisis de Resultados	69
3.4.3.1. Atenuación de la señal portadora	70
3.4.3.2. Pérdidas por paso de la señal por el tablero de servicio	70
3.4.3.3. Pérdidas introducidas por la presencia de una fuente Switching	71
3.4.3.4. Efectos de conectar los computadores a la red	71
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
4.1. MODELO PRELIMINAR DE LABORATORIO	74
4.2. ESPECTATIVAS DE DESARROLLO	77
4.2.1. Corto Plazo	77
4.2.2. Largo Plazo	78
BIBLIOGRAFÍA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. 1. Sistema de comunicación usando la red eléctrica.	6
Figura 1. 2. Impedancia agregada de las líneas de potencia europeas.	7
Figura 1. 3. Espectro de voltaje para tres motores comparados con un regulador de alumbrado operando en un circuito de potencia de 60Hz	8
Figura 1. 4. Atenuación estática por diferentes rutas	10
Figura 1. 5. Bandas se frecuencia según el estándar CENELEC.	12
Figura 2. 1: Pantalla de entrada del Simulink de MATLAB.	14
Figura 2. 2: Directorio de librerías de modulación FM.	15
Figura 2. 3: Sistema de comunicación típico.	15
Figura 2. 4: Esquema de modulación FSK.	16
Figura 2. 5: Directorio de librerías de modulación PM.	18
Figura 2. 6: Esquema de modulación PSK.	18
Figura 2. 7: Directorio de librerías de modulación QAM.	20
Figura 2. 8: Esquema de modulación QAM.	20
Figura 2. 9: Empaquetamiento del ST75355HS1	28
Figura 2. 10: Configuración de pines	28
Figura 2. 11: Diagrama Circuitual de Aplicación	30
Figura 2. 12: Diagrama de Tiempos de Datos	31
Figura 2. 13: Diagrama de tiempo de Reset y Watch dog	32
Figura 2. 14: Diagrama de tiempo de detección de portadora	32
Figura 2. 15: Esquema de amplificación y acople	33

Figura 3. 1: Configuración del sistema en modo unidireccional.	37
Figura 3. 2: Generador de la señal de entrada de baja frecuencia.	38
Figura 3. 3: Forma de onda a la salida del modulador.	39
Figura 3. 4: Forma de onda después de la amplificación de corriente.	39
Figura 3. 5: Transformador de acople.	41
Figura 3. 6: Diagrama esquemático de la etapa de acople a la red.	42
Figura 3. 7: Forma de onda a la salida del transformador de acople.	42
Figura 3. 8: Etapa de comunicación serial.	43
Figura 3. 9: Entrada de reloj para el MODEM.	44
Figura 3. 10: Etapa de alimentación propia del sistema.	46
Figura 3. 11: Diagrama eléctrico final del transmisor.	47
Figura 3. 12: Diagrama eléctrico final del receptor.	48
Figura 3. 13: Pantalla de salida del Calculador de Tasa de Error de Bit.	51
Figura 3. 14: Ventana del Programa Transmisor.	52
Figura 3. 15: Ventana del programa Receptor.	52
Figura 3. 16: Directorio del Power System Blockset.	54
Figura 3. 17: Modelo General de la Red de Distribución Eléctrica, usado para las simulaciones	57
Figura 3. 18: Esquema de tomacorrientes de los salones 227 a 231.	63
Figura 3. 19: Esquema de tomacorrientes de los salones 221 a 225.	63
Figura 3. 20: Esquema de tomacorrientes de los salones 215 a 220.	64
Figura 3. 21: Esquema de tomacorrientes de los salones 202 a 207.	64
Figura 4.1 Escenario típico de un hogar.	76
Figura 4.2 Esquema básico de PBX sobre la red.	79
Figura 4.3 Esquema básico de juego en red sobre el cableado eléctrico.	80
Figura 4.4 Esquema básico de lectura remota de contadores.	80

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2. 1. Parámetros de prueba de BER.	22
Tabla 2. 2. Resultados de la prueba de BER.	24
Tabla 2. 3. Resultados de la segunda prueba de BER.	25
Tabla 3. 1: Presupuesto de implementación del prototipo.	49
Tabla 3. 2: Valores de Resistencia Kilométrica.	58
Tabla 3. 3: Valores de los parámetros usados para las simulaciones	58
Tabla 3. 4: Resultados de la simulación con $D/r = 4$.	59
Tabla 3. 5: Resultados de la simulación con $D/r = 5$.	59
Tabla 3. 6: Resultados de la simulación con $D/r = 6.666$.	59
Tabla 3. 7: Resultados de la simulación con $D/r = 10$.	60
Tabla 3. 8: Resultados de la simulación con $D/r = 15$.	60
Tabla 3. 9: Atenuación en la simulación con $D/r = 4$.	60
Tabla 3. 10: Atenuación en la simulación con $D/r = 5$.	60
Tabla 3. 11: Atenuación en la simulación con $D/r = 6.666$.	61
Tabla 3. 12: Atenuación en la simulación con $D/r = 10$.	61
Tabla 3. 13: Atenuación en la simulación con $D/r = 15$.	61
Tabla 3. 14: Mediciones de Portadora en salones 227 a 231.	65

Tabla 3. 15: Mediciones de Portadora en salones 221 a 225.	66
Tabla 3. 16: Mediciones de Portadora en salones 215 a 220.	66
Tabla 3. 17: Mediciones de Portadora en salones 202 a 207.	66
Tabla 3. 18: Mediciones de Portadora en salones 227 a 231, con fuente.	67
Tabla 3. 19: Mediciones de Portadora en salones 215 a 220, con fuente.	67
Tabla 3. 20: Mediciones de Portadora en salones 202 a 207, con fuente.	67
Tabla 3. 21: Mediciones de Portadora en salones 221 a 225, con fuente.	68
Tabla 3. 22: Mediciones de BER en salones 227 a 231.	68
Tabla 3. 23: Mediciones de BER en salones 221 a 225.	68
Tabla 3. 24: Mediciones de BER en salones 215 a 220.	69
Tabla 3. 25: Mediciones de BER en salones 202 a 207.	69

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: LA RED ELÉCTRICA

ANEXO B: SISTEMAS DE MODULACIÓN

**ANEXO C: CÓDIGOS FUENTE DE LAS HERRAMIENTAS SOFTWARE
DESARROLLADAS**

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de modelos tecnológicos propios, adecuados a las necesidades particulares de un país o región, es uno de los factores más importantes cuando se busca incrementar el bienestar económico y social. Para hacer efectivo el desarrollo tecnológico, se requiere una fuerte inversión en investigación, que permita la adquisición del conocimiento básico necesario para iniciar los procesos que concluirán con la creación de tecnología.

Este fue uno de los motivos que impulsó el desarrollo del presente trabajo, cuyo objetivo primordial, es la adquisición de conocimiento básico, que permita a otros grupos de trabajo, empezar el desarrollo de innovaciones tecnológicas, que deriven en el fortalecimiento de la capacidad técnica de nuestro país, así como en la creación de fuentes de riqueza.

En el campo de las comunicaciones por medio de las líneas de potencia (Power Line Communications), se han realizado investigaciones y se han desarrollado dispositivos con este fin, pero todos ellos han sido realizados fuera del país. En Colombia, según la investigación realizada, solo algunas personas han realizado trabajos en este campo, pero son esfuerzos individuales, cuya repercusión como desarrollo tecnológico es mínima, pues no se ha divulgado los resultados obtenidos, ni se ha continuado con el trabajo.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de este trabajo, es la creación de una base teórico-práctica que permita el desarrollo de futuros proyectos de investigación y desarrollo, de sistemas de comunicación a través de las líneas de potencia.

Para lograr el objetivo planteado se siguió una metodología por fases, cada una de las cuales tenía su propio objetivo específico, orientado hacia una parte del campo de estudio; así, la primera fase de desarrollo, estuvo dirigida a la adquisición de información tanto acerca de las líneas de distribución eléctrica, como de los esquemas de modulación, los antecedentes de investigaciones realizadas en este campo de acción, las alternativas de solución etc.

Una segunda fase, consistió en la evaluación y clasificación de la información obtenida en la fase anterior; este estudio permitió establecer algunas posibles alternativas teóricas de solución.

La siguiente etapa de desarrollo, consistió en la evaluación de las alternativas de solución generados en la fase de estudio desarrollada anteriormente. En esta fase se hizo la selección del modelo de laboratorio sobre el cual se empezaría el desarrollo final, es decir, el que sería utilizado durante el desarrollo del resto del trabajo.

Una vez seleccionado este prototipo de pruebas, se realizó la implementación del mismo, adecuándolo a nuestro entorno de trabajo y a los recursos disponibles para este desarrollo; posteriormente, con el prototipo final totalmente desarrollado y funcionando adecuadamente, se emprendió la realización de las pruebas planeadas para establecer las capacidades de funcionamiento del modelo de laboratorio, último objetivo del trabajo propuesto.

Todo el proceso de desarrollo, está plasmado en esta monografía, en el orden que se menciona en los siguientes párrafos.

El primer capítulo está orientado hacia la fundamentación teórica, el objeto de estudio es la red eléctrica, pero esta enfocado, no a las características generales, sino que busca dar un panorama adecuado de las características y comportamiento de las líneas de distribución eléctrica, al ser usadas como canal de transmisión de información.

El segundo capítulo esta dividido en dos secciones, la primera contiene las pruebas preliminares de simulación que permitieron hacer la elección del esquema de modulación más adecuado al medio; la segunda parte contiene la descripción técnica de las características del prototipo elegido para el desarrollo e implementación, vale la pena recordar que este no es el modelo de laboratorio final, pues durante la implementación fue sometido a algunas modificaciones.

En tercer capítulo, denominado “Pruebas de Validación”, contiene, en su primera parte, el proceso que se siguió para la implementación del prototipo definitivo, las adecuaciones realizadas a este, etc. La segunda sección del capítulo contiene las pruebas de escritorio realizadas para analizar el comportamiento de la red cuando es usada para transmitir señales de frecuencias superiores que para las que fue diseñada, en este caso para la frecuencia de 130KHz, que es la frecuencia de la portadora del módem seleccionado.

La última parte del capítulo consigna las pruebas de campo realizadas con el sistema, sobre la red eléctrica, así como una descripción de las herramientas software desarrolladas con tal fin. El objeto de estas pruebas es establecer los umbrales de funcionamiento del sistema, umbrales que están directamente relacionados con los objetivos de calidad que se espera de un sistema como este.

El cuarto capítulo de la monografía, contiene las conclusiones que fueron obtenidas al analizar los resultados de las pruebas realizadas. Así mismo contiene escenarios de posibles aplicaciones para el modelo desarrollado y expectativas de desarrollo para modelos evolucionados del sistema.

El anexo A, referente a las líneas de transmisión de energía eléctrica, incluye la información recolectada acerca de características generales, las perturbaciones que se presentan en ellas, los fallos más comunes, los efectos debidos a la presencia de elementos como motores conectados a la red, etc., con el fin de dar una descripción adecuada del canal de transmisión.

En el anexo B, se realiza un estudio de los esquemas de modulación susceptibles de ser usados, se explica sus características generales, se hace comparaciones de tipo teóricas, con el fin de entregar un panorama de las posibles soluciones que se podría empezar a plantear.

El anexo C contiene los códigos fuente de las herramientas software desarrolladas para la elaboración de las pruebas de campo.

1. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MODELO DEL CANAL DE TRANSMISIÓN

En esta sección se hará un estudio de la red eléctrica como un canal de comunicaciones¹; definiendo un canal de comunicación, como un camino físico entre el transmisor y el receptor.

“El objetivo primordial en muchos sistemas como el planteado es transportar información desde un tomacorriente en una edificación, hacia otro; sin embargo, el medio de comunicación consiste de todo lo que está conectado a los tomacorrientes. Esto incluye el alambrado en los muros del edificio, el alambrado de los aparatos conectados, los aparatos mismos, el tablero de servicio, la conexión entre este y el transformador de distribución y por último el transformador mismo; puesto que los transformadores de distribución sirven a más de una residencia, las cargas y el alambrado de todas las residencias conectadas al transformador deben incluirse.”²

La *Figura 1.1* muestra un sistema de comunicación digital usando la red eléctrica. El transmisor es mostrado en la izquierda y el receptor en la derecha.

¹ Se recomienda a los lectores de esta monografía, leer el Anexo A, en el que se hace un tratamiento más profundo de las características de las redes de distribución eléctrica, especialmente de la red de baja tensión y las perturbaciones a las que esta se encuentra sometida, pues es importante conocer las características y la hostilidad del medio que se pretende utilizar como canal de comunicaciones, para poder comprender con mayor claridad las limitaciones propias de un sistema como el que se estudia en esta monografía.

² Extracto del trabajo de J.B. O’Neal Jr. acerca de las propiedades de los circuitos residenciales de potencia.

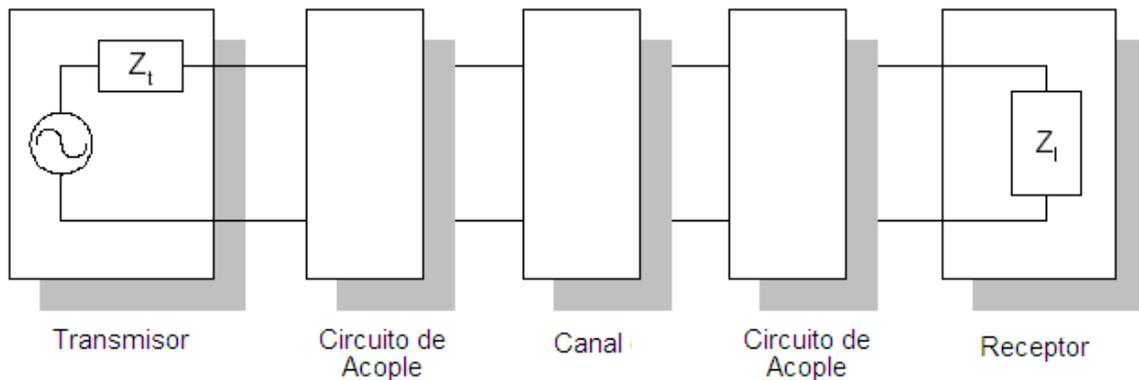


Figura 1.1 Sistema de comunicación usando la red eléctrica.

Un circuito de acople es usado para conectar el sistema de comunicación con la red eléctrica. El propósito del circuito de acople principalmente es permitir que la señal transmitida sea recuperada satisfactoriamente en el extremo receptor.

1.1. IMPEDANCIA EN LAS LÍNEAS DE POTENCIA

Amplia información con este respecto a sido publicada por Malack y Engstrom de IBM (Electromagnetic Compatibility Laboratory), quienes midieron la impedancia de 86 sistemas comerciales de distribución en 6 países europeos (Ver *Figura 1.2*). Estas medidas muestran que la impedancia de los circuitos de potencia residencial incrementa con la frecuencia y que esta en un rango que va de 1.5Ω a 80Ω a 100KHz y es usualmente inductiva.

Esta impedancia esta determinada al parecer por dos parámetros: las cargas conectadas a la red y la impedancia del transformador de distribución; las cargas en las residencias vecinas pueden afectar esta impedancia, mientras el alambrado parece tener relativamente poco efecto.

Para cargas resistivas típicas, la atenuación esperada de la señal es de 2dB a 40dB a 150KHz, dependiendo del transformador de distribución usado y del tamaño de las cargas. Por otro lado, es posible que cargas capacitivas, entren en resonancia con la inductancia de transformador y causen atenuaciones de la señal que varían con la frecuencia.

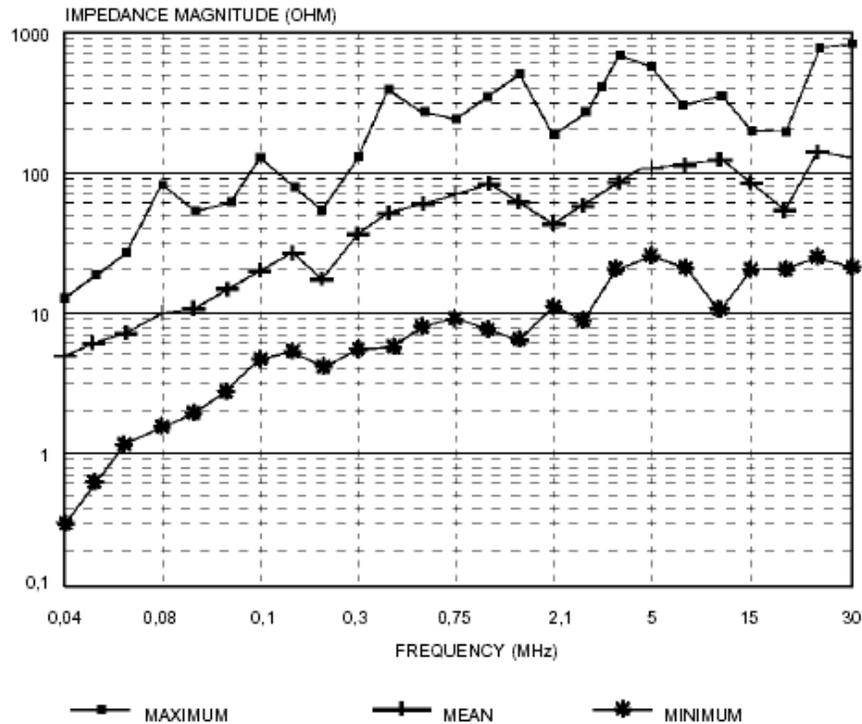


Figura 1.2 Impedancia agregada de las líneas de potencia europeas.

1.2. RUIDO

La principal fuente de ruido son los aparatos conectados al mismo transformador secundario, al cual se conecta el sistema de transporte de información. Las dos fuentes primarias de ruido son los triacs usados en los reguladores de alumbrado y los motores universales. Los triacs generan ruido síncrono con la señal de potencia y este aparece como armónicos de 60Hz. Los motores universales generan ruido pero no tan fuerte como

los triacs y generalmente no es sincrónico con los 60Hz, además los triacs están encendidos por largo periodos de tiempo, mientras que los motores son usados intermitentemente. La *Figura 1.3* muestra las fuentes de ruido también como el ruido de fondo en un ambiente residencia típico.

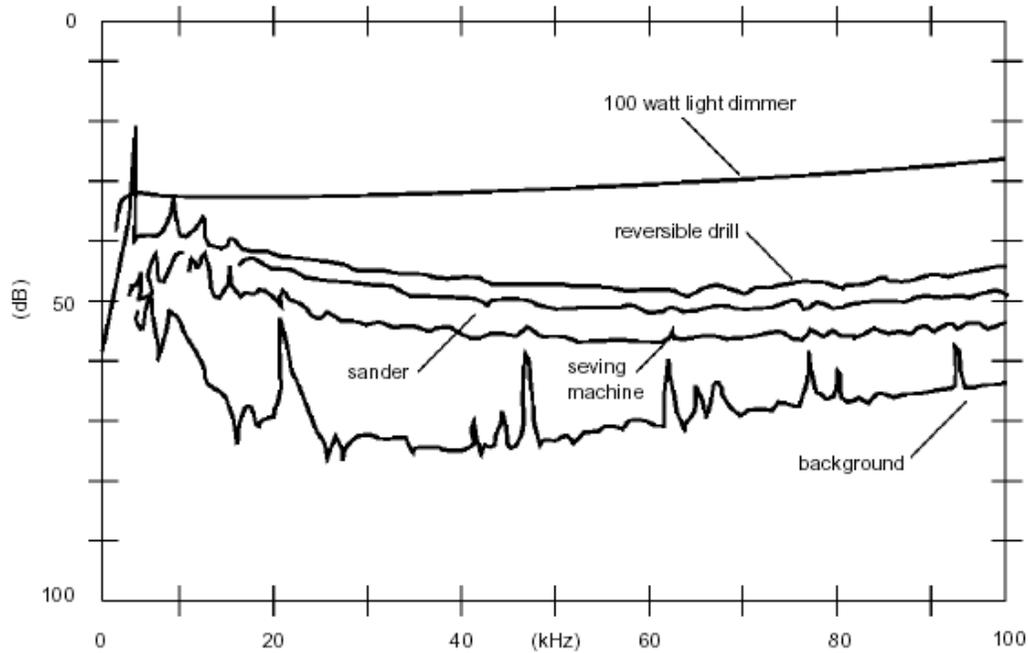


Figura 1.3 Espectro de voltaje para tres motores comparados con un regulador de alumbrado operando en un circuito de potencia de 60Hz (Vines, Trussel, Gale y O'Neal Jr).

Un parámetro importante cuando se estudian las características de un sistema de comunicación, es la relación señal a ruido SNR.

$$SNR = \frac{\text{Potencia Señal de Entrada}}{\text{Potencia de Ruido}}$$

Este parámetro se refiere a la característica de comunicación de un sistema. Entre más alta sea la SNR mejor será la comunicación.

Cuando la señal se propaga desde el transmisor hasta el receptor la señal se atenúa. Si la atenuación es muy alta, la potencia de la señal recibida es muy baja y puede no ser detectada por el receptor. La atenuación sobre la red eléctrica es considerablemente alta y esto pone una restricción entre la distancia desde el transmisor y el receptor.

1.3. ONDAS ESTACIONARIAS

Los efectos de las ondas estacionarias ocurrirán cuando las dimensiones físicas del medio de comunicación es similar a cerca del $1/8$ de la longitud de onda, esto es alrededor de 375m y 250m a 100KHz y 150KHz respectivamente. La longitud de la ruta de comunicación del lado secundario del sistema de distribución de potencia, será determinada principalmente por la longitud del alambre que conecta la residencia con el transformador de distribución. Sería raro que un alambrado de este tipo excediera los 250m, aunque la longitud total de todas las ramas (usualmente varias residencias están conectadas a un único transformador de distribución) podría excederlos. Así pues, los efectos por ondas estacionarias son raros para frecuencias por debajo de los 150KHz en alambrados residenciales.

1.4. PÉRDIDAS TÍPICAS POR CONEXIÓN

Se tienen dos clases de valores al transmitir en una frecuencia de alrededor de 130KHz (Ver *Figura 1.4*):

- De 10dB a 15dB: en este caso el transmisor y el receptor están conectados a la misma rama del circuito de potencia.
- De 20dB a 30dB: en este caso la ruta de comunicación va de una rama del circuito hacia otra, pasando por el tablero de servicio, el cual introduce una atenuación adicional de entre 10dB y 20dB.

Por otro lado, el rango de transmisión de un sistema de este tipo depende de la topología física de la red de distribución de potencia dentro del edificio.

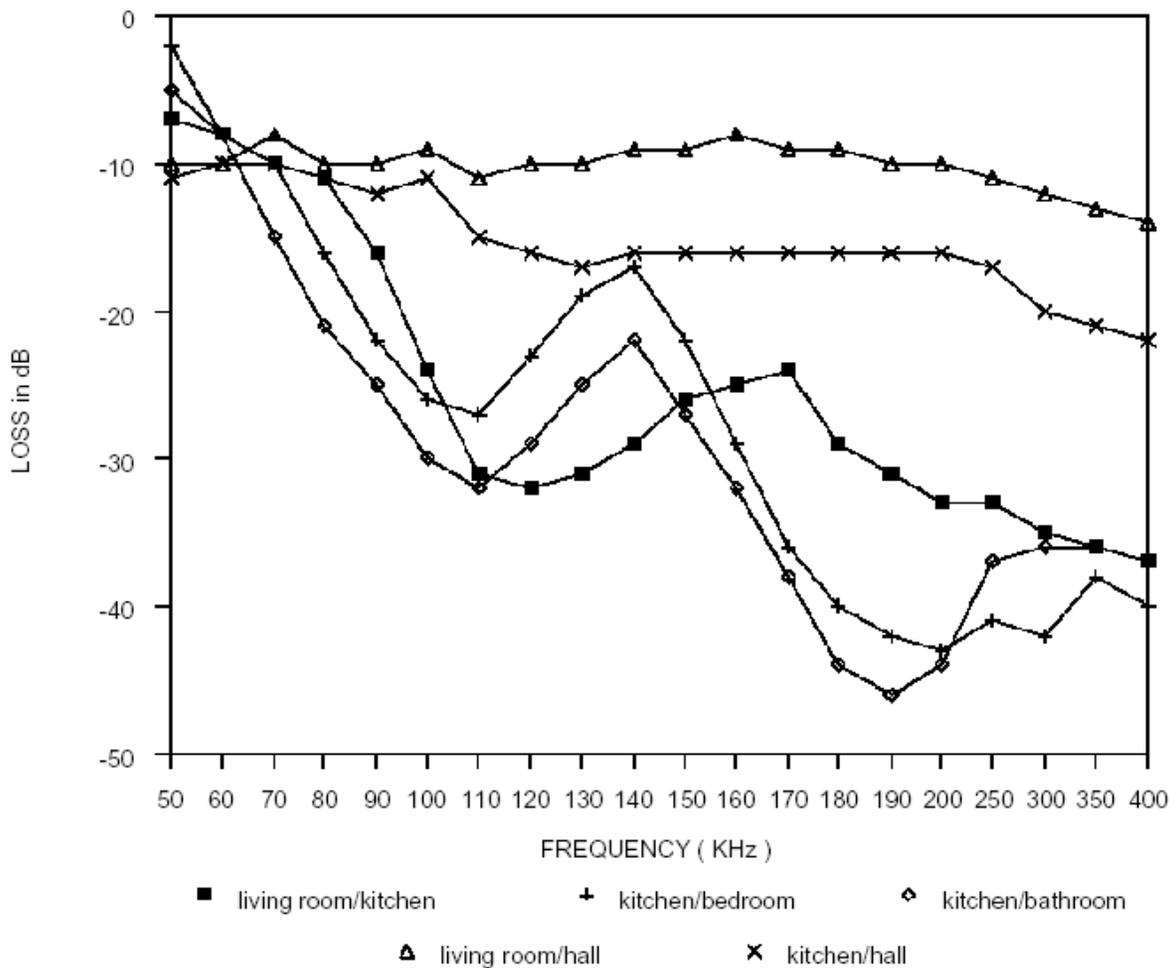


Figura 1.4 Atenuación estática por diferentes rutas.

1.5. LIMITACIONES DE ANCHO DE BANDA

El ancho de banda es proporcional a la tasa de bits, por lo tanto un gran ancho de banda es necesario para transmitir a altas tasas de bits. En Europa, el ancho de banda permitido está regulado por el estándar CENELEC³. Este estándar solo permite frecuencias entre 3KHz y 148.5KHz. Esto pone una gran restricción para comunicación sobre la red y puede no ser suficiente para soportar aplicaciones que necesitan altas tasas de transferencia, tales como video en tiempo real, dependiendo de la capacidad requerida.

La *Figura 1.5* muestra el ancho de banda, tal como se especifica en el estándar de CENELEC. El rango de frecuencias es dividido en 5 sub-bandas. Las primeras 2 bandas (3-9 y 9-95KHz) están limitadas para proveedores de energía y las otras tres para los consumidores de estos proveedores. Además, el estándar especifica y limita los niveles de salida del transmisor.

Con el fin de incrementar la tasa de bits, un ancho de banda más grande es necesario. Recientes investigaciones han sugerido el uso de frecuencias en el intervalo entre 1 y 20MHz. Si este rango se usara, esto incrementaría enormemente el ancho de banda y permitiría tener aplicaciones de mayores velocidades sobre la red eléctrica. El problema que se presenta es que este rango de frecuencias está asignado a otros sistemas de comunicación, por lo que se pueden presentar interferencias importantes dentro del sistema.

³ Comité Europeo de Estandarización Electrotécnica

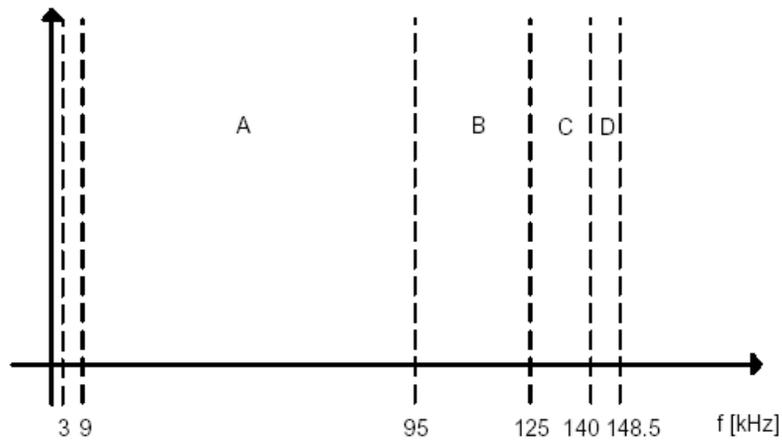


Figura 1.5 Bandas de frecuencia según el estándar CENELEC.

1.6. COMPORTAMIENTO VARIANTE EN EL TIEMPO DE LA RED

Un problema que se presenta en la red son las variaciones en el tiempo que se presentan con las malas conexiones, que son frecuentes en las redes. El nivel de ruido y la atenuación dependen del conjunto de cargas conectadas, las cuales varían en el tiempo.

Un canal variante en el tiempo complica el diseño de un sistema de comunicación. En unos instantes de tiempo la comunicación puede funcionar bien, pero en otros, una fuerte fuente de ruido puede inhabilitar el canal y bloquear la comunicación.

Para solucionar este problema, se deben hacer mediciones y estudiar los efectos de las variaciones en el tiempo de la red, para escoger la mejor decisión de diseño, de manera que el sistema se pueda adaptar a la red.

2. DISEÑO Y SELECCIÓN DEL MODELO DE LABORATORIO

2.1. PRUEBAS PRELIMINARES

Se realizarán una serie de pruebas preliminares orientadas a la selección del sistema más apropiado para la transmisión de información a través de las redes eléctricas. Puesto que el tipo de modulación es uno de los factores que más influencia tiene sobre el desempeño del sistema, como primera medida se estudiarán las posibles alternativas de modulación (FSK, PSK y QAM), utilizando una herramienta de simulación. Se recomienda al lector, leer el Anexo B para una revisión de las características y propiedades de algunos esquemas de modulación.

Para la realización de las simulaciones, la herramienta utilizada es MATLAB 6.0, principalmente el Simulink (*Figura 2.1*) y específicamente, para estas pruebas, el bloque de comunicaciones (Communications Blockset), el cual dispone de una gran variedad de elementos que permiten efectuar las pruebas preliminares con un grado de precisión alto, entre estos elementos se incluyen: moduladores y demoduladores con las formas básicas de modulación, cuantificadores de tasas de error etc.

Las pruebas realizadas están enfocadas hacia la determinación de la tasa de error de bit (BER), como respuesta del sistema en un ambiente de ruido, como lo es la red eléctrica, y se espera establecer cuál es el tipo de modulación que más se adecua al medio de transmisión sobre el cual debe funcionar el sistema.

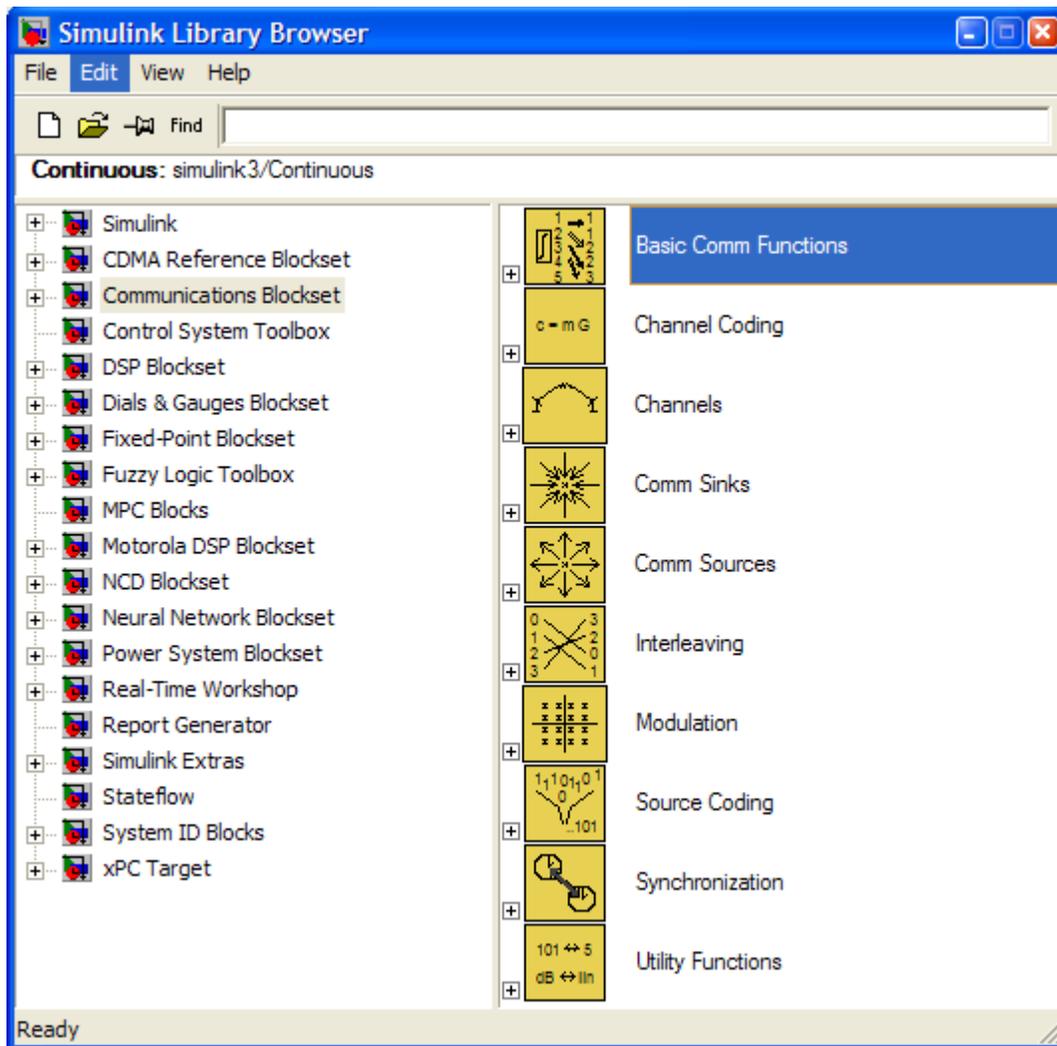


Figura 2.1 Pantalla de entrada del Simulink de MATLAB.

2.1.1. MODULACIÓN FSK

Para la realización de la simulación con este tipo de modulación se ingresa al módulo de modulaciones y se escoge “Digital Passband Modulation”, de donde se escoge FM que corresponde a FSK, tal como se muestra en la *Figura 2.2*. Esta versión de MATLAB nos ofrece moduladores integrados en donde todas las funciones de la modulación vienen incluidas dentro de un solo bloque funcional.

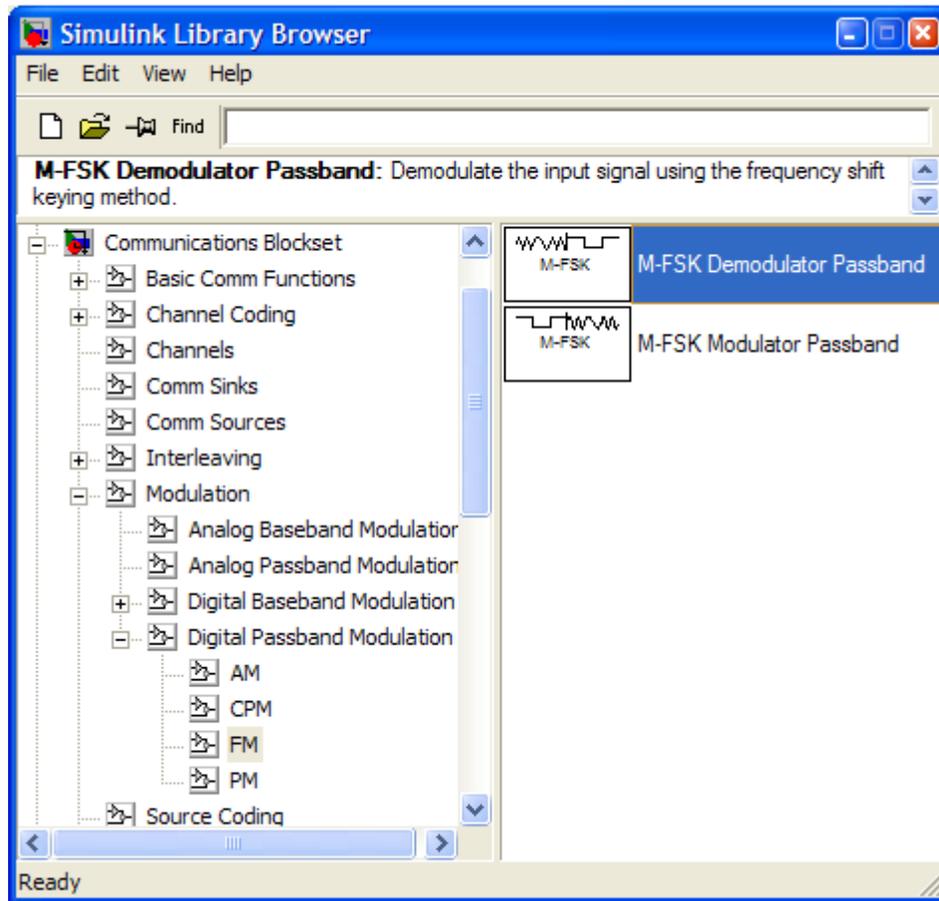


Figura 2.2 Directorio de librerías de modulación FM.

Se procede entonces a realizar la simulación de acuerdo al siguiente sistema típico de comunicación (Figura 2.3).



Figura 2.3 Sistema de comunicación típico.

Se agrega un bloque para el cálculo de la tasa de error de bit, el cual se efectúa comparando los datos generados con los datos después del demodulador. El esquema utilizado para la simulación es el siguiente (Figura 2.4):

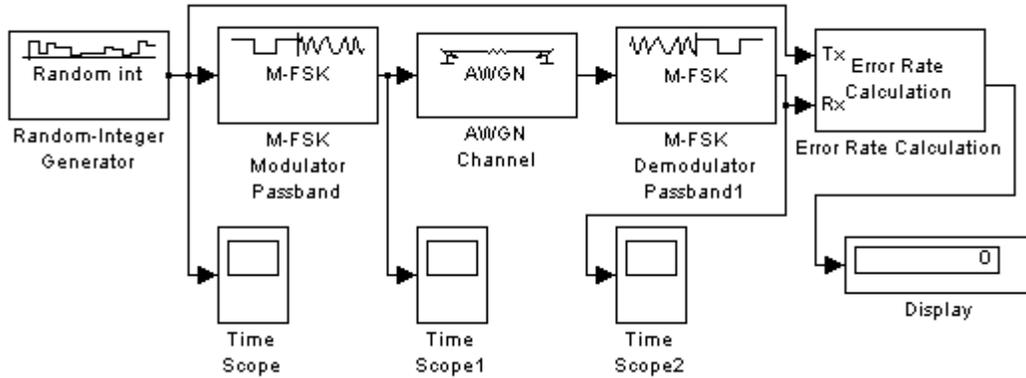


Figura 2.4 Esquema de modulación FSK.

2.1.1.1. Fuente de Datos (Random Integer Generator)

Módulo que representa una fuente aleatoria de datos en un sistema de comunicaciones, que ofrece la posibilidad de variar el μ (número de niveles) del sistema. En nuestro caso el $\mu = 2$, es decir, un sistema binario.

2.1.1.2. Modulador FSK

Los parámetros más relevantes de este módulo están asociados al número de niveles, la separación entre frecuencias, la frecuencia portadora, el muestreo por símbolo en banda base y el tiempo de muestreo de salida.

2.1.1.3. Canal AWGN

Representa un canal que adiciona ruido blanco Gaussiano a la señal se entrada. Los parámetros que se pueden variar son la relación señal a ruido en dB y la potencia de la señal de entrada.

2.1.1.4. Demodulador FSK

Los parámetros de este bloque son los mismos del Modulador.

2.1.1.5. Medidor de tasa de error de bit

En este módulo se comparan los datos de salida del transmisor y los datos de salida del demodulador. El parámetro que se debe ajustar es el retardo entre estas señales, introducido en la propagación por el canal.

2.1.1.6. Despliegue

Se usa simplemente para visualización de los datos del medidor de tasa de error de bit. Se despliegan la BER, los datos erróneos recibidos y los datos transmitidos.

2.1.2. MODULACIÓN PSK

Al igual que en la modulación anterior seguimos el mismo procedimiento para establecer el sistema, solo que ahora escogemos PM del Digital PassBand Modulation, de donde escogemos la modulación M-PSK, como se muestra en la *Figura 2.5*. El esquema del sistema que se utiliza para la simulación con este tipo de modulación es el mostrado en la *Figura 2.6*.

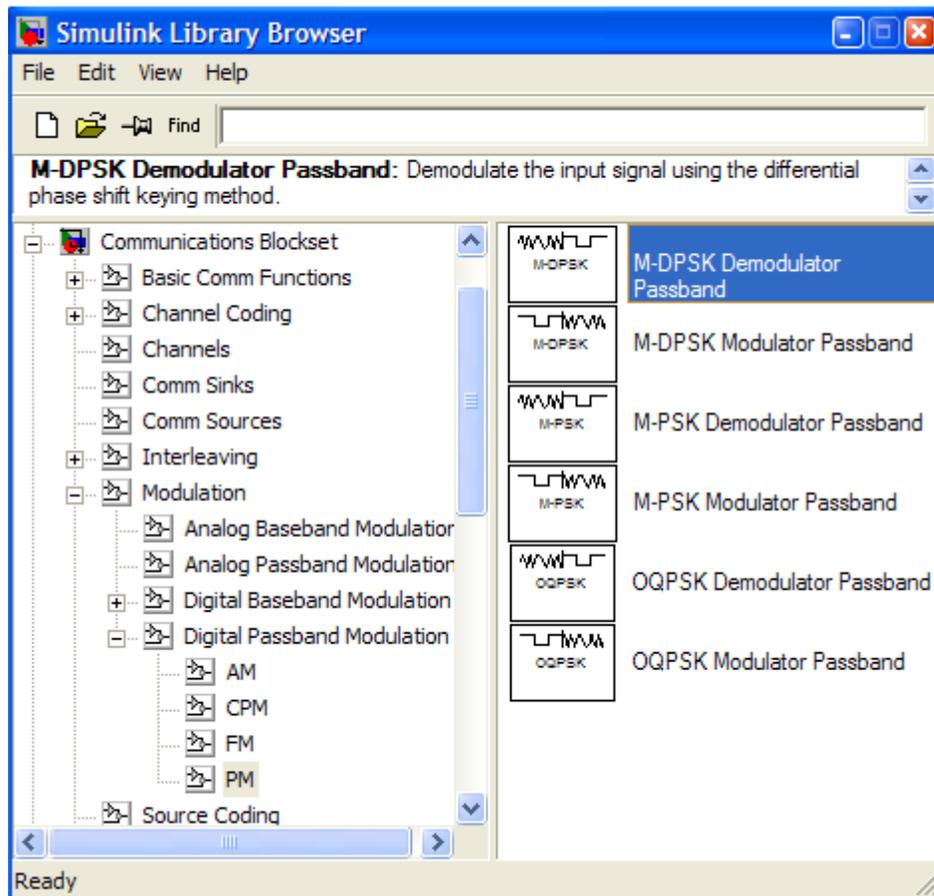


Figura 2.5 Directorio de librerías de modulación PM.

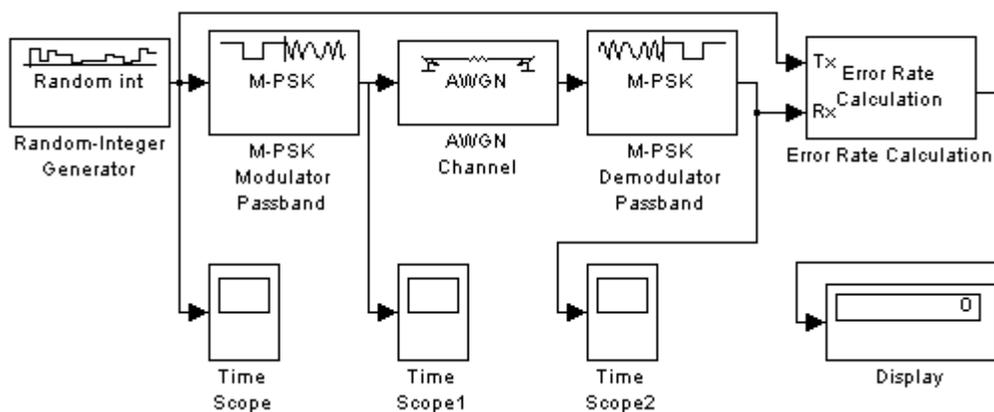


Figura 2.6 Esquema de modulación PSK.

2.1.2.1. Modulador PSK

Su función es la de modular la señal de entrada entregada por el generador, haciendo uso del esquema PSK. Los parámetros más relevantes de este módulo son: número de niveles (2), frecuencia de la portadora y número de muestras por símbolo.

2.1.2.2. Demodulador PSK

Efectúa el proceso inverso, es decir toma la señal modulada y entrega la secuencia de información, que es entregada al módulo de comparación. Este módulo tiene los mismos parámetros de funcionamiento que el modulador.

Los restantes bloques y sus parámetros cumplen la misma función explicada en la simulación de FSK.

2.1.3. MODULACIÓN QAM

En Matlab no existe un bloque que permita realizar la simulación con ASK, por lo tanto, elegimos QAM para efectuar la simulación con modulación de amplitud; ya que el número de niveles que se utilizará en la simulación es 2, la aproximación es lo suficientemente buena.

El procedimiento a seguir es el mismo que para los otros tipos de modulación, solo que ahora escogemos AM del bloque “Digital PassBand Modulation”, de donde se escoge la modulación QAM, tal como se muestra en la *Figura 2.7*.

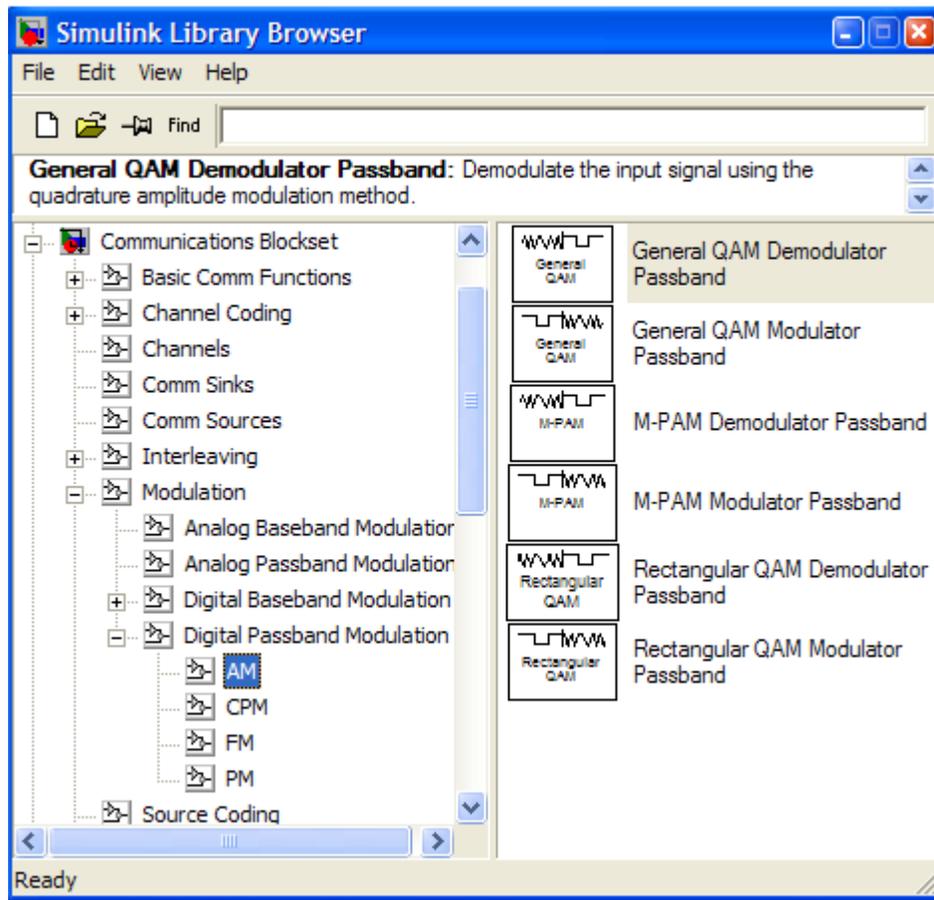


Figura 2.7 Directorio de librerías de modulación QAM.

El esquema de simulación se muestra en la *Figura 2.8*.

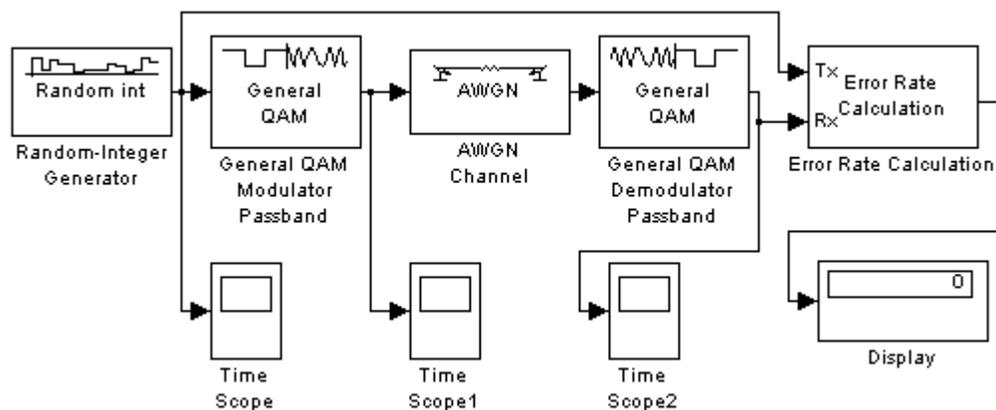


Figura 2.8 Esquema de modulación QAM.

2.1.3.1. Modulador QAM

Este módulo toma la señal de entrada, y la modula mediante el esquema QAM. Los parámetros relevantes de este módulo son: La Constelación de la señal modulada, la frecuencia de la portadora y además el número de veces que se toman muestras de la señal en banda base.

2.1.3.2. Demodulador QAM

Es el complemento del modulador, toma la señal modulada y entrega a su salida la información inicial; los parámetros de funcionamiento de este bloque son los mismos del modulador.

Los demás bloques cumplen con las mismas funciones explicadas anteriormente.

2.1.4. PRUEBAS DE TASA DE ERROR DE BIT (BER)

Para efectuar una primera comparación entre las posibles alternativas de solución, se efectuó una simulación en los tres esquemas utilizando los mismos valores en los parámetros, con el fin de hacer de esta prueba lo más objetiva posible.

2.1.4.1. Parámetros de la prueba

Los valores de los parámetros que se utilizaron para esta prueba son los mostrados en la *Tabla 2.1.*

PARÁMETRO	FSK	PSK	QAM
Numero de Niveles	2	2	2
Periodo de Símbolo	1/1000 Seg.	1/1000 Seg.	1/1000 Seg.
Muestreos por símbolo en banda base	4	4	4
Fase inicial	0 radianes	0 radianes	0 radianes
Frecuencia Portadora	132.45KHz	132.45KHz	132.45KHz
Relación Señal a Ruido	5dB	5dB	5dB
Potencia de la señal de entrada	0.1Watt	0.1Watt	0.1Watt
Retardo en Recepción	2/1000 Seg.	2/1000 Seg.	2/1000 Seg.
Número de muestras a la salida	1/8000	1/8000	1/8000
Frecuencia de Separación	1.7KHz	N/A	N/A
Constelación de la Señal	N/A	N/A	[exp (2*pi*i*[0:6]/7)]

Tabla 2.1 Parámetros de prueba de BER.

La selección de estos parámetros se realizó según los siguientes criterios específicos.

- **Número de niveles:** Se selecciona este valor puesto que el sistema transmitirá señales binarias, además, se tienen en cuenta consideraciones de relación de potencia de la señal al ancho de banda, como se explica en la sección 1.2.1 MODULACIÓN DIGITAL.
- **Periodo de Símbolo:** Se toma este valor ya que equivale a una velocidad de transmisión de 1000 bits por segundo, que es una velocidad cercana a la ofrecida por moduladores para línea de potencia comerciales.
- **Muestreos por símbolo en banda base:** numero de veces que se muestrea la señal de banda base para verificación de la información extraída de esta.
- **Fase inicial:** se establece ese valor como referencia.
- **Frecuencia Portadora:** con el fin de utilizar las bandas que especifica el estándar CENELEC para la transmisión de datos sobre la red eléctrica, utilizamos una frecuencia portadora promedio de 132.45KHz, la cual pertenece a la banda C que va desde los 125KHz. a los 140KHz.

- Relación Señal a Ruido: esta condición se escoge con el ánimo de utilizar un valor crítico de la relación señal a ruido, pues en una red de baja tensión típica, se espera que este sea bajo.
- Retardo en Recepción: Matlab simula un ambiente real, por lo cual introduce retardos en las señales recibidas (retardo de transmisión); este retardo se mide en periodos de símbolo, que para este caso es de 2 periodos, es decir 2 milisegundos.
- Número de Muestras a la Salida: Representa el número de muestras en la salida por cada muestreo en la entrada. El producto entre “Número de Muestras a la Salida” y “Muestreos por Símbolo en Banda Base” debe ser múltiplo del período de símbolo. En este caso, se tienen dos muestras a la salida por cada muestra tomada en banda base, puesto que se toman cuatro muestras de cada símbolo en banda base, la señal modulada tiene un total de 8 muestras por cada símbolo recibido.
- Frecuencia de Separación: Parámetro es propio de los moduladores FSK. Teniendo en cuenta criterios para la transmisión de información por modulación de frecuencia, la separación de frecuencias debe ser como mínimo igual a la velocidad de datos que se espera transmitir, en este caso sería de 1KHz, pero puesto que solo se transmitirá una señal por la red, lo que implica ausencia de canal adyacentes, esta separación se puede hacer un poco mayor con el fin de lograr un mejor desempeño del sistema.
- Constelación de la Señal: Parámetro característico de moduladores QAM. La constelación seleccionada es el parámetro por defecto en los bloques modulador y demodulador QAM.

2.1.4.2. Resultados Obtenidos

Con estos parámetros establecidos se efectuó la simulación para un total de 100 segundos, dado que la velocidad de transmisión binaria es de 1000 bits por segundo, se

obtiene un total de 100.000 símbolos transmitidos, lo que permite tener un grado de certeza relativamente alto con respecto a los resultados obtenidos en la prueba, que son los siguientes (*Tabla 2.2*):

Modulación	BER
FSK	0.00
PSK	0.00
QAM	$3.88 \cdot 10^{-3}$

Tabla 2.2 Resultados de la prueba de BER.

La primera conclusión que se puede deducir de esta prueba es que la modulación QAM presenta una BER alta, lo que era de esperarse puesto que QAM es una modulación de amplitud y como tal, presenta serios problemas cuando el ruido existente en el medio tiene un magnitud considerable, como la red eléctrica, así pues, aunque permitiría una mayor velocidad de transmisión, no es apropiada para el sistema en estudio.

Este primer resultado es concluyente solo en el caso de QAM, que es descartada por lo tanto como modelo de modulación para el sistema, pero no clarifica nada con respecto a FSK y PSK, por lo cual es necesario efectuar otra simulación con el fin de encontrar datos que nos permitan tomar decisiones.

2.1.4.3. Segunda Prueba de BER

En la segunda prueba de BER solo se simularon los sistemas FSK y PSK. Los parámetros de la simulación se mantuvieron constantes, pero en esta ocasión el tiempo de simulación paso de 100 a 10000 segundos, es decir, se paso de 100.000 a 10.000.000 de bits transmitidos, esto, puesto que los errores son acumulativos en el tiempo, lo que

implica que a mayor tiempo de estudio, los resultados serán más confiables. Los resultados obtenidos en la simulación se muestran en la *Tabla 2.3*.

Modulación	BER
FSK	0.00
PSK	0.00

Tabla 2.3 Resultados de la segunda prueba de BER.

Tal como muestran los resultados de la simulación, estos dos esquemas de modulación, presentan características similares en cuanto a la calidad de la información transmitida, por lo cual ambos podrían ser candidatos para ser seleccionados, pero debe tenerse en cuenta que la simulación realizada tiene un nivel de abstracción bastante alto, que deja por fuera características propias del canal de transmisión a utilizar, tales como la atenuación, la variación de fase propia del canal, las alteraciones de fase debidas a las derivaciones y empalmes (que no son constantes), además de las que pueden ser introducidas por los aparatos conectados a la red, etc.

2.1.5. SELECCIÓN DEL ESQUEMA DE MODULACIÓN

Para la selección del esquema de modulación se hacen las siguientes consideraciones teóricas:

- Se asume que la atenuación, en la región del ancho de banda del sistema, es constante.
- La atenuación y la variación de fase del canal son desconocidas.

FSK es un método robusto que funciona aún cuando las variaciones de fase y la atenuación son desconocidas. Sin embargo, la atenuación debe ser constante en el ancho de banda de comunicación, tal como se ha asumido.

Para PSK, la información esta modulada en fase, por lo cual, solo la portadora es utilizada, debido a esto, este sistema de modulación falla, si una fase desconocida que es introducida por el canal, no es compensada en el receptor.

Además de las alteraciones de fase introducidas por el canal de transmisión debido a su naturaleza, existen otras alteraciones introducidas relacionadas con las características propias de la línea de potencia, como las derivaciones, la presencia de tomas de corriente, bombillas, aparatos eléctricos conectados a esta, en algunos casos, la multiplicidad de tipos de alambre en la misma instalación, y el estado de todos estos elementos. Estas alteraciones podrían llegar a ser tan drásticas, que podrían incluso, inutilizar completamente la información transmitida usando PSK.

En nuestro medio no es difícil encontrar instalaciones eléctricas muy antiguas, con una gran variedad de modificaciones, realizadas sin tener en cuenta aspectos técnicos, en mal estado, etc., por lo cual, PSK presenta una desventaja competitiva respecto a FSK, pues lo que se busca es la implementación de un sistema que exija el menor número de modificaciones posibles, a la infraestructura presente en las edificaciones.

Por otro lado, en las investigaciones realizadas en cuanto a disponibilidad, desde el punto de vista comercial, de moduladores para línea de potencia, se encontró mayor facilidad en la consecución de módems FSK, tanto por el precio como por la facilidad de adquisición. Algunos de los módems FSK, inclusive, proveen de facilidades para la realización de

pruebas de funcionamiento, facilitando así la realización del estudio de una manera satisfactoria.

2.2. PROTOTIPO DE LABORATORIO

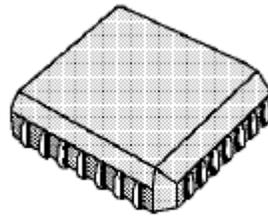
La decisión acerca del diseño seleccionado para la realización de las pruebas de laboratorio, se sustentó en los resultados de las pruebas de simulación, así como en el estudio realizado en los otros submódulos del sistema. A continuación se explican las principales características del Prototipo de Laboratorio.

2.2.1. MODULACIÓN

El esquema de modulación seleccionado fue FSK; los resultados obtenidos en las pruebas de simulación de BER son bastante claros acerca de cual esquema de modulación es más adecuado al tipo de canal que vamos a utilizar.

Una vez seleccionado el esquema de modulación, se seleccionó el modulador a utilizar; para esta selección se tuvieron en cuenta aspectos relacionados con la velocidad de transmisión de información, la frecuencia portadora, capacidades de comunicación, etc.

El modulador seleccionado fue el ST7537HS1 (*Figuras 2.9 y 2.10*) el cual tiene las siguientes características:



PLCC28
(Plastic Chip Carrier)

Figura 2.9 Empaquetamiento del ST75355HS1.

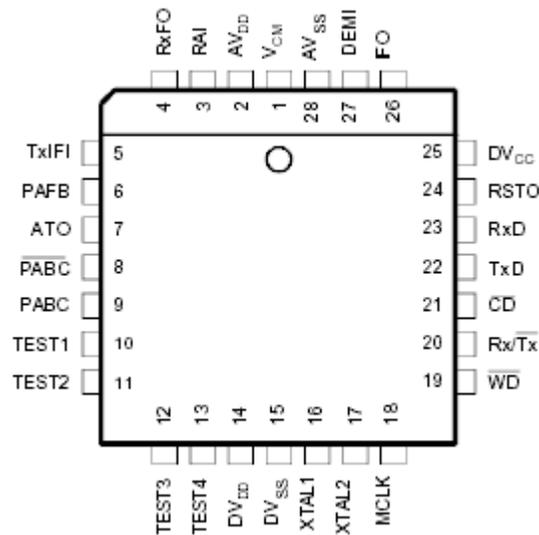


Figura 2.10 Configuración de pines.

- MODEM FSK asincrónico Half Duplex, con velocidad de transmisión de datos de 2400bps.
- El ST7537HS1 es compatible con el estándar EN 50065-1 de CENELEC y especificaciones de la FCC.
- Frecuencia Portadora de 132.45KHz, sintetizada de un cristal externo.
- Baja distorsión en la señal de transmisión.
- Sensitividad en Recepción mayor a 1mV_{RMS}.
- Detección de portadora.

- Entrada Watch Dog.
- Amplificador de Potencia BIAS controlado por corriente (Alta Impedancia en modo de recepción).
- Ajuste de la detección de portadora programable (Permite demodulación en un nivel bajo de recepción, típicamente 1mV_{RMS}).
- Operación con dos fuentes de potencia: 10V y 5V para la interfaz digital con un microcontrolador.

2.2.1.1. Sección de Transmisión.

Las frecuencias de transmisión básicas que son sintetizadas a partir de un cristal de 11.0592MHz y cuya precisión es la misma del cristal son:

Frecuencia de Tx de un 0 = 133.05KHz

Frecuencia de Tx de un 1 = 131.85KHz

El modo de transmisión es puesto cuando $Rx/Tx_{\text{neg}} = 0$; si Rx/Tx_{neg} es mantenida en 0 por mas de 1 segundo el dispositivo conmutará automáticamente a modo de recepción. Una nueva activación del modo de transmisión requiere que Rx/Tx_{neg} sea retornado a 1 por al menos $2\mu\text{s}$, antes de ser puesto en 0. En este modo la señal recepción de datos (RxD), es puesta en 1.

La señal modulada proveniente del modulador FSK es filtrada por un filtro pasa banda de condensador conmutado (pasa banda de Tx), con el fin de limitar el espectro de salida y reducir el nivel de las componentes armónicas. La última etapa de la transmisión consiste de un amplificador operacional que requiere una señal de realimentación (PAFB) desde el amplificador de potencia como se muestra en la *Figura 2.11*.

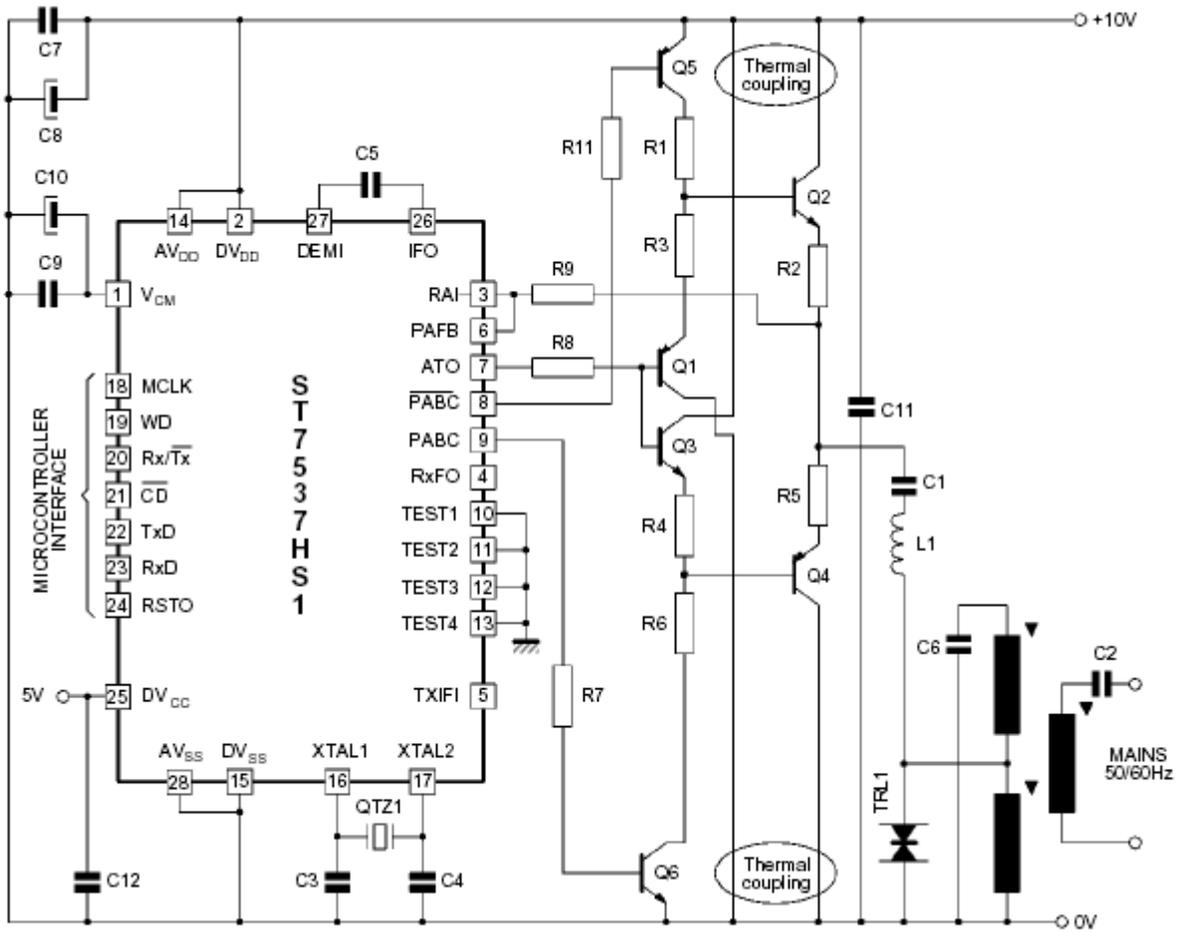


Figura 2.11 Diagrama Circuital de Aplicación.

2.2.1.2. Sección de Recepción

Es activa cuando $Rx/Tx_{neg} = 1$. La señal de Recepción es aplicada al pin RAI y filtrada por un filtro pasa banda de condensador conmutado (pasa banda de Rx), centrado en la frecuencia portadora, y cuyo ancho de banda es de alrededor de 12KHz.

La salida del filtro es amplificada por una etapa de ganancia de 20dB, que provee limitaciones simétricas para voltajes grandes. La señal resultante es convertida a una frecuencia más baja por un mezclador, que recibe una señal sintetizada por el bloque del modulador FSK. Finalmente un filtro pasa banda de frecuencia intermedia (pasa banda

IF), con frecuencia central de 5.4KHz mejora la relación señal a ruido, antes de entrar al demodulador FSK.

El acople entre la salida del filtro de frecuencia intermedia (IFO) y la entrada del demodulador FSK (DEMI), es hecha por un condensador externo (C5 100nF \pm 10%, 10V), que cancela la ruta del voltaje offset de recepción. La salida RxD entrega la señal demodulada si la señal de detección de portadora (CDneg) esta en bajo y es colocada en alto si CDneg = 1. RxD puede entregar la señal demodulada sin importar el estado de CDneg si Rx/Txneg = 1 y TxD = 0 (Ver *Figura 2.12*).

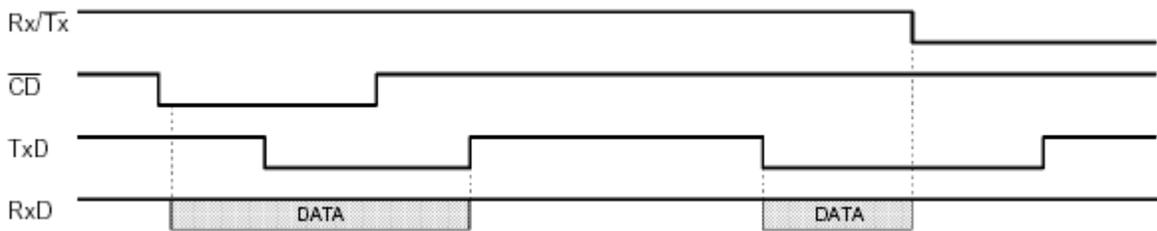


Figura 2.12 Diagrama de Tiempos de Datos.

2.2.1.3. Funciones Adicionales

2.2.1.3.1. Base de Tiempo

La sección de base de tiempo entrega todos los relojes internos a partir del cristal oscilador (11.0592MHz). El cristal es conectado entre los pines XTAL1 y XTAL2 y requiere de dos condensadores externos C3 y C4 (22pF \pm 10%, 10 V).

2.2.1.3.2. Reset y Watch Dog

La salida reset (RSTO) es llevada a alto cuando el voltaje de fuente es menor que Vrh (típicamente 7.6 V), con una histéresis Vrh - Vrl (típicamente 300mV) o cuando ninguna

transición negativa ocurre en la entrada Watch Dog (WDneg) por más de 1.5 seg. (Ver *Figura 2.13*). Cuando un reset ocurre, RSTO es mantenida en alto por al menos 50ms.

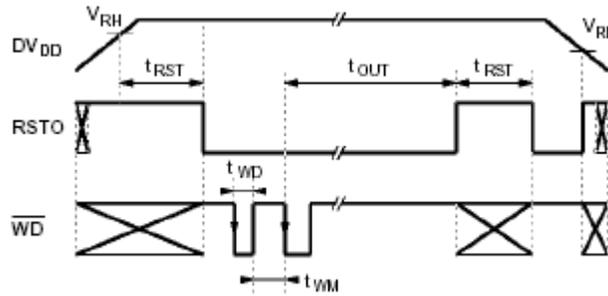


Figura 2.13 Diagrama de tiempo de Reset y Watch dog.

2.2.1.3.3. Detección de Señal

La salida de Detección de Portadora (CDneg) es llevada a bajo cuando la amplitud de la señal de entrada en RAI es mayor que VCD por al menos TCD (6ms. típicamente, ver *Figura 2.14*). Cuando la señal de entrada desaparece o se vuelve menor que VCD, CDneg es mantenida en bajo por al menos TCD antes de volver a alto. VCD es el voltaje de umbral de detección de portadora, que es establecido internamente para detectar 5mVRMS generalmente.

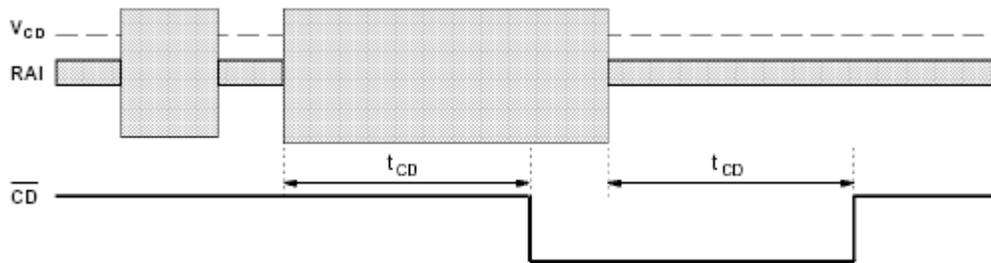


Figura 2.14 Diagrama de tiempo de detección de portadora.

2.2.1.3.4. Amplificador de potencia externo con control BIAS

Dos salidas digitales dedicadas (PACB y PACB_{neg}) entregan una señal entre 0V y 10V son llevadas a bajo y alto respectivamente, cuando el circuito es colocado en el modo de recepción ($Rx/Tx_{neg} = 1$), o cuando el tiempo límite del modo de transmisión (1 seg.) es excedido; al mismo tiempo la salida ATO es puesta en estado de alta impedancia.

2.2.2. ETAPA DE AMPLIFICACIÓN

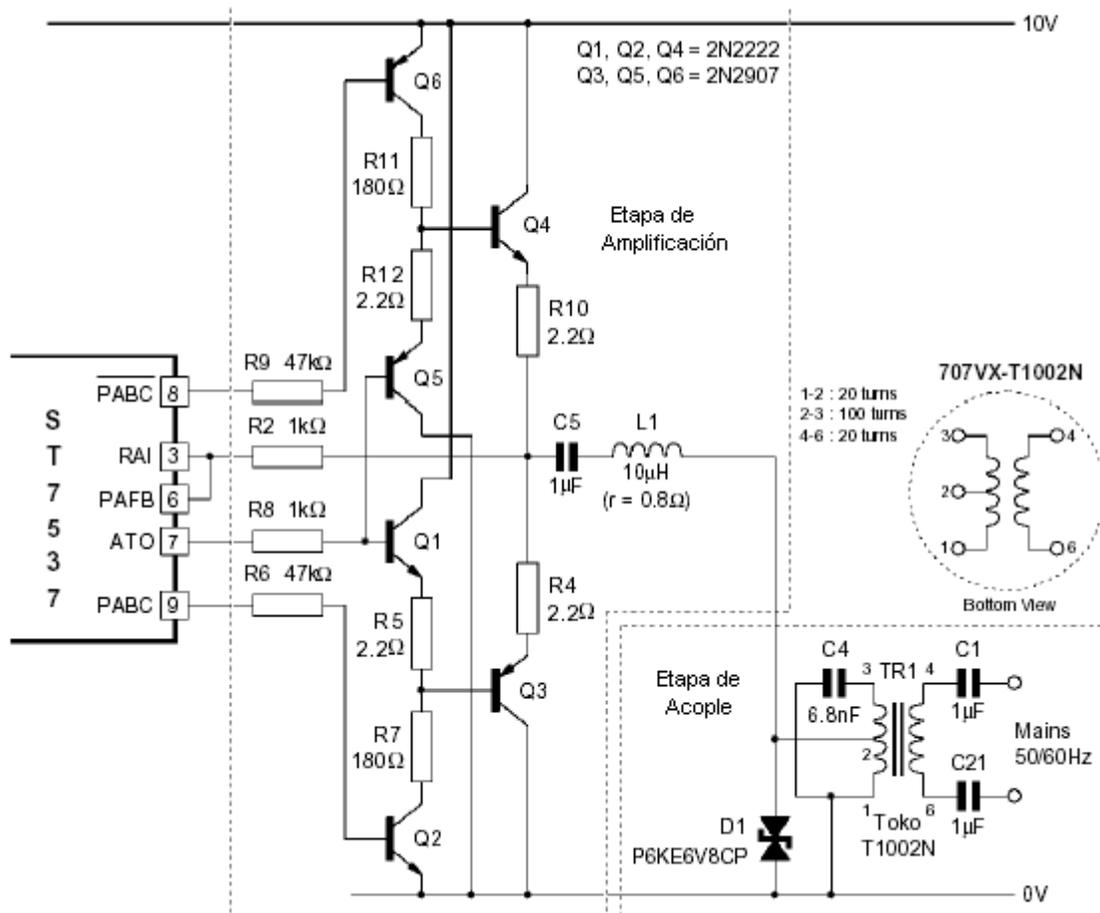


Figura 2.15 Esquema de amplificación y acople.

Esta etapa tiene la función de amplificar la señal de salida del modulador (Figura 2.15). Primero un amplificador en modo push-pull ha sido establecido con dos transistores

bipolares Q4 (2N2222) y Q3 (2N2907). Este tipo de transistores se escogen por ser baratos y ampliamente usados.

Las resistencias R4, R5, R10 y R12 se colocan en los emisores de Q5, Q4, Q1 y Q3 en aras de definir la corriente del voltaje de polarización independientemente de la diferencia entre los transistores. El amplificador push-pull es polarizado con dos amplificadores en configuración colector común, conformados por Q1 y Q5. En lo que se refiere a las resistencias R7 y R11 (180Ω), su valor se ha definido para obtener las mejores respuestas de los amplificadores, para de esta manera, definir la corriente del voltaje de polarización del sistema.

Los transistores bipolares Q2 (2N2222) y Q6 (2N2907) son colocados para deshabilitar el amplificador de potencia durante el modo de recepción, esto gracias a las señales de salida del ST7537 PABC y PACB_{neg}, las cuales siguen el modo Rx/Tx_{neg}.

Con la finalidad de evitar fugas térmicas es obligatorio conectar disipadores de calor a los transistores Q1/Q4 y Q3/Q5. Consecuentemente ambos transistores tendrán la misma temperatura

Las principales características de esta etapa son:

- Ganancia de voltaje = 1
- Alta impedancia de entrada
- Baja impedancia de salida

2.2.3. ETAPA DE ACOUPLE

En aras de adaptar la etapa de amplificación a la línea, un transformador es usado (*Figura 2.15*). Este transformador tiene las siguientes funciones:

- Aislar el resto del circuito de la red eléctrica.
- Colocar la señal a transmitir en la red eléctrica.
- Extraer en recepción la señal de la red eléctrica.
- Filtrar la señal de 60Hz proveniente de la red eléctrica.
- Filtrar los armónicos de la señal a transmitir.

El transformador a usar es el TOKO T1002N. Este tiene dos embobinados primarios y un secundario. La relación de estos embobinados son 4:1:1. El primario del transformador es usado para crear un filtro pasabanda. La frecuencia de resonancia es establecida a la frecuencia de transmisión a través de C4. Este capacitor está en paralelo con el embobinado del primario. La inductancia equivalente para el primario y el secundario puede ser calculada de acuerdo a lo siguiente:

$$L_{eq} = L_{1t} + L_{2t} + 2M$$

$$M = k * \sqrt{L_{1t} * L_{2t}}$$

Con los valores dados:

$$k = 1/2^{1/2}$$

$$M = (9.4\mu\text{H} * 140\mu\text{H}/2)^{1/2} = 25.7\mu\text{H}$$

$$L_{eq} = 200.7\mu\text{H}$$

La frecuencia de resonancia de esta red LC depende de C4 y de la inductancia equivalente L_{eq} , por lo tanto:

$$Fres = \frac{1}{2\pi\sqrt{Leq * C4}}$$

$$C4 = \frac{1}{Leq(2\pi * Fres)^2}$$

Para la frecuencia de trabajo 132Khz se obtiene un valor para C4 de 7.2nF, por lo cual se escoge 6.8nF como el valor más cercano que se encuentra en el mercado. El capacitor C4 debe ser lo suficientemente lineal, con el fin de evitar distorsión armónica.

Con el fin de filtrar la señal de 60Hz de la red, es usado el capacitor C1. Este capacitor filtra las bajas frecuencias y deja pasar las altas frecuencias. Es conveniente usar un capacitor clase X2, el cual tiene protección contra corto circuito, lo cual es absolutamente necesario. De hecho si un corto circuito ocurre y no se dispone de la protección adecuada, el filtraje de los 60Hz se pierde y con seguridad puede ocasionar daños al resto del circuito.

Como una protección final contra picos de voltaje un supresor de picos es usado (TRL 1). Este es un supresor bidireccional de 6.8V. Si un voltaje mayor de 6.8V aparece, el voltaje entre los pines del sistema se establecerá a 6.8V, protegiendo las otras partes del circuito de los sobrevoltajes.

La resistencia R1 se coloca para descargar al capacitor C1 después de desconectar el circuito de la red eléctrica. Sin esta resistencia, C1 no estará descargado y una descarga se puede presentar si alguien toca el conector a la red eléctrica o los mismos pines de este capacitor.

3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE LABORATORIO

3.1. ADAPTACIÓN DEL MODELO SELECCIONADO

3.1.1. TRANSMISOR Y RECEPTOR

Luego de seleccionar el prototipo según se mostró anteriormente, se procedió a realizar el montaje del sistema con base en el diseño presentado en el numeral 2.2. Para la realización de las pruebas de campo, se optó por fijar el sistema en modo unidireccional, ya que no se requería de un sistema bidireccional. Para tal efecto, se estableció la configuración en los pines de control del sistema que se muestra en la *Figura 3.1*

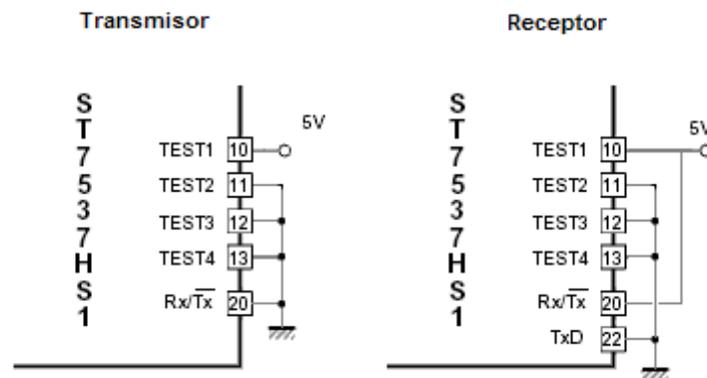


Figura 3.1 Configuración del sistema en modo unidireccional.

Para realizar las pruebas de transmisión en primera instancia y verificar que se estuviese efectuando la modulación de forma correcta, se utilizó una señal de baja frecuencia, generada por un oscilador a base de un LM555, como entrada (la *Figura 3.2* muestra el

modelo), para posteriormente ser modulada, enviada a través del medio de transmisión⁴ y por último, ser demodulada en el extremo receptor, de tal manera que la señal recibida fuera detectable a simple vista por medio de un LED, por consiguiente, esta prueba permitió igualmente, comprobar el funcionamiento del extremo receptor.

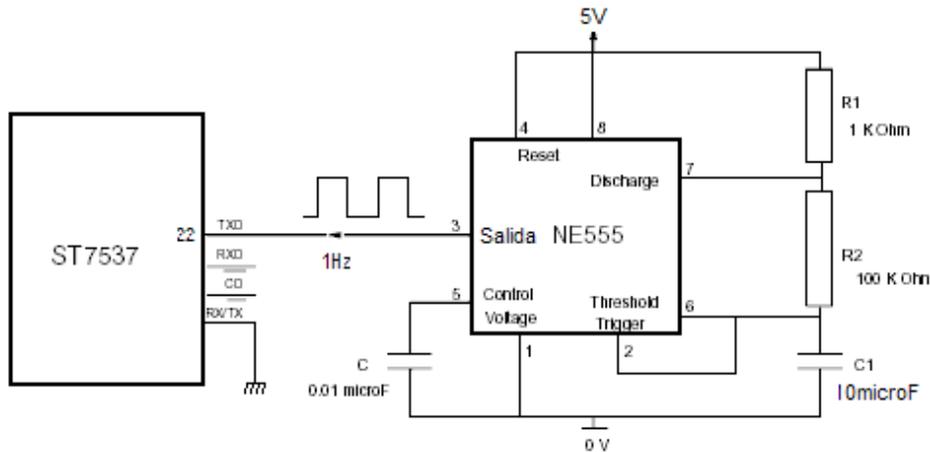


Figura 3.2 Generador de la señal de entrada de baja frecuencia.

Haciendo uso de esta señal de baja frecuencia como entrada para el transmisor, se comprobó la señal de salida del modulador, con el fin de obtener la forma de onda a la salida de este, la cual se muestra en la *Figura 3.3*.

Con la ayuda del osciloscopio, se verificó que esta señal de salida cambiaba cada vez que había un cambio de estado en la señal de entrada, presentando para el estado alto una frecuencia de 132Khz y para el estado bajo una frecuencia de 133Khz. En la portadora se obtuvieron 8.5Vpp y 5mA de corriente a la salida del modulador. El voltaje no tenía problemas, pero debido a que la corriente era muy baja, fue necesaria la etapa de amplificación antes mencionada.

⁴ El medio de transmisión en esta ocasión no hace referencia a la red eléctrica, pues hasta ese momento no se había realizado el montaje de la etapa de amplificación ni de la etapa de acople a la red.

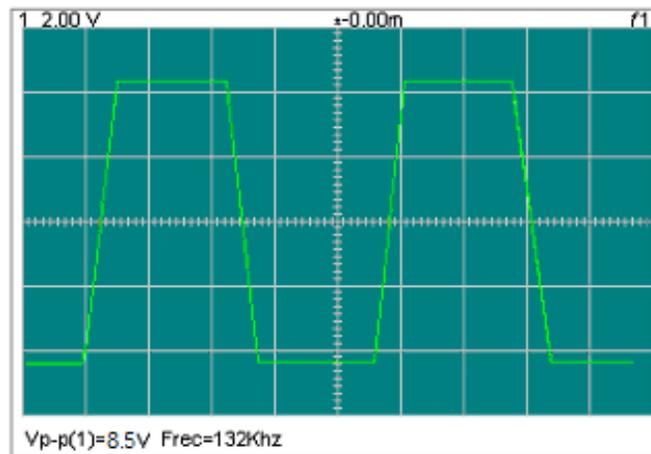


Figura 3.3 Forma de onda a la salida del modulador.

Después de la etapa de amplificación, la forma de onda de la señal es la que se muestra en la *Figura 3.4*, donde se observa una pequeña distorsión en la señal, especialmente un poco de atenuación en los picos, lo que es debido a un ligero desvío del punto Q de operación de los transistores utilizados, pero que no influye sustancialmente en el desempeño del sistema.

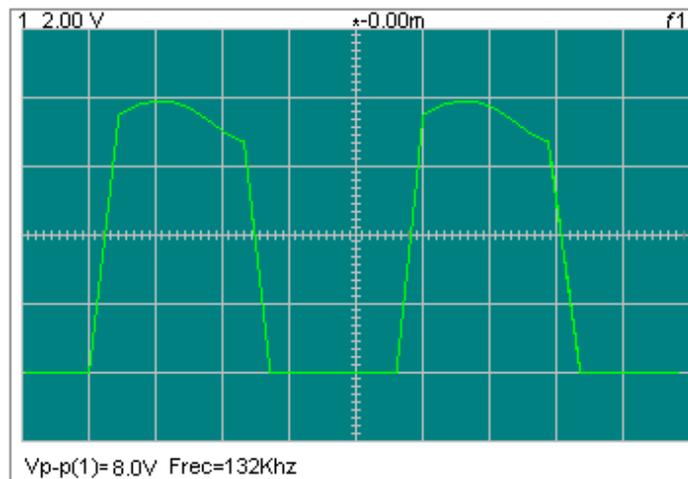


Figura 3.4 Forma de onda después de la amplificación de corriente.

Durante la implementación de la etapa de acople a la red, surgió el primer tropiezo serio, pues fue imposible encontrar el transformador TOKO T1002N (seleccionado en el capítulo

anterior), en el mercado nacional, por lo cual se procedió a construir bobinas con núcleo de ferrita para conformar un circuito tanque que resonara a la frecuencia de la portadora, reemplazando así el transformador.

El valor de la bobina a construir se calculó utilizando la expresión matemática para la frecuencia de resonancia de un circuito tanque:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Donde la frecuencia de resonancia es conocida y se considera un valor comercial de C.

Con $f = 132\text{Khz}$ y asumiendo $C = 100\text{nF}$, se obtuvo un valor de $L = 14\mu\text{H}$.

Para la construcción de la bobina, se utilizó la siguiente fórmula:⁵

$$L[\mu\text{H}] = \mu_r \frac{1.257\pi n^2 R^2}{10^8 \ell}$$

n = número de vueltas

R = radio de la bobina en cm

ℓ = longitud del bobinado en cm

μ_r = permeabilidad del ferrita

Con los siguientes valores: $L = 14\mu\text{H}$, $R = 0.3\text{cm}$, $\ell = 2\text{cm}$ y $\rho \approx 10$ se obtuvo para n el valor de 76 vueltas. Con este valor se construyó la bobina, se hicieron algunas pruebas y estos fueron los resultados.

- Con la ayuda del osciloscopio y utilizando señales de diferentes frecuencias, se comprobó que el circuito no estaba resonando a la frecuencia deseada.
- El circuito permitía el paso de frecuencias bajas cercanas a los 60Hz.

⁵ Tomada de la revista Saber Electrónica No7

- El valor de la bobina presentaba un alto porcentaje de error, lo cual hacía que no operara correctamente el circuito resonante.

Debido a estos resultados, se decidió descartar las bobinas construidas manualmente pues estas no cumplían con los requerimientos de calidad y porcentaje de error mínimos para la utilización en el sistema.

Al hacer la evaluación de otras alternativas de solución con mejores proyecciones, se decidió volver a utilizar transformadores de acople que además, permiten tener un aislamiento total entre el circuito del sistema y la red eléctrica. Inicialmente se pensó en utilizar transformadores de frecuencia intermedia que se encuentran fácilmente en los receptores de radio, pero fueron descartados ya que operan en el rango de los 450Khz.

Finalmente se utilizó un tipo de transformador que se encuentran fácilmente en las distribuidoras de componentes electrónicos nacionales. Este tipo de transformador tiene cubierta azul y en su parte superior tiene grabado el número 39999 que indica la referencia de pedido del mismo (Ver *Figura 3.5*).

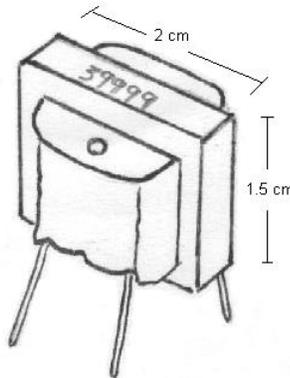


Figura 3.5 Transformador de acople.

Con la ayuda de un inductómetro se encontró un valor de 1.5mH para la inductancia nominal del primario del transformador. Con este valor y utilizando nuevamente la formula para la frecuencia de resonancia, se obtuvo un valor de 1nF para el capacitor del circuito resonante. Utilizando la señal portadora como entrada en el primario del transformador se verificó la forma de onda en el secundario como lo indica la *Figura 3.6*.

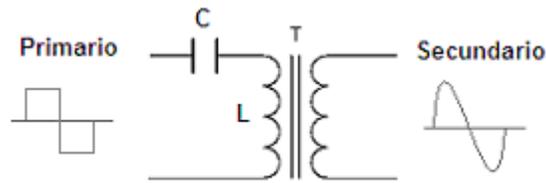


Figura 3.6 Diagrama esquemático de la etapa de acople a la red.

La señal que se obtuvo a la salida del transformador, es decir en el secundario, sin ser conectado a la red, tenía la forma mostrada en la *Figura 3.7*.

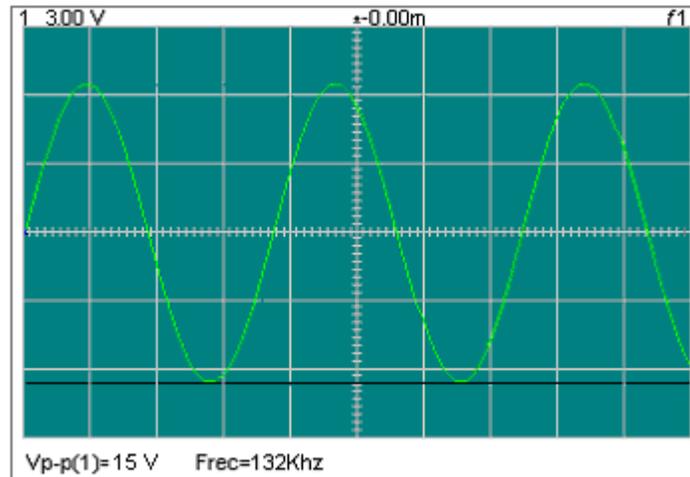


Figura 3.7 Forma de onda a la salida del transformador de acople.

El transformador convertía la señal en una onda senoidal y elevaba la señal hasta aproximadamente 15Vpp, con lo cual se dedujo que el transformador era de relación 1:2, de acuerdo a la siguiente relación:

$$N_1/N_2 = E_1/E_2 \Rightarrow 1/2 \approx 8/15$$

3.1.2. INTERFAZ CON EL COMPUTADOR

Para la comunicación serial con el computador, se hizo uso únicamente de los pines 2 (Transmisor), 3 (Receptor) y 5 (Tierra), de la interfaz RS-232.

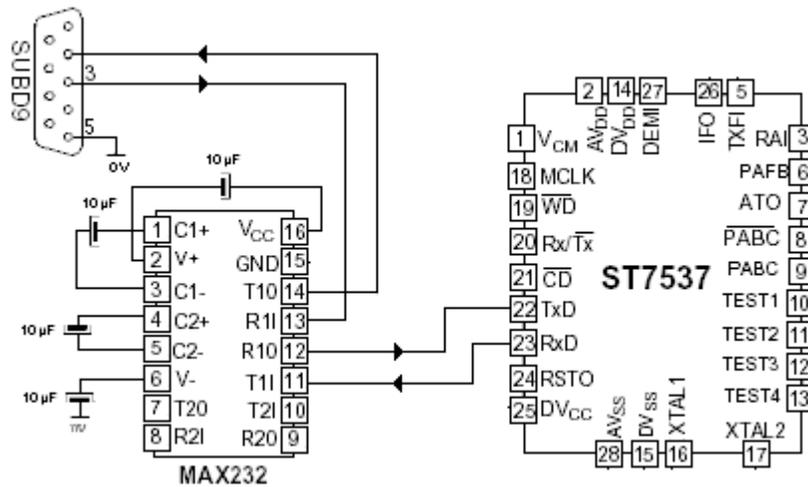


Figura 3.8 Etapa de comunicación serial.

Terminado el desarrollo de todas las etapas del sistema, incluida la interfaz con el computador, se conectó directamente transmisor y receptor y se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Utilizando un solo computador se conectó el transmisor al puerto COM1 y el receptor al puerto COM2.
- Se Colocaron en marcha los programas de transmisión y recepción respectivamente⁶.
- Se envió el archivo de prueba.

⁶ Los programas de Transmisión, Recepción, el calculador de BER y el archivo de prueba serán explicados extensamente en el siguiente numeral.

- Se ejecutó el programa de medición de BER.

Tras haber realizado el anterior procedimiento, se encontró un BER muy alto, por lo cual se verificó el archivo recibido, el cual no correspondía con el esperado, resultado bastante alarmante, puesto que el transmisor y el receptor estaban conectados directamente y fuera de la red eléctrica.

Debido a este problema, se procedió a una verificación del manual del MODEM y se encontró que para las comunicaciones seriales con un computador, el MODEM necesitaba una entrada de reloj (1Khz) para sincronización, aplicada al pin 19, que se implementó con un oscilador LM555 (Ver *Figura 3.9*).

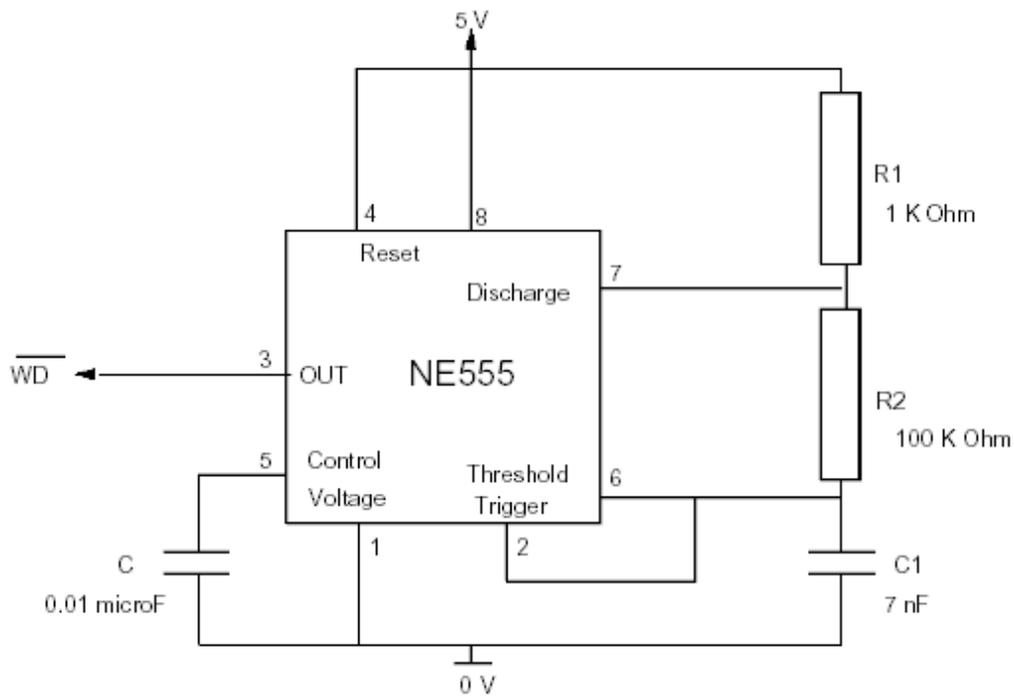


Figura 3.9 Entrada de reloj para el MODEM.

Después de incorporar este módulo se obtuvo la respuesta esperada en la transmisión, lo que implica un BER = $0.0 \cdot 10^{-5}$, es decir 0 errores en 100.000 bits, con lo que se dio por terminada la verificación del sistema fuera de la red.

Posteriormente, se efectuó una prueba sencilla sobre la red eléctrica, utilizando como señal moduladora la señal de baja frecuencia del oscilador LM555 antes mencionado. Estas pruebas se realizaron sobre una distancia aproximada de 15m en entorno residencial. A esta distancia la señal era demodulada correctamente en el extremo receptor. Luego de esta prueba, se realizó el cálculo de BER usando los programas respectivos, y se obtuvo una BER de $0.0 \cdot 10^{-5}$.

También se realizaron pruebas con la señal de entrada de baja frecuencia en toda la casa, y se verificó que en todos los puntos de la casa, la recepción de la señal era adecuada.

3.1.3. ALIMENTACIÓN

Con la finalidad de hacer mucho más versátil el sistema y deshacerse de fuentes externas, se decidió conformar una etapa que brindara alimentación propia al circuito. Dicha etapa está conformada por un transformador de relación 1:12 que reduce los 120 Voltios AC a 10 Voltios AC, un puente de diodos, dos capacitores para reducción de rizado y finalmente dos reguladores de voltaje de 5V y -5V respectivamente. Con la utilización de dos reguladores se obtienen 10V para la alimentación analógica y 5V para la alimentación digital del MODEM como lo muestra el diagrama de la *Figura 3.10*.

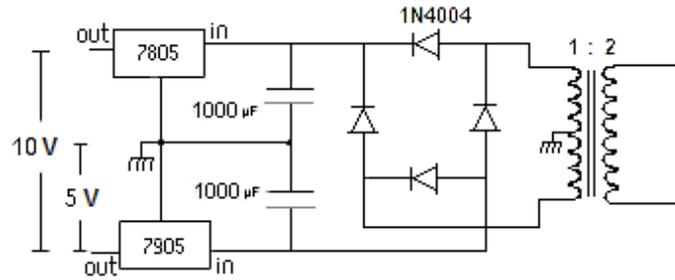


Figura 3.10 Etapa de alimentación propia del sistema.

3.1.4. DIAGRAMAS ELÉCTRICOS FINALES.

La *Figura 3.11* muestra el diagrama eléctrico final del transmisor y la *Figura 3.12* muestra el diagrama eléctrico final del receptor. Con estos modelos se realizaron las pruebas de campo, que se explican más adelante.

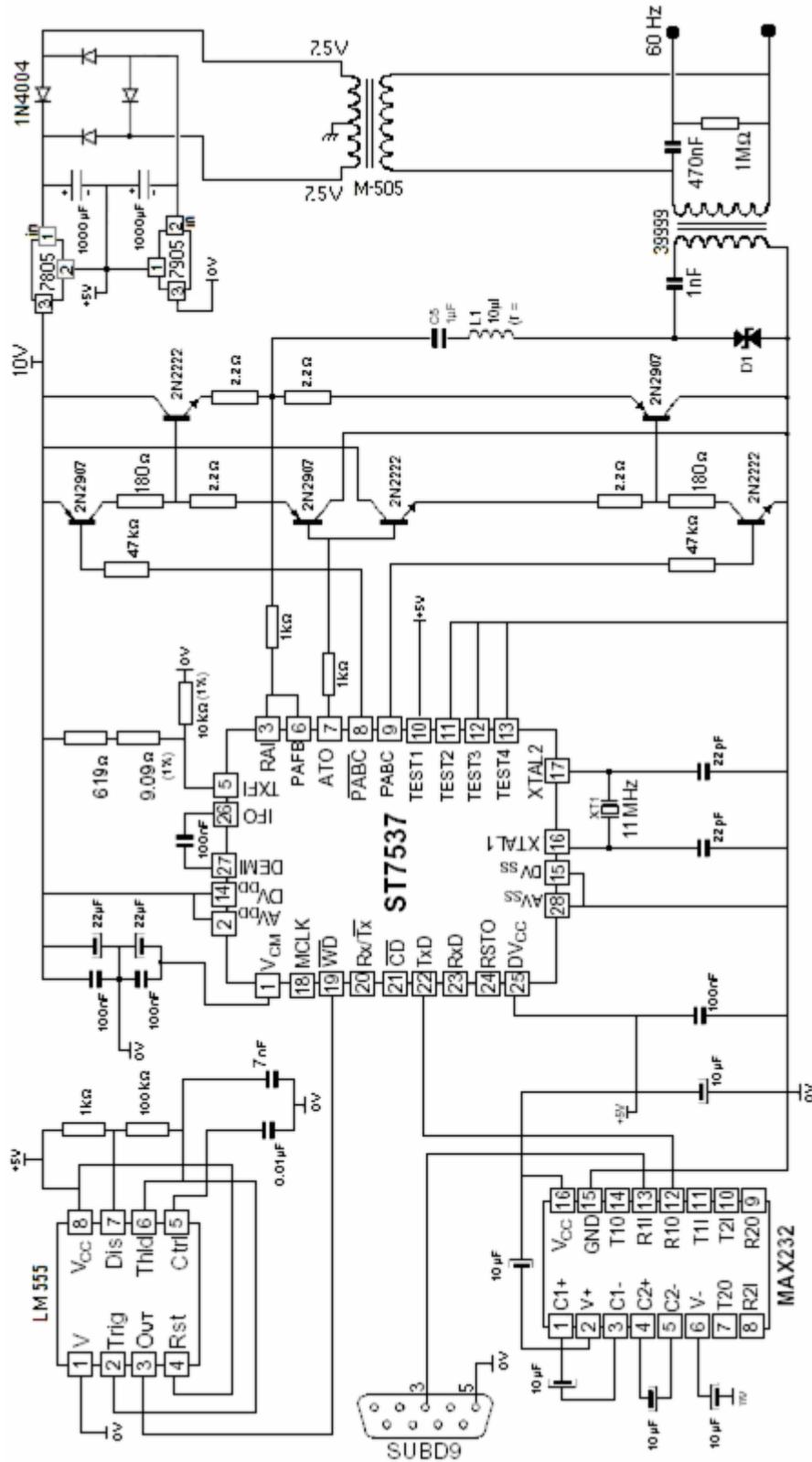


Figura 3.11 Diagrama eléctrico final del transmisor.

3.1.5. COSTO DEL PROTOTIPO

El presupuesto que se muestra en la tabla 3.1 se determinó teniendo en cuenta solamente el costo de los componentes de cada uno de los módulos transmisor y receptor. Presenta un valor global para el sistema desarrollado. En este punto es bueno aclarar que el costo de los Modems es tan alto debido a que fueron comprados en el exterior, y los gastos de envío resultan muy elevados, pero este costo por unidad se reduce al aumentar la cantidad de unidades compradas.

Descripción	Referencia	Cantidad	Valor unitario (\$)	Total (\$)
MODEM	ST7537	2	115.000	230.000
Interfase	MAX 232	2	2.000	4.000
Oscilador	LM 555	2	800	1.600
Regulador	LM 7805	2	1.000	2.000
Regulador	LM 7905	1	1.000	1.000
Transistor	2N2222	4	600	2.400
Transistor	2N2907	3	600	1.800
Diodo	1N4004	4	100	400
Transformador	M-505	1	6.500	6.500
Transformador	39999	2	2.000	4.000
Cristal	KDSK7	2	2.000	4.000
Capacitor Cerámico	100nF	8	100	800
Capacitor	24pF	4	100	400
Capacitor Electrolítico	10 μ F	10	100	1.000
Capacitor Electrolítico	2,2 μ F	4	100	400
Capacitor Electrolítico	100 μ F	1	200	200
Capacitor Cerámico 120V	2,2nF	2	300	600
Capacitor Cerámico 120V	470nF	2	400	800
Resistencia	1/2 Vatios	23	100	2.300
Resistencia	5 Vatios	1	400	400
Adaptador DSM a DIP	PL-28	2	24.000	48.000
COSTO TOTAL DEL SISTEMA				\$ 312.600

Tabla 3.1 Presupuesto de implementación del prototipo.

3.2. HERRAMIENTAS PARA LAS MEDICIONES DE BER

Con el objeto de efectuar las mediciones de BER, se desarrollo una herramienta software, que permite hacer la verificación bit a bit, de la información en el extremo receptor; para esto, es necesario conocer la información transmitida en el origen, por lo cual, la información a transmitir para el desarrollo de esta prueba, debe ser un patrón de bits seudo aleatorio y repetitivo, que se puedan verificar en el receptor. El patrón de bits seleccionado es el siguiente:

01100101 01111101 00100011 01011001 01110110

Esta secuencia seudo aleatoria de 40 bits, utilizada para el calculo de la tasa de errores de bit, corresponde en decimal a los números 101, 125, 35, 89 y 118; en ASCII, representa los siguientes caracteres: “e” “}” “#” “Y” y “v”.

El software de verificación de la información para la detección de errores, tiene las siguientes características técnicas:

- Condiciones de Transmisión: Puesto que se busca calcular la BER, la información a transmitir debe estar libre de métodos de detección y/o corrección de errores, ya que son precisamente los errores que se presenten, el objeto de nuestro interés.
- Información Verificable: Se verifica únicamente la información útil, recibida, previamente almacenada en un archivo en el extremo receptor.
- Resolución de Error: El software analiza un volumen total de 100.000 bits, esto permite que la detección mínima de error sea de 1 bit erróneo en 100.000 bits recibidos, es decir, una resolución de BER de $1.0 \cdot 10^{-5}$.
- A una velocidad de transmisión, de 1200 bps, la transmisión de este volumen de información tarda cerca de 93 segundos, es decir minuto y medio.

El desarrollo de la herramienta se realizó en dos partes, se desarrolló un programa en lenguaje C, para el chequeo de errores, pues este lenguaje, por ser de bajo nivel, permite efectuar la manipulación de la información nivel de bit. La *Figura 3.13*, muestra la pantalla de salida de esta herramienta.



```
C:\BER.EXE
CALCULADOR DE TASA DE ERROR DE BIT
BIT ERROR RATE CALCULATOR
2002

NUMERO DE BITS RECIBIDOS CON ERROR: 0
NUMERO TOTAL DE BITS TRANSMITIDOS: 100.000

Para Salir de este proceso presione la tecla ESC
_
```

Figura 3.13 Pantalla de salida del Calculador de Tasa de Error de Bit.

Para la parte encargada de efectuar la transmisión de la información a través del puerto serial del computador en un extremo, y de recibir esta información y almacenarla en un archivo en el otro, se desarrollo un programa en Visual Basic, que facilita esta labor, pues al ser un lenguaje de alto nivel, permite el manejo del puerto serial a través de un controlador y solo es necesario configurar el puerto desde el software, con las características deseadas que son:

- Puerto Serial: COM1
- Velocidad de Transmisión: 1200bps.
- Paridad: Sin paridad.
- Bits de Información: 8 bits de información.
- Bits de Parada: 1 bit de parada.

Existen versiones alternativas que utilizan en recepción el puerto COM2 y/o que permiten velocidades de transferencia de 2400bps. Las aplicaciones de Transmisión y Recepción son independientes, las ventanas de presentación se muestran a continuación en la *Figura 3.14* y la *Figura 3.15* respectivamente.

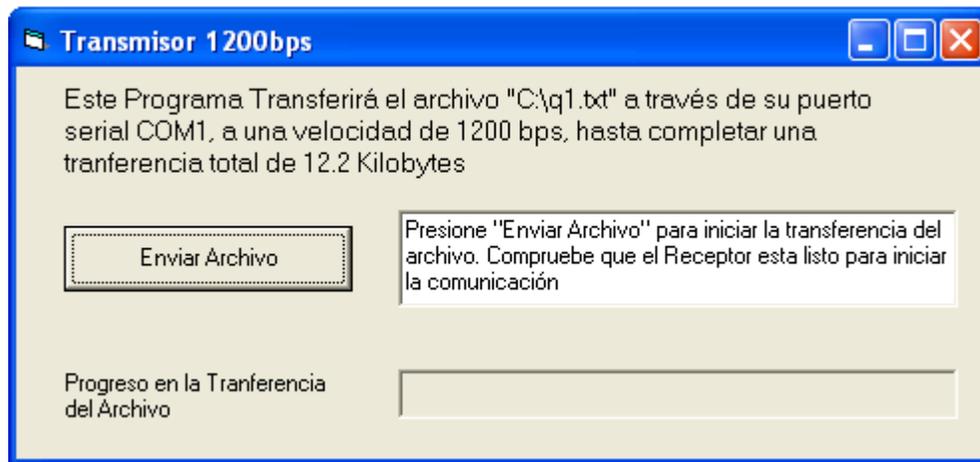


Figura 3.14 Ventana del Programa Transmisor.

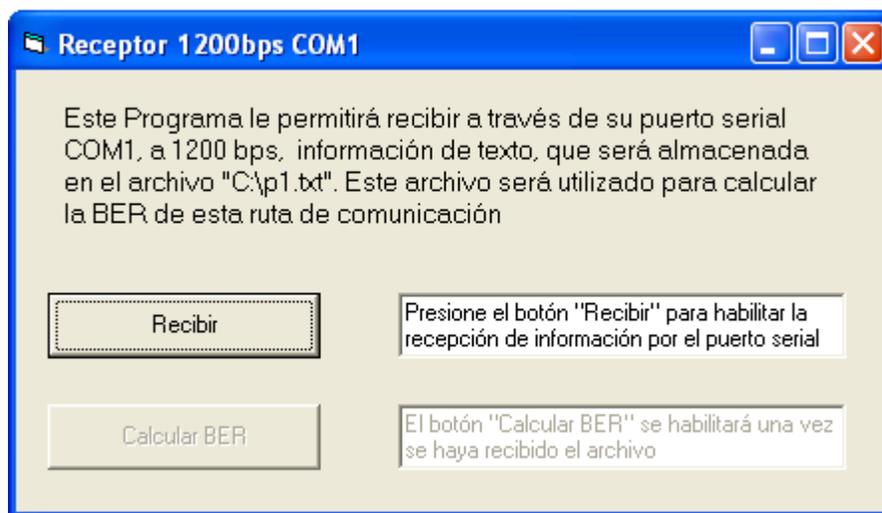


Figura 3.15 Ventana del programa Receptor.

Desde esta ventana y una vez se haya recibido el archivo, se puede ejecutar el programa en C, pulsando "Calcular BER", que inicialmente esta deshabilitado, pero que se habilita al terminar la recepción del archivo.

3.3. PRUEBAS DE ESCRITORIO

Las pruebas de escritorio tienen como objetivo primordial, el establecimiento de algunos valores aproximados del comportamiento de la red, ante diversas configuraciones, distancias a cubrir y parámetros de red, principalmente en lo referente a atenuación, que nos sirvan de guía para la realización de las pruebas de campo, así como de referencia para establecer valores esperados en el desarrollo de estas, y posteriormente para calcular valores estimados, obtenidos, coeficientes de error etc.

3.3.1. ENTORNO DE SIMULACIÓN

Para la realización de estas pruebas de escritorio, fue seleccionado MATLAB 6.0, pues este paquete, tiene una herramienta de simulación para líneas de potencia. Para acceder a esta herramienta, se debe ingresar al Simulink y seleccionar el Power System Blockset, tal como se muestra en la *Figura 3.16*.

Una vez en el Power System Blockset, podemos introducir los elementos que necesitamos para efectuar la simulación que son principalmente, las líneas de parámetros distribuidos, la fuente de señal y los elementos de medición.

Los parámetros que se manipulan en la realización de esta simulación son los pertenecientes a las líneas de parámetros distribuidos, que son los siguientes:

- Número de fases.
- Frecuencia Utilizada para la especificación R L C [Hz].
- Resistencia por unidad de Longitud [Ohmios/Km].

- Inductancia por unidad de Longitud [H/Km].
- Capacitancia por unidad de Longitud [F/Km].
- Longitud de la Línea [Km].

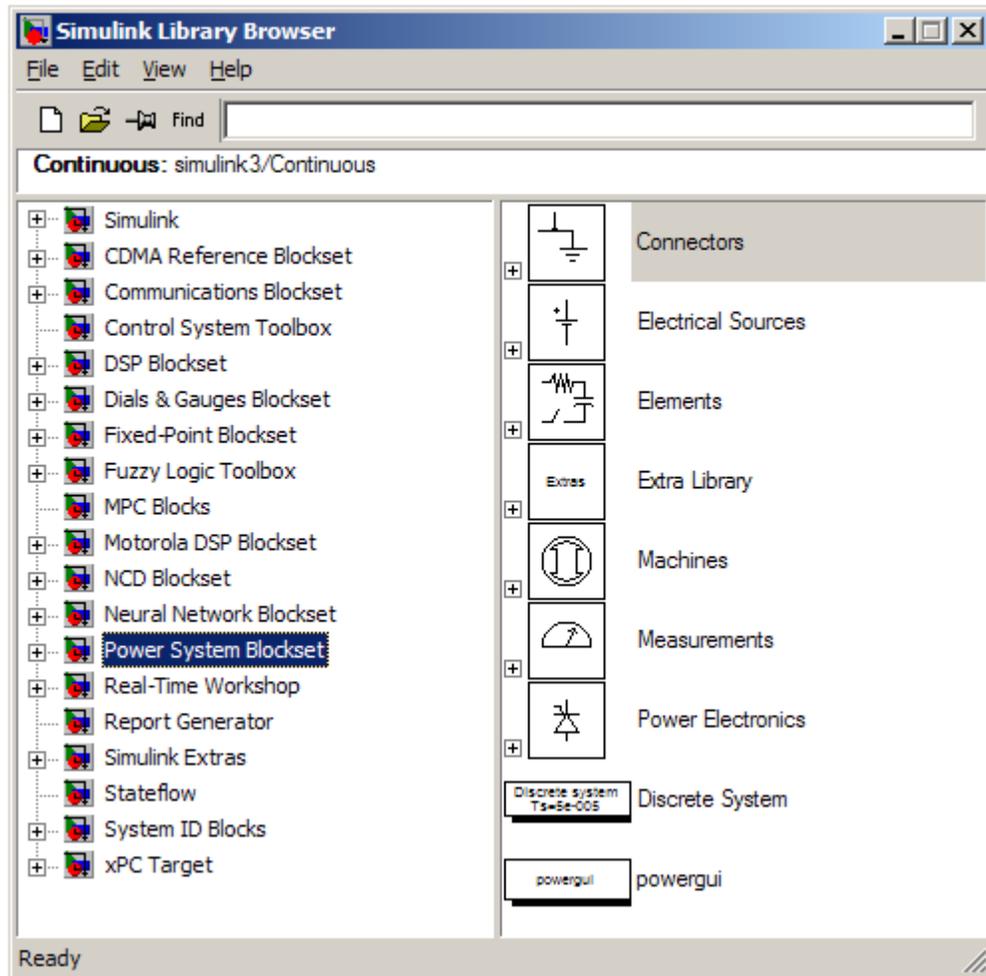


Figura 3.16 Directorio del Power System Blockset.

3.3.2. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Para establecer los parámetros de la red de distribución eléctrica, se utilizaron las formulaciones matemáticas, establecidas para las líneas de transmisión de parámetros distribuidos.

3.3.2.1. Resistencia Kilométrica

$$R_k = \frac{10\rho}{S} \Omega/Km$$

Donde:

ρ = Resistividad a 20° C, en microhmios centímetro cuadrado por centímetro.

S = Sección del conductor, en milímetros cuadrados.

Esta ecuación es válida para bajas frecuencias, pero a altas frecuencias, deben considerarse las consecuencias del efecto pelicular. Por ello usamos la siguiente expresión:

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$$

Con esta ecuación podemos establecer una relación entre la resistencia a bajas frecuencias y la resistencia en altas frecuencias, de la siguiente forma:

$$\frac{R_{frecuencia_1}}{R_{conocida}} = \sqrt{\frac{\omega_{frecuencia_1}}{\omega_{conocida}}} = \sqrt{\frac{frecuencia_1}{f_{conocida}}}$$

Puesto que μ y σ son constantes. La relación entre resistencias la podemos escribir entonces, de la siguiente manera:

$$R_{frecuencia_1} = \sqrt{\frac{frecuencia_1}{f_{conocida}}} * R_{conocida}$$

3.3.2.2. Coeficiente de Autoinducción

$$L_K = \left[\frac{\mu}{2n} + 2 \log_e \frac{D}{r} \right] 10^{-4} \text{ H/Km}$$

Donde:

μ = Permeabilidad Magnética del material

n = Número de subconductores

D = Separación entre los ejes de los conductores en milímetros

r = Radio de los conductores en milímetros

Puesto que $\mu = 1$ para el cobre, el aluminio, aleaciones de aluminio etc. y en este estudio, las pruebas se realizan sobre líneas de un solo conductor, la expresión por lo tanto, se puede escribir así:

$$L_K = \left[0.5 + 4.6 \log \frac{D}{r} \right] 10^{-4} \text{ H/Km}$$

3.3.2.3. Capacitancia o Capacidad por Kilómetro

$$C_K = \left[\frac{24.2}{\log \frac{D}{r}} \right] 10^{-9} \text{ F/Km}$$

Con el significado de la notación ya expuesto.

3.3.3. MODELO DE SIMULACIÓN

En la realización de las simulaciones se utilizó un modelo general de configuración de la red de distribución eléctrica que se muestra en la *Figura 3.17*.

En el cuadro de diálogo en el que se modifican los parámetros de las líneas, se puede seleccionar además el tipo de mediciones que se harán sobre dicha línea. Para las líneas de parámetros distribuidos, solo se puede medir el voltaje entre la fase y tierra, en la entrada y a la salida. En las propiedades del Multímetro, se pueden seleccionar que mediciones de las que hayan sido habilitadas en los diferentes elementos, se realizarán con el Multímetro que se está manipulando.

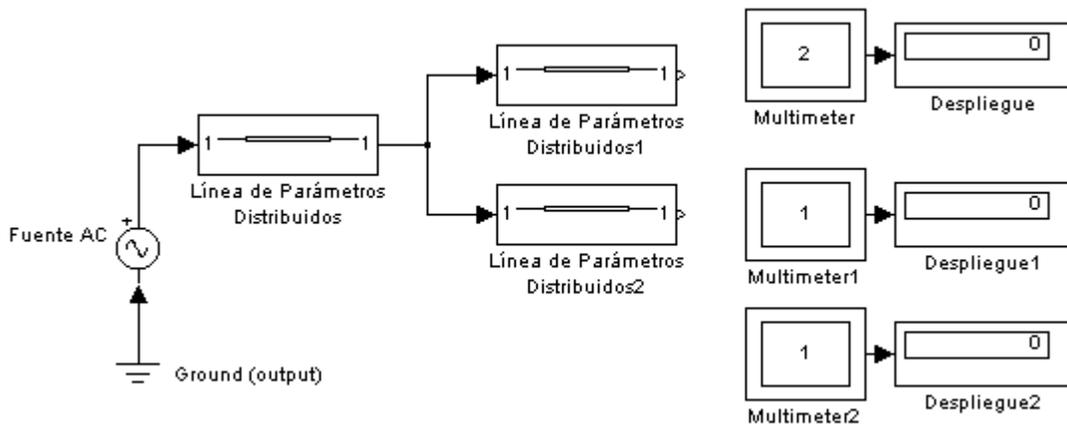


Figura 3.17 Modelo General de la Red de Distribución Eléctrica, usado para las simulaciones.

En el modelo se pueden incluir tantas líneas como se requiera, para analizar el comportamiento de la señal portadora, pero allí se presenta un inconveniente, MATLAB no tiene en cuenta las derivaciones para analizar las caídas en la potencia de la señal, es decir, la división de potencia que se presenta cuando una señal se divide en dos o más rutas, no es simulada por el software, por lo cual, por ejemplo, el comportamiento

simulado por tres trayectos, así existan varias derivaciones desde la entrada del primero a la salida del último, es equivalente al simulado por un solo trayecto de igual longitud a la suma de las longitudes individuales de los trayectos.

Como se aprecia en el modelo general, se utiliza una sola fase para realizar las pruebas. Los valores de los parámetros de las líneas, utilizados en la simulación, se calcularon con las expresiones ya mencionadas en 3.3.2.1 para la Resistencia Kilométrica, cuyos valores son mostrados en la *Tabla 3.2*, en 3.3.2.2 y 3.3.2.3 para la Inductancia y Capacitancia por unidad de longitud respectivamente, los valores se presentan en la *Tabla 3.3*.

Material	ρ	Resistencia Kilométrica
Cobre	0.01759 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	895.24 Ω/Km
Aluminio	0.02826 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	1989.43 Ω/Km
Aleación	0.03250 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	2287.85 Ω/Km

Tabla 3.2 Valores de Resistencia Kilométrica.

Relación D/r	Nombre del Parámetro	Valor
4	Coeficiente de Autoinducción	3.27*10-4 [H/Km]
	Capacitancia por Longitud	40.195*10-9 [F/Km]
5	Coeficiente de Autoinducción	3.715*10-4 [H/Km]
	Capacitancia por Longitud	34.622*10-9 [F/Km]
6.6666	Coeficiente de Autoinducción	4.29*10-4 [H/Km]
	Capacitancia por Longitud	29.37*10-9 [F/Km]
10	Coeficiente de Autoinducción	5.1*10-4 [H/Km]
	Capacitancia por Longitud	24.2*10-9 [F/Km]
15	Coeficiente de Autoinducción	5.91*10-4 [H/Km]
	Capacitancia por Longitud	20.577*10-9 [F/Km]

Tabla 3.3 Valores de los parámetros usados para las simulaciones.

3.3.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados obtenidos en la simulación se muestran en las tablas que se presentan a continuación (Tabla 3.4 – Tabla 3.8). En todos los casos, la señal de entrada tenía 10V de amplitud y una frecuencia de 135KHz, los valores que aparecen en las tablas, son los valores simulados de voltaje entre la fase y tierra, calculados a las distancias dadas. Es de resaltar, que estos valores, simulan únicamente el efecto de la línea sobre la portadora y no incluyen los efectos de las pérdidas en los acoplamientos, usados para la inserción y extracción de la señal en la línea de potencia.

Inductancia: $3.27 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $40.195 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω/Km	8.48	7.61	6.68	5.08	4.15	3.35	2.76
1989.43 Ω/Km	6.72	5.4	4.42	3.05	2.16	1.64	1.24
2287.85 Ω/Km	6.22	4.95	4.04	2.74	1.92	1.38	1.02

Tabla 3.4 Resultados de la simulación con D/r = 4.

Inductancia: $3.715 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $34.622 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω/Km	8.62	7.75	6.75	5.22	4.32	3.62	3.02
1989.43 Ω/Km	6.95	5.55	4.52	3.22	2.36	1.78	1.36
2287.85 Ω/Km	6.45	5.12	4.18	2.82	2.06	1.52	1.16

Tabla 3.5 Resultados de la simulación con D/r = 5.

Inductancia: $4.29 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $29.37 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω/Km	8.75	7.75	6.95	5.45	4.45	3.75	3.21
1989.43 Ω/Km	7.15	5.66	4.65	3.30	2.52	1.95	1.54
2287.85 Ω/Km	6.45	5.22	4.19	2.96	2.17	1.68	1.32

Tabla 3.6 Resultados de la simulación con D/r = 6.666.

Inductancia: $5.1 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $24.2 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω /Km	9.01	7.95	7.08	5.60	4.58	3.88	3.45
1989.43 Ω /Km	7.28	5.75	4.76	3.4	2.55	2.08	1.68
2287.85 Ω /Km	6.65	5.32	4.28	3.06	2.29	1.79	1.42

Tabla 3.7 Resultados de la simulación con $D/r = 10$.

Inductancia: $3.715 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $34.622 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω /Km	9.25	8.30	7.19	5.65	4.62	3.94	3.53
1989.43 Ω /Km	7.38	5.82	4.81	3.47	2.66	2.18	1.78
2287.85 Ω /Km	6.75	5.37	4.34	3.11	2.32	1.88	1.52

Tabla 3.8 Resultados de la simulación con $D/r = 15$.

Con los valores leídos de voltaje, se calcularon los valores de atenuación en dB, para las diferentes distancias y parámetros. Las tablas a continuación (Tabla 3.9 –Tabla 3.13), muestran los valores de atenuación calculados.

Inductancia: $3.27 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $40.195 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω /Km	0.716	1.186	1.752	2.941	3.819	4.749	5.591
1989.43 Ω /Km	1.726	2.676	3.545	5.157	6.655	7.851	9.065
2287.85 Ω /Km	2.062	3.053	3.936	5.622	7.166	8.601	9.914

Tabla 3.9 Atenuación en la simulación con $D/r = 4$.

Inductancia: $3.715 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $34.622 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω /Km	0.644	1.106	1.706	2.823	3.645	4.413	5.200
1989.43 Ω /Km	1.580	2.557	3.448	4.921	6.270	7.495	8.664
2287.85 Ω /Km	1.904	2.907	3.788	5.497	6.861	8.181	9.355

Tabla 3.10 Atenuación en la simulación con $D/r = 5$.

Inductancia: $4.29 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $29.37 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω/Km	0.579	1.106	1.580	2.636	3.516	4.259	4.934
1989.43 Ω/Km	1.457	2.471	3.325	4.814	5.985	7.099	8.124
2287.85 Ω/Km	1.904	2.823	3.777	5.287	6.635	7.749	8.794

Tabla 3.11 Atenuación en la simulación con $D/r = 6.666$.

Inductancia: $5.1 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $24.2 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω/Km	0.452	0.996	1.499	2.518	3.391	4.111	4.621
1989.43 Ω/Km	1.378	2.403	3.223	4.685	5.934	6.819	7.746
2287.85 Ω/Km	1.771	2.740	3.685	4.142	6.401	7.471	8.477

Tabla 3.12 Atenuación en la simulación con $D/r = 10$.

Inductancia: $3.715 \cdot 10^{-4}$ [H/Km]				Capacitancia: $34.622 \cdot 10^{-9}$ [F/Km]			
Resistencia	50mts	75mts	100mts	150mts	200mts	250mts	300mts
895.24 Ω/Km	0.338	0.809	1.432	2.479	3.353	4.045	4.522
1989.43 Ω/Km	1.319	2.350	3.178	4.596	5.751	6.615	7.495
2287.85 Ω/Km	1.706	2.700	3.625	5.072	4.788	7.258	8.181

Tabla 3.13 Atenuación en la simulación con $D/r = 15$.

3.4. PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas de campo consisten de una serie de mediciones realizadas sobre la red eléctrica, dichas mediciones se realizarán utilizando el modelo de laboratorio seleccionado, que fue explicado en el capítulo anterior. Estas mediciones abarcan la atenuación de la señal durante la propagación y la BER.

3.4.1. ENTORNO DE REALIZACIÓN DE PRUEBAS

La realización de las pruebas de campo se realizó en las instalaciones de la FIET, en la primera planta, además de algunos salones de la Facultad de Ingeniería Civil, la selección se hizo por los siguientes motivos:

- Posibilidad de identificar los circuitos que alimentan los diferentes salones.
- Recorrido de los circuitos relativamente largo, tanto para recorridos de un único circuito, como para recorridos de circuitos diferentes.
- En horas extra-clase, se podían realizar todas las pruebas sin entorpecer las labores de otras personas que trabajan en la facultad.

En algunos de los salones solo se cuenta con un único tomacorriente, en otros se cuenta con más de uno, pero las distancias entre estos hacia imposible el uso de uno para conectar el equipo de medición (2 computadores y un osciloscopio) y otro diferente para la conexión del equipo bajo estudio, lo cual, como se verá mas adelante, provoca una baja notable en el desempeño del sistema.

Para ilustrar un poco el entorno en que se realizaron las pruebas, en las figuras a continuación, desde la *Figura 3.18* hasta la *Figura 3.21* se muestra un plano aproximado de las instalaciones en las que se realizaron las pruebas.

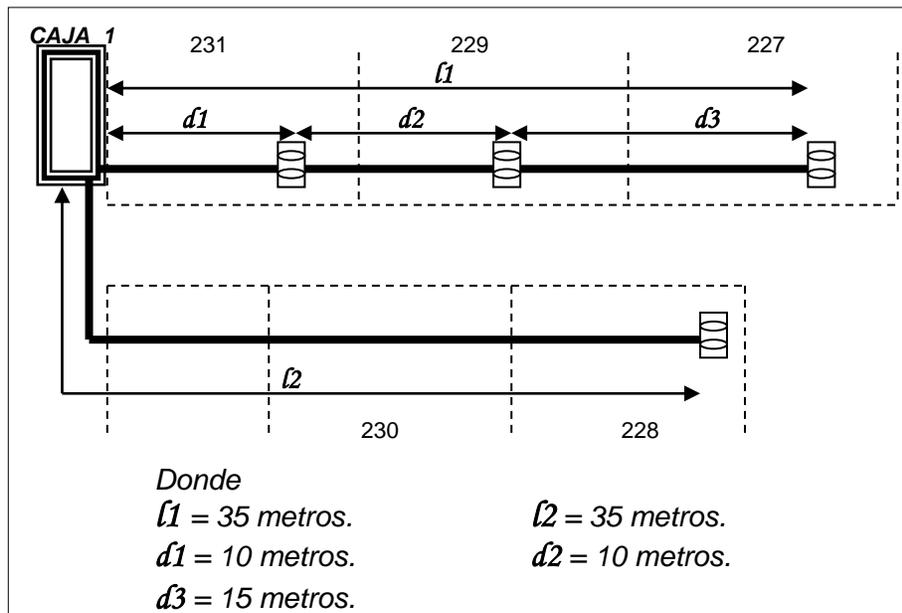


Figura 3.18 Esquema de tomacorrientes de los salones 227 a 231.

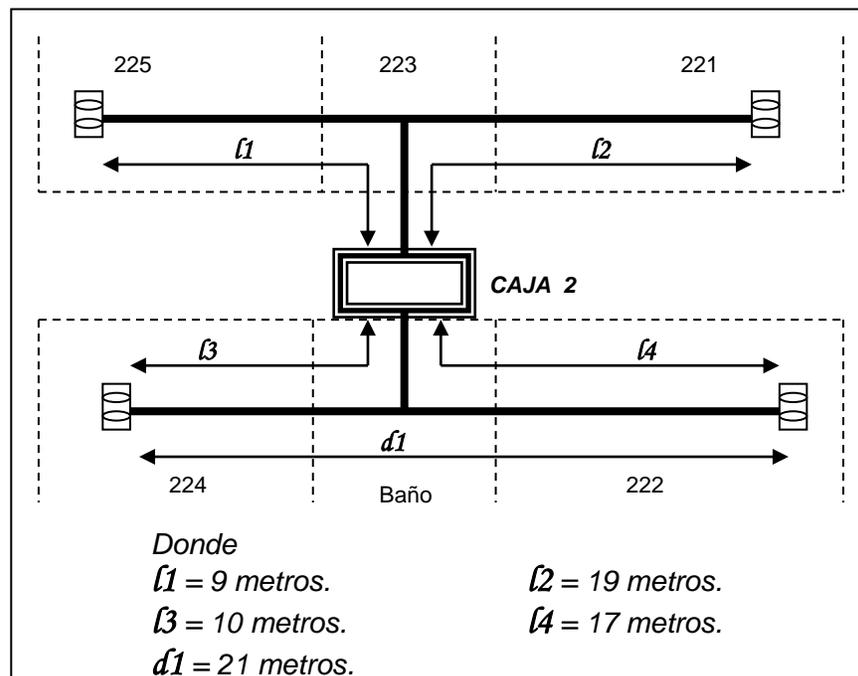


Figura 3.19 Esquema de tomacorrientes de los salones 221 a 225.

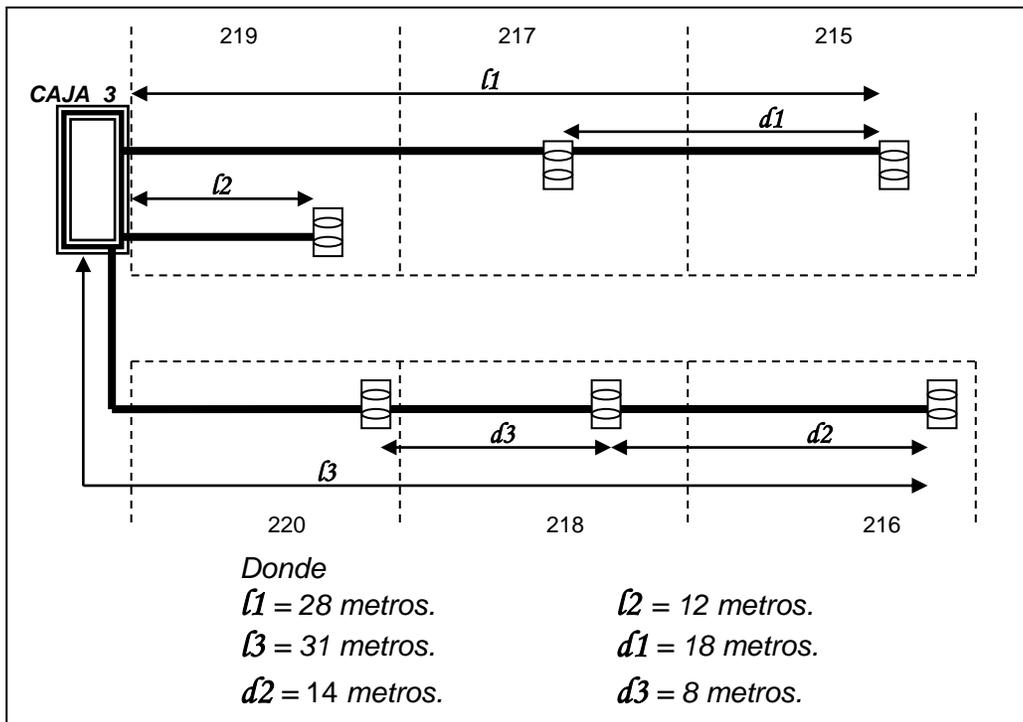


Figura 3.20 Esquema de tomacorrientes de los salones 215 a 220.

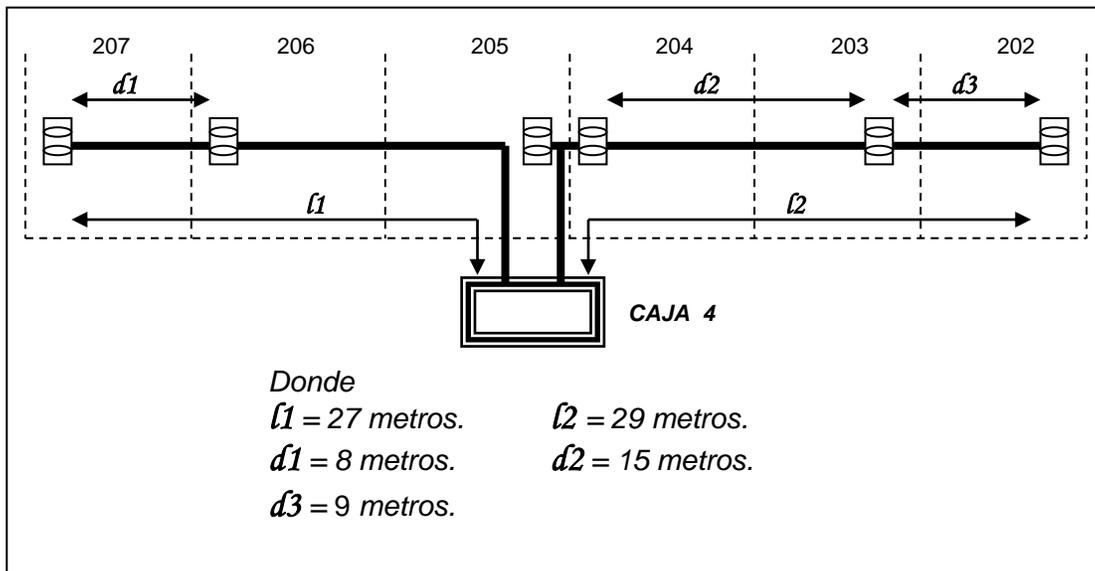


Figura 3.21 Esquema de tomacorrientes de los salones 202 a 207.

3.4.2. PRUEBAS REALIZADAS

3.4.2.1. Medidas de Portadora

Se realizaron pruebas orientadas a medir la intensidad de la señal portadora con el fin de establecer los parámetros de la atenuación de la señal en el medio de transmisión, para lo cual se utilizó el osciloscopio. Las mediciones se realizaron después de la etapa de acople del receptor, es decir, después del transformador.

Estas mediciones se realizaron con el receptor apagado, pues para medir la portadora solo se requiere la etapa de filtraje y acople, que no es necesario energizar. El único dispositivo adicional conectado a la red eléctrica fue el osciloscopio.

Se midió la intensidad de la señal conectándole transmisor y el receptor al mismo tomacorriente, para establecer este valor como parámetro de longitud cero, el valor leído de la señal en estas condiciones fue de 4Vpp.

Los resultados se presentan en las siguientes tablas (3.14 – 3.17).

Origen	Destino	Distancia	Cto. Único	Nivel de la Señal
227	228	70 metros	NO	2.0Vpp
229	228	55 metros	NO	2.2Vpp
231	228	45 metros	NO	2.3Vpp
231	227	25 metros	SI	2.8Vpp
229	227	15 metros	SI	3.1Vpp
229	231	10 metros	SI	3.4Vpp

Tabla 3.14 Mediciones de Portadora en salones 227 a 231.

Origen	Destino	Distancia	Cto. Único	Nivel de la Señal
224	222	21 metros	SI	2.8Vpp
221	222	36 metros	NO	2.4Vpp
225	222	26 metros	NO	2.3Vpp

Tabla 3.15 Mediciones de Portadora en salones 221 a 225.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	Nivel de la Señal
215	216	59 metros	NO	2.0Vpp
217	216	41 metros	NO	2.1Vpp
219	216	43 metros	NO	2.0Vpp
218	219	29 metros	NO	2.3Vpp
220	219	21 metros	NO	2.3Vpp
220	216	20 metros	SI	3.2Vpp
218	216	14 metros	SI	3.3Vpp

Tabla 3.16 Mediciones de Portadora en salones 215 a 220.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	Nivel de la Señal
202	206	48 metros	NO	1.4Vpp
202	207	56 metros	NO	1.3Vpp
203	206	39 metros	NO	1.4Vpp
203	207	47 metros	NO	1.4Vpp
205	206	24 metros	NO	1.5Vpp
205	207	32 metros	NO	1.5Vpp
202	205	24 metros	SI	3.5Vpp
203	205	15 metros	SI	3.6Vpp
203	202	9 metros	SI	3.7Vpp

Tabla 3.17 Mediciones de Portadora en salones 202 a 207.

3.4.2.2. Medidas de Portadora con el efecto de una fuente Switching

Las siguientes tablas (3.18 – 3.21), presentan la información de las medidas recogidas en los mismos circuitos, pero en esta ocasión, con una fuente Switching conectada

alimentando al receptor; esta información nos permite hacer un análisis de los efectos que tiene la fuente sobre el desempeño del sistema, específicamente sobre la portadora.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	Nivel de la Señal
227	228	70 metros	NO	1.5Vpp
229	228	55 metros	NO	1.7Vpp
231	228	45 metros	NO	1.7Vpp
231	227	25 metros	SI	2.3Vpp
229	227	15 metros	SI	2.5Vpp
229	231	10 metros	SI	3.0Vpp

Tabla 3.18 Mediciones de Portadora en salones 227 a 231, con fuente.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	Nivel de la Señal
215	216	59 metros	NO	1.4Vpp
217	216	41 metros	NO	1.5Vpp
219	216	43 metros	NO	1.5Vpp
218	219	29 metros	NO	1.7Vpp
220	219	21 metros	NO	1.8Vpp
220	216	20 metros	SI	2.9Vpp
218	216	14 metros	SI	3.0Vpp

Tabla 3.19 Mediciones de Portadora en salones 215 a 220, con fuente.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	Nivel de la Señal
202	206	48 metros	NO	1.0Vpp
202	207	56 metros	NO	0.8Vpp
203	206	39 metros	NO	1.1Vpp
203	207	47 metros	NO	1.0Vpp
205	206	24 metros	NO	1.0Vpp
205	207	32 metros	NO	1.1Vpp
202	205	24 metros	SI	2.9Vpp
203	205	15 metros	SI	3.1Vpp
203	202	9 metros	SI	3.2Vpp

Tabla 3.20 Mediciones de Portadora en salones 202 a 207, con fuente.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	Nivel de la Señal
224	222	21 metros	SI	2.5Vpp
221	222	36 metros	NO	1.7Vpp
225	222	26 metros	NO	1.8Vpp

Tabla 3.21 Mediciones de Portadora en salones 221 a 225, con fuente.

3.4.2.3. Medidas de BER

Las tablas a continuación (3.22 – 3.25), presentan la información obtenida de las mediciones de BER, para las que se utilizaron dos computadores, los cuales son fuente de distorsión de la señal y por consiguiente, deterioran el desempeño del sistema.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	BER ⁷	Nivel de la Señal ⁸
227	228	70 metros	NO	NO	NO
229	228	55 metros	NO	NO	NO
231	228	45 metros	NO	NO	NO
231	227	25 metros	SI	$0 \cdot 10^{-5}$	1.6Vpp
229	227	15 metros	SI	$0 \cdot 10^{-5}$	2.0Vpp
229	231	10 metros	SI	$0 \cdot 10^{-5}$	2.2Vpp

Tabla 3.22 Mediciones de BER en salones 227 a 231.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	BER	Nivel de la Señal
224	222	21 metros	SI	$0 \cdot 10^{-5}$	1.6Vpp
221	222	36 metros	NO	NO	NO
225	222	26 metros	NO	NO	NO

Tabla 3.23 Mediciones de BER en salones 221 a 225.

⁷ En las casillas de BER en las cuales aparece NO, se refiere a enlaces en los que la conexión de los computadores alteraba la señal portadora e introducía ruido en tal medida, que resultaba imposible hacer una medición de BER suficientemente objetiva.

⁸ Si en esta casilla aparece NO, es debido a que el ruido introducido por los computadores en la banda de trabajo, es de tal magnitud que destruye la portadora.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	BER	Nivel de la Señal
215	216	59 metros	NO	NO	NO
217	216	41 metros	NO	NO	NO
219	216	43 metros	NO	NO	NO
218	219	29 metros	NO	NO	NO
220	219	21 metros	NO	NO	NO
220	216	20 metros	SI	$0*10^{-5}$	1.9Vpp
218	216	14 metros	SI	$0*10^{-5}$	2.0Vpp

Tabla 3.24 Mediciones de BER en salones 215 a 220.

Origen	Destino	Distancia	Cto. único	BER	Nivel de la Señal
202	206	48 metros	NO	NO	NO
202	207	56 metros	NO	NO	NO
203	206	39 metros	NO	NO	NO
203	207	47 metros	NO	NO	NO
205	206	24 metros	NO	NO	NO
205	207	32 metros	NO	NO	NO
202	205	24 metros	SI	$0*10^{-5}$	2.0Vpp
203	205	15 metros	SI	$0*10^{-5}$	2.1Vpp
203	202	9 metros	SI	$0*10^{-5}$	2.3Vpp

Tabla 3.25 Mediciones de BER en salones 202 a 207.

Vale la pena aclarar, que en los enlaces en los que fue posible realizar las pruebas de BER tal como estaban concebidas, estas se realizaron a las dos velocidades previstas: 1200bps y 2400bps, obteniendo para ambos casos idénticos resultados.

3.4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Haciendo comparaciones de los valores consignados en las tablas que se presentan arriba, se pueden analizar algunos de los siguientes fenómenos.

3.4.3.1. Atenuación de la señal portadora.

Para obtener el valor de la atenuación por metro en los diferentes caminos, se comparan los valores de las tablas de medición de la portadora (3.14 – 3.17), con el valor de nivel de la señal medido en el mismo tomacorriente (4Vpp), es decir, con el nivel de la señal con un recorrido cero.

Con este método, la atenuación por metro calculada esta en el rango de 0.0241dB por metro, hasta los 0.19dB por metro, en donde el valor más común esta cerca de los 0.06dB por metro.

3.4.3.2. Pérdidas por paso de la señal por el tablero de servicio

Para este análisis, se comparan los valores medidos de la portadora en trayectos de único circuito con los de trayectos que pasan por el tablero de servicio, que sean de similar distancia y que estén en el mismo tablero de servicio.

Con los datos recogidos podemos hacer las comparaciones y vemos que el breaker introduciría pérdidas de la siguiente magnitud:

- Salones 221 a 225: 0.5V a 0.89dB.
- Salones 215 a 220: 0.9V a 1.43dB.
- Salones 202 a 207: 2V a 3.68dB.

Vemos que los valores son bastante disímiles, lo cual se puede explicar en el hecho de que no todos los tableros están en las mismas condiciones.

3.4.3.3. Pérdidas introducidas por la presencia de una fuente Switching

Al comparar las mediciones del numeral 3.3.2.1 con las del 3.3.2.2 podemos calcular el valor de las pérdidas que se presentan en el canal de transmisión por la presencia de una fuente Switching conectada al mismo.

El rango de variación va desde los 0.3V en tres de los enlaces, hasta los 0.6V en dos de ellos, pero los valores más comunes son 0.4V y 0.5V, en magnitudes absolutas. En dB's, el rango es de 0.41dB hasta 2.1dB, pero el promedio se encuentra alrededor de 1dB.

3.4.3.4. Efectos de conectar los computadores a la red.

Como se muestra en las tablas de medidas de BER, el efecto de conectar los dos computadores es altamente nocivo para el desempeño del sistema, al hacer comparaciones entre los niveles de señal de estas tablas con respecto a las tablas de portadora, las pérdidas en la señal son del siguiente orden:

- En términos absolutos, las pérdidas van desde los 0.8V hasta los 1.5V, dependiendo del enlace, pero los enlaces que mostraban mayor nivel en la portadora, son precisamente los que presentan mayor atenuación.
- En términos de decibeles, el rango es desde 1.76dB hasta los 2.43dB, lo que representa pérdidas mínimas del 33% de la señal y máximas de hasta el 47% de la señal.

Estas comparaciones fueron posibles de realizar, únicamente en los enlaces en los que las mediciones de portadora eran superiores o iguales a 2.8Vpp, que coinciden con las enlaces de un solo circuito. En estos, el sistema logró efectuar la transmisión de información con cero errores, pero desafortunadamente, no se pudo establecer el umbral

máximo de alcance de la señal, pues la infraestructura eléctrica no contaba con caminos más largos de 25 metros.

Por otro lado, en ninguno de los enlaces de circuitos diferentes, la portadora alcanzó los niveles requeridos, probablemente porque la distancia mínima de estos era superior a los 20 metros.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del trabajo realizado, se logró recolectar una gran cantidad de información teórica, extraída de múltiples documentos y fuentes, así como práctica, recolectada de las experiencias propias del proyecto, que constituye una base robusta de conocimiento acerca de las comunicaciones usando las líneas de distribución eléctrica de baja tensión.

Sin embargo, no se deben tomar las referencias teóricas como fuentes de información confiable, pues debe considerarse el hecho de que estas referencias son producto de estudios realizados en entornos diferentes al nuestro, por lo cual, si bien, la información que contienen es valiosa, no debe coincidir exactamente con los resultados prácticos.

Es importante resaltar la falta de una infraestructura logística necesaria para realizar un estudio de este tipo en condiciones más adecuadas y con mayores niveles de confiabilidad, pues uno de los inconvenientes más frecuente fue la carencia de la documentación arquitectónica, que avalará muchos de los datos tomados en el desarrollo de las pruebas, específicamente en lo que a distancias recorridas por la señal se refiere.

Por otra parte, las características de distribución de circuitos y cableado, hizo imposible realizar el estimativo de algunos de los valores que se pretendían medir, tal como la distancia máxima alcanzada por la señal en recorridos de un único circuito, y en recorridos de circuitos diferentes (pasando por el tablero de servicio).

Otra de las limitaciones que afectó altamente el desempeño de sistema durante las pruebas de campo, fue las características de los equipos utilizados para efectuar estas mediciones, pues algunos de estos equipos alteraban en un porcentaje muy alto las condiciones en las que se realizaban dichas pruebas. Tal es el caso de las pruebas de BER, en las que se utilizaban dos computadores personales, uno con función transmisora y el otro receptora, pero que al ser conectados al circuito sobre el cual se efectuaban las mediciones, peor aún, al mismo tomacorriente, perturbaban seriamente las condiciones de la señal portadora, llegando inclusive en algunos casos a inutilizarla totalmente, como se vio en el capítulo anterior.

4.1. MODELO PRELIMINAR DE LABORATORIO

De las pruebas realizadas en el capítulo anterior, se pueden deducir algunas conclusiones interesantes.

- El rango de los valores de atenuación calculados según los resultados de las simulaciones, solo coincide con el rango de los valores calculados a partir de las pruebas de campo, cuando el conductor empleado en la simulación presenta una impedancia de $2287.85 \Omega/\text{Km}$ o de $1989.43 \Omega/\text{Km}$, es decir, con un conductor de aleación o de aluminio, respectivamente.
- La coincidencia solo se presenta en los valores bajos de atenuación, pues el valor de atenuación mínimo simulado es 0.026dB por metro y el máximo es de 0.041dB por metro, mientras que para las pruebas de campo esta entre 0.0241dB por metro y

0.19dB por metro, lo que implica que la correspondencia es entre los peores casos de la simulación y los mejores de las pruebas de campo.

- El efecto de conectar fuentes Switching al canal de comunicación cerca de los puntos de transmisión y recepción resulta desastroso para el desempeño del sistema, tanto que en el caso de los dos computadores, anuló totalmente la posibilidad de comunicación entre las partes.
- El efecto de este tipo de fuente no solo implica la atenuación de la señal, sino que introduce un nivel de ruido a la frecuencia de trabajo, que alcanzo el nivel de 1Vpp, por lo cual, inclusive, en el extremo receptor se detectó dicho ruido en forma de caracteres erráticos, que fueron almacenados en un archivo por el programa receptor, aún cuando el transmisor no establecía ningún proceso de comunicación.
- El resultado de las pruebas indica que presumiblemente, el proceso de comunicación podría llevarse a cabo en enlaces de un solo circuito a 40 metros, en el caso de conectar los computadores cerca de los extremos del sistema, sin mayores inconvenientes, lo que no pudo ser comprobado por razones ya expuestas. Además, en el caso de que la conexión de estos no se hiciera cerca, el alcance de la señal se incrementaría considerablemente.

Uno de los mayores obstáculos para la comunicación esta en los tableros de distribución eléctricos, debido a la naturaleza de estos, ya que el medio de transmisión se ve alterado considerablemente y por otro lado, la señal tiene muchas más rutas de dispersión, que en el caso de los tableros sobre los que se realizaron las pruebas, podrían alcanzar a ser hasta 10 diferentes rutas.

En estos tableros se presenta otro fenómeno que es nocivo para la comunicación, y es que en ellos se entremezcla el ruido proveniente de todos los dispositivos conectados a la red, como alumbrado y electrodomésticos.

Pero el modelo preliminar desarrollado durante el presente trabajo presenta cualidades que lo hacen inclusive, plantear aplicaciones inmediatas, teniendo en cuenta sus limitaciones tanto de velocidad como de alcance.

El modelo preliminar de laboratorio, es útil para baja velocidad, alcanzando como máximo 2400bps, pero esta velocidad es suficiente para algunas aplicaciones de telecontrol en una residencia, en las que solo se requiera enviar comandos cortos o pequeños volúmenes de información. La *Figura 4.1* nos muestra un escenario típico de un hogar.

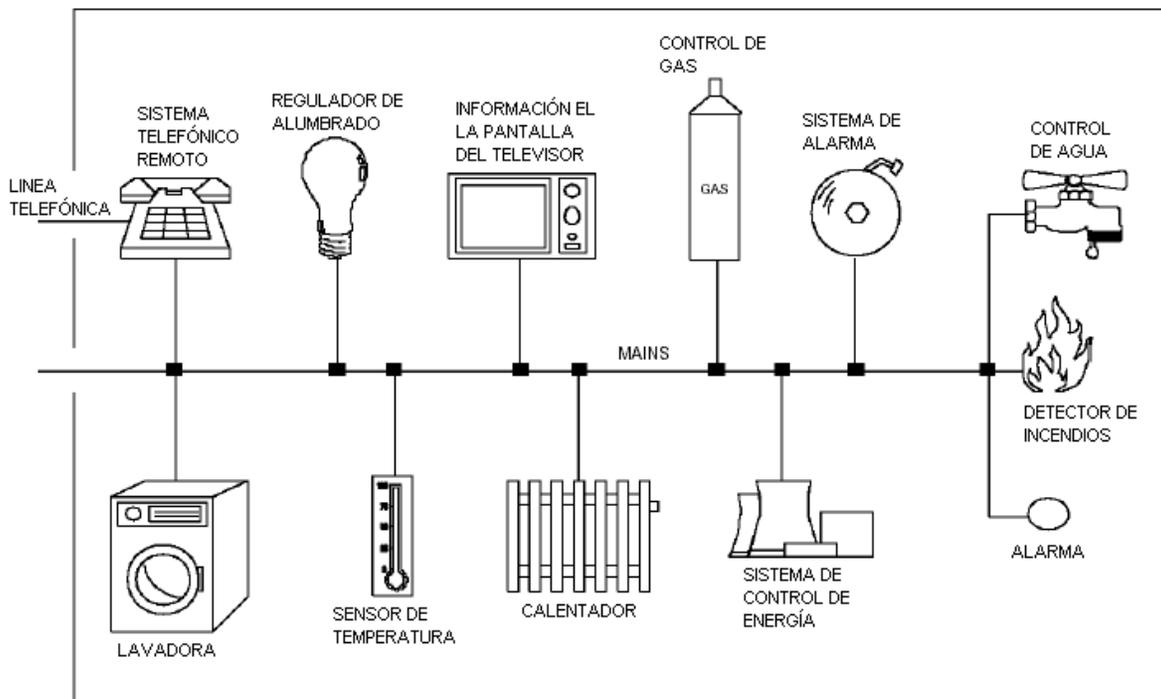


Figura 4.1 Escenario típico de un hogar.

En esta escenario, muchas tareas se podrían realizar de manera automática, como por ejemplo, que el sensor de temperatura, al alcanzarse cierto umbral, enviara una señal que encendiera o apagara el aire acondicionado o la calefacción, o que se pudiera generar una llamada en el caso de que algo anormal fuera detectado dentro de la residencia.

Podría pensarse en la construcción de un modelo que permitiera el manejo de manera remota, de algunos dispositivos eléctricos como las luces por ejemplo.

4.2. ESPECTATIVAS DE DESARROLLO

Lo más importante del trabajo realizado con el prototipo desarrollado, es que se ha creado un modelo teórico-practico de las condiciones del entorno local, que sirve como punto de partida para los trabajos siguientes que estarán orientados hacia el desarrollo de modelos avanzados que brinden mayores prestaciones en cuanto a velocidad de transmisión y alcance, pues esta es la orientación que siempre se tuvo acerca del proyecto, ser el primer paso hacía la construcción de soluciones.

La experiencia derivada del trabajo realizado hasta el momento, nos permite estimar algunas expectativas de cara a proyectos futuros, que implican un proceso continuo de desarrollo. Estas expectativas y proyecciones se plasmarán en los siguientes párrafos.

4.2.1. CORTO PLAZO

- El uso de microcontroladores para sustituir los computadores, sería una ventaja para la realización de pruebas de campo, no solo por la comodidad que de esto se deriva,

sino que se puede estudiar más cuidadosamente el desempeño del sistema, sin los efectos nocivos de los PC's.

- Un mejoramiento en la etapa de amplificación del transmisor, para brindar mas potencia a la señal de salida, redundaría en un mejor comportamiento del sistema ante el medio hostil al que se enfrenta. Nuestro módulo ofrece una corriente máxima de salida de 70mA con la cual se obtiene un alcance máximo de 40 metros en un solo circuito, con el incremento de la potencia el alcance puede ser mayor e inclusive superar la barrea de los tableros de distribución.
- Incorporación de nuevas etapas y establecimiento de protocolos que brinden la posibilidad de implementar diferentes aplicaciones entre más de dos unidades y de esta manera ampliar el campo de aplicaciones en el área residencial o industrial.
- Utilización de moduladores que empleen técnicas de modulación multinivel o modulaciones diferentes a las estudiadas aquí, que representen alternativas de solución viables para el alcance de mayores velocidades y mejor respuesta frente a los inconvenientes de ruido.

4.2.2. LARGO PLAZO

En modelos avanzados de este sistema y superando todos los problemas nocivos del ruido, es posible que se alcancen velocidades superiores al los 25Kbps trabajando en la misma banda de frecuencias, pero si se desea alcanzar velocidades superiores, es recomendable, mudarse a otras bandas de frecuencias, claro esta, supeditado a la disponibilidad de los elementos necesarios para tales desarrollos. A tal respecto se puede mencionar nuevas tecnologías como las que utiliza la empresa Europea, Itran Communications, la cual emplea técnicas de modulación avanzadas, diferentes a las que se plantearon en este estudio, con corrección de errores y que prometen ser una buena

solución para un futuro mejoramiento del sistema. Entre dichas técnicas de modulación se encuentran el DCSK (Differential Code Shift Keying) y el ACSK (Adaptive Code Shift Keying) que representan una robusta solución para aplicaciones sobre redes eléctricas de muy alto ruido.

Con el mejoramiento y alcance de mayores velocidades del sistema se abre un abanico de aplicaciones sobre la red eléctrica. Para plantear algunas de las aplicaciones:

- **Telefonía a través de la red eléctrica**

Con el alcance de mayores distancias se hace factible la utilización del cableado eléctrico para difusión telefónica o establecimiento sistemas PBX sin necesidad de nuevos cableados y aprovechando los mismos tomas eléctricos como puntos de conexión telefónica. Tal esquema se muestra en la *Figura 27*.

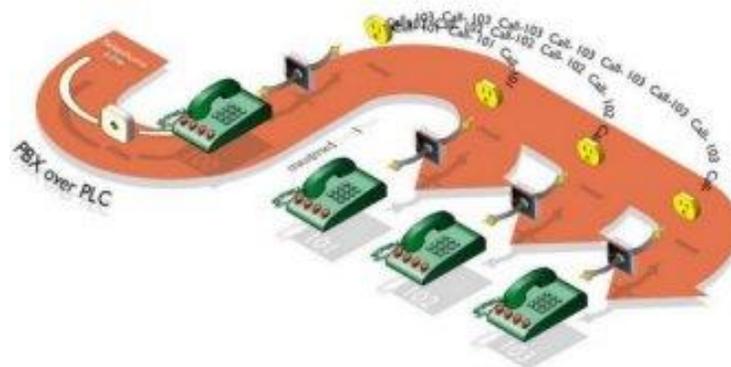


Figura 4.2 Esquema básico de PBX sobre la red

- **Entretenimiento para el hogar**

El cableado eléctrico existente puede ser utilizado para transportar audio comprimido con calidad de CD (mp3). Esto provee la flexibilidad de ubicar los diferentes componentes de un equipo de sonido en diferentes salones, en espacios donde la distancia entre estos amerite el uso de esta tecnología. Por otro lado utilizar las

capacidades multimedia del PC y establecer una plataforma de videojuego sobre el cableado eléctrico como se esquematiza en la *Figura 28*.

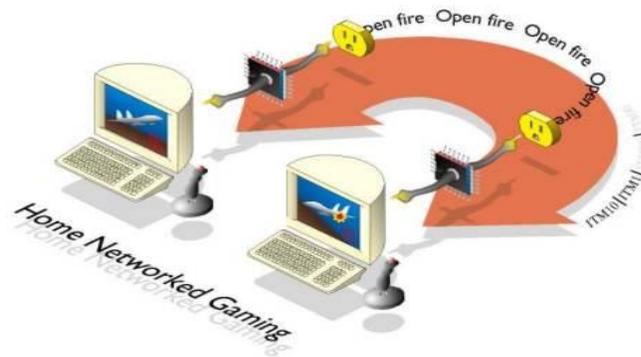


Figura 4.3 Esquema básico de juego en red sobre el cableado eléctrico

- **Lectura remota de medidores**

Empresas del servicio eléctrico demandan por lectura remota de contadores o medidores de energía y de esta manera superar los inconvenientes de recolección de información existentes.

En este sistema un concentrador es colocado cerca del transformador de distribución, el cual recolecta los datos de cada medidor conectado a ese transformador (Ver *Figura 29*). La información es transferida desde el concentrador a la central a través del cableado telefónico.

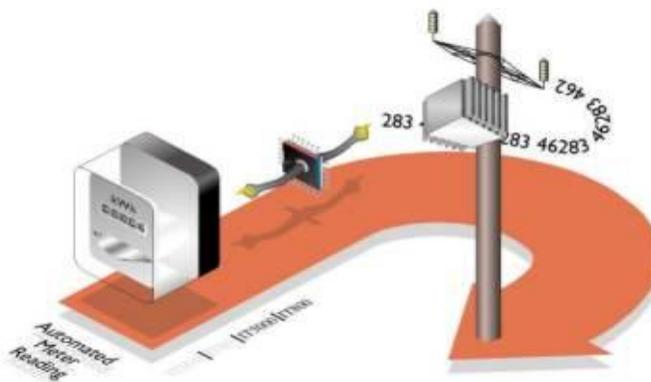


Figura 4.4 Esquema básico de lectura remota de contadores

Algunas de las anteriores aplicaciones requieren que el sistema alcance velocidades mínimas adecuadas, como es el caso de la telefonía, pero en el caso de mediciones remotas, como se mencionó anteriormente, una velocidad de 2400 bits por segundo es muy cómoda para tal aplicación.

Un trabajo de este tipo requiere además de un apoyo económico suficiente, que debería en primera instancia brindar la Universidad a través de la Vicerrectoría de Investigaciones, que por cierto, para el caso del presente trabajo fue nulo, a pesar de ser seleccionado como Proyecto de Investigación y Desarrollo Tecnológico, en el marco de la cuarta convocatoria de apoyo a proyectos, pero que también debe ser buscado en otros organismos privados y públicos, para lo cual ya se cuenta con el precedente de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

DEPARTMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY AT LUND UNIVERSITY. Power line communications. Documento PDF.

HULOUX Joël, HANUS Laurent. ST7537 power line modem application, application note. SGS-THOMSON MICROELECTRONIS.

SCHNEIDER ELECTRIC ESPAÑA S.A. Las redes de distribución pública de MT en el mundo. Cuaderno Técnico Nº 155. Biblioteca Técnica.

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

SCHNEIDER ELECTRIC ESPAÑA S.A. Las perturbaciones eléctricas en baja tensión. Cuaderno Técnico Nº 141. Biblioteca Técnica.

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

SCHWARTZ, Mischa. Transmisión de información, modulación y ruido, tercera edición: McGraw Hill.

SGS-THOMSON MICROELECTRONICS. ST7537HS1, Home automation modem data sheet,