



Universidad Tecnológica de la Mixteca

“Diseño y construcción de un sistema de protección ultrasónico de potencia para subestaciones eléctricas”

TESIS

Para obtener el Título de Ingeniero en Electrónica

PRESENTA:

Crisóforo Gpe. Morales Cruz

Director de tesis

M.C. Enrique Guzmán Ramírez

Huajuapán de León, Oax.

Mayo de 2003

Tesis presentada el 23 de Junio de 2003
ante los siguientes sinodales:

M.C. Fermín Hugo Ramírez Leyva.
M.C. Jacob Vásquez Sanjuan.
M.C. Felipe Santiago Espinosa.

Director de Tesis:

M.C. Enrique Guzmán Ramírez.

Dedicatorias

A mi padre **Tereso Morales Cuevas** y mi madre **María Cruz Núñez**, por su amor, su comprensión y su fortaleza en todo momento, y porque su cansancio me permite gozar enormemente de este logro.

A mis hermanos: **Herminia, Reynaldo, Eufrosina, Artemio, Elia, Norberto, Héctor y Sergio**, por su gran apoyo, comprensión y paciencia durante todo este tiempo.

A mis cuñados: **Elías, Sandra y Mary**.

A mis sobrinos: **Ever Iván, Mireya, Priscila, Zareth, Aldo, Daniel y Diego**.

A mi novia **Esmeralda** por su amor y su gran apoyo en los momentos difíciles.

Kiki

Agradezco de forma especial:

A mis hermanos **China** y **Temo** por su gran apoyo económico durante toda la carrera y en la realización de este proyecto.

Al **M.C. Enrique Guzmán Ramírez** por su confianza, sus consejos, su apoyo y el tiempo dedicado en el desarrollo de esta tesis.

Crisóforo Gpe. Morales Cruz.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca por brindarme la oportunidad de cursar una licenciatura.

A las siguientes personas:

Al Ing. Celso Ruíz Escobar por su gran apoyo durante el desarrollo de este proyecto, al Ing. Hugo Suárez Onofre por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, a mi tío Cont. Casimiro Cruz Núñez por sus buenos consejos en todo momento, a la señora Candy Pacheco Mendiola por su gran apoyo y sus consejos en el momento preciso, y a mi amigo Edgardo Yescas Mendoza por su apoyo incondicional.

Crisóforo Gpe. Morales Cruz.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. VIBRACIONES ULTRASÓNICAS Y EFECTOS SOBRE EL SISTEMA AUDITIVO	9
1.1 Características del sonido	10
1.2 Percepción del sonido por el oído humano.....	10
1.3 Percepción del sonido por el oído animal.....	12
1.4 Comportamiento de los animales ante las vibraciones ultrasónicas.....	13
1.5 Potencia y Nivel de Presión Sonora (NPS)	15
1.6 Dispositivos repelentes ultrasónicos comerciales.....	20
CAPÍTULO 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ULTRASÓNICO DE POTENCIA	21
2.1 Configuración general del sistema de protección ultrasónico de potencia.....	22
2.2 Subsistema de control.....	22
2.2.1 Diseño del subsistema de control	23
2.2.2 Señales de barrido.....	24
2.2.3 Circuito de vigilancia (Watchdog Timer).....	27
2.2.4 Comunicación serial	27
2.2.4.1 Normas de comunicación serial.....	27
2.2.4.1.1 Norma RS-232	28
2.2.4.1.2 Norma RS-422A y RS-423A	20
2.2.4.1.3 Norma RS-485	30
2.2.4.2 Comparación entre normas de comunicación serial	31
2.2.4.3 Implementación de la transmisión serial	32
2.3 Subsistema de detección.....	34
2.3.1 Tecnología de Rayos Infrarrojos Pasivos (PIR)	34
2.3.2 Tecnología de Microondas	34
2.3.3 Tecnología Dual	34
2.3.4 Elección del sensor	35
2.4 Subsistema de alarma	37
2.4.1 Elección de los altavoces ultrasónicos.....	37
2.4.2 Elección del amplificador.....	39
2.4.3 Diseño del subsistema de alarma.....	43
2.5 Subsistema de registro y consulta de eventos.....	48
2.6 Alimentación de los circuitos	50
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ULTRASÓNICO DE POTENCIA	52
3.1 Programa principal del microcontrolador.....	53
3.2 Rutina de servicio a la interrupción.....	53
3.2.1 Subrutina de transmisión	54
3.2.2 Subrutina del primer barrido de frecuencias.....	56
3.2.3 Subrutina del segundo barrido de frecuencias.....	59
3.2.4 Subrutina del tercer barrido de frecuencias	69
3.3 Programa de registro y consulta de eventos	61

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	63
4.1 Tarjetas de circuito impreso	64
4.11 Tarjeta del subsistema de control	64
4.12 Tarjeta de los amplificadores de potencia	65
4.13 Tarjeta convertidora de señales RS-422 a RS-232	66
4.14 Tarjetas de las fuentes de alimentación	66
4.15 Sistema completo.....	67
4.2 Caracterización del amplificador de potencia	68
4.3 Medición del Nivel de Presión Sonora (NPS)	71
4.4 Ajuste de los sensores.....	73
4.5 Verificación de la transmisión-recepción de la señal de aviso.....	73
4.6 Verificación del programa de Registro y Consulta de eventos	74
4.7 Experimentos.....	74
4.8 Conclusiones.....	75
4.9 Perspectivas	76
 BIBLIOGRAFÍA	 78
 ANEXO A. Manual de usuario del programa de registro y consulta de eventos	 A-1
Instalación y configuración	A-1
Guía de usuario.....	A-1
 ANEXO B. Prototipo del manual de instalación del sistema de protección ultrasónico de potencia.....	 B-1
GENERALIDADES	B-1
Definición	B-1
Características.....	B-1
Conexiones	B-1
Instalación de los módulos	B-3
 ANEXO C. Esquemáticos del sistema.....	 C-1
 ANEXO D. Diseño de circuitos impresos	 D-1
 ANEXO E. Tabla comparativa de microcontroladores	 E-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Configuración general del sistema de protección.....	6
Figura 1.1	Sistema auditivo humano.....	11
Figura 1.2	Anatomía interna del oído animal.....	12
Figura 1.3	Frecuencias audibles en el hombre y frecuencias aproximadas para distintos tipos de animales.....	13
Figura 1.4	Circuito generador de frecuencias (12 a 71) kHz.	14
Figura 1.5	Circuito generador de barridos de frecuencias.	15
Figura 1.6	Gráfica de curvas Fletcher-Munson.....	17
Figura 2.1	Diagrama a bloques del sistema de protección ultrasónico de potencia.....	22
Figura 2.2	Esquemático del subsistema de control	23
Figura 2.3	Circuito acoplador con TL081	24
Figura 2.4	Circuito transmisor RS-422 diferencial	25
Figura 2.5	Gráficas de barrido: a) ascendente; b) descendente; c) ascendente-descendente ..	25
Figura 2.6	Señales de barrido: a) Frecuencia máxima; b) Frecuencia mínima	26
Figura 2.7	Señal presente sobre una línea RS-232.....	28
Figura 2.8	Conexión entre dos equipos RS-232 DTE sin señales de acoplamiento	29
Figura 2.9	Conexión entre dos equipos RS-422 sin señales de acoplamiento	30
Figura 2.10	Conexión entre equipos 4D-RS-485	30
Figura 2.11	Conexión entre equipos 2D-RS-485	31
Figura 2.12	Circuito Transmisor-Receptor RS-422 diferencial	33
Figura 2.13	Área de cobertura: a) Vista plana; b) Vista de perfil	36
Figura 2.14	Diagrama de conexiones del sensor DT-7450EU.....	37
Figura 2.15	Dimensión de una subestación eléctrica	40
Figura 2.16	Circuito amplificador en configuración puente de 24 watts.....	41
Figura 2.17	Circuito receptor de señales RS-422 diferencial.....	48
Figura 2.18	Tarjeta convertidora de señales RS-422 a RS-232: a) Vista ampliada; b) Conexión a la PC	49
Figura 2.19	Fuente de alimentación (5V/1A).....	50
Figura 2.20	Fuente de alimentación (12V/1A).....	51
Figura 2.21	Fuente de alimentación bipolar ($\pm 12V/1.5A$).....	51
Figura 3.1	Diagrama de flujo del programa principal.....	54
Figura 3.2	Diagrama de flujo de la rutina de servicio a la interrupción.....	55
Figura 3.3	Diagrama de flujo de la subrutina de transmisión	56
Figura 3.4	Diagrama de flujo del barrido de frecuencias descendente	57
Figura 3.5	Diagrama de flujo del barrido de frecuencias ascendente	58
Figura 3.6	Diagrama de flujo del barrido de frecuencias descendente-ascendente	60
Figura 3.7	Interfaz del programa de registro y consulta de eventos	62
Figura 4.1	Tarjeta del subsistema de control: a) Distribución b) Vista frontal.....	64
Figura 4.2	Tarjetas de los amplificadores de potencia: a) Distribución b) Vista frontal	65
Figura 4.3	Tarjeta convertidora de señales RS-422 diferencial a RS-232	66
Figura 4.4	Tarjeta de la fuente de alimentación de $\pm 12V/1.5A$	66
Figura 4.5	Fuente de los amplificadores: a) Circuito rectificador; b) Transformador 24V/10A; c) Circuito de protección.....	67
Figura 4.6	Sistema completo.....	68
Figura 4.7	Medición del voltaje RMS: a) Resistencia de 8.2 Ω ; b) Medición.....	69

Figura 4.8	Medición del voltaje RMS: a) Resistencias en serie; b) Medición.....	69
Figura 4.9	Medición del voltaje RMS: a) Resistencias en paralelo; b) Medición	69
Figura 4.10	Gráfica de caracterización con respecto a la impedancia	70
Figura 4.11	Gráfica de caracterización con respecto a las frecuencias ultrasónicas.....	70
Figura 4.12	Medición del voltaje RMS para frecuencias ultrasónicas.....	70
Figura 4.13	Sonómetro modelo 33-2055 de RadioShack	72
Figura 4.14	Disposición del sistema de protección y del equipo de medición	72
Figura 4.15	Sensor ADEMCO modelo DT7450EU	74
Figura 4.16	Generación del reporte de una consulta de eventos.....	74
Figura A.1	Interfaz del programa de registro y consulta de eventos: a) Vista en pantalla; b) Vista detallada	A-2
Figura A.2	Calendario de fecha inicial	A-3
Figura A.3	Calendario de fecha final	A-3
Figura A.4	Ventana del historial de eventos	A-4
Figura B.1	Conexión de los módulos del sistema: a) Conexiones; b) Sistema completo.....	B-2
Figura B.2	Gabinete metálico de la unidad de control.....	B-3
Figura B.3	Instalación del gabinete en los lingotes de acero.....	B-3
Figura B.4	Gabinete metálico con base móvil.....	B-4
Figura B.5	Instalación de los sensores en los lingotes de acero	B-4
Figura B.6	Instalación de los amplificadores y bocinas en los lingotes de acero.....	B-5

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Resultados experimentales de las frecuencias ultrasónicas audibles por algunos animales	14
Tabla 1.2	Nivel de presión sonora y daños que causa su audición.....	16
Tabla 1.3	Nivel de presión sonora y tiempo máximo de exposición.....	17
Tabla 1.4	Tabla de ponderaciones A y C.....	19
Tabla 1.5	Tabla de ponderación A para frecuencias ultrasónicas.....	19
Tabla 1.6	Dispositivos repelentes ultrasónicos comerciales.....	20
Tabla 2.1	Terminales del conector DB9.....	28
Tabla 2.2	Comparación entre los estándares RS-232, RS-422A y RS-423A	32
Tabla 2.3	Tabla de funcionamiento del transmisor MC3487	32
Tabla 2.4	Tabla de funcionamiento del receptor MC3486	33
Tabla 2.5	Modelos de sensores y sus características	35
Tabla 2.6	Terminales del sensor DT-7450EU	36
Tabla 2.7	Tabla comparativa entre modelos de tweeters.....	39
Tabla 2.8	Tabla comparativa de amplificadores integrados	41
Tabla 2.9	Funcionamiento del circuito amplificador.....	42
Tabla 2.10	Sistemas de audio y NPS generado	46
Tabla 2.11	Incremento de potencia y NPS generado.....	47
Tabla 4.1	Resultados del NPS medido en un sistema de audio	73
Tabla 4.2	Resultados del NPS medido con respecto al incremento de sistemas de audio....	73
Tabla 4.3	Resultados del NPS medido con 4 sistema de audio	73
Tabla E.1	Tabla comparativa de microcontroladores.....	E-1

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un sistema electrónico de protección que a través de la generación de vibraciones ultrasónicas crea a su alrededor un ambiente acústicamente hostil que logra repeler todo tipo de animales del lugar protegido, esto con la finalidad de tener un control sobre las plagas que afectan a diversas instalaciones entre ellas las subestaciones eléctricas. Para este fin se han empleado diversos métodos de ahuyentación como la electrificación, la cerca, sustancias químicas, disparos, cohetes y repelentes de todo tipo, pero lamentablemente los resultados han sido poco efectivos y algunos son de peligro para el ser humano, además los animales se acostumbran rápidamente a estos métodos. El desarrollo de este sistema se basa en una investigación sobre el efecto auditivo y nervioso que causa la intensidad de las ondas sonoras de alta frecuencia en los animales y de la seguridad que ofrece este método al ser humano al no poder percibir estas frecuencias debido a sus limitaciones auditivas naturales.

El sistema genera una serie de barridos de frecuencias ultrasónicas produciendo ondas sonoras con un adecuado Nivel de Presión Sonora (NPS), cuenta con una etapa de potencia para incrementar el nivel de intensidad sonora de las señales, incluye una red de sensores que detectan la presencia de intrusos dentro del área protegida, los eventos que ocurren se registran en una Computadora Personal (PC) ubicada en una central a 400 metros de distancia de la subestación eléctrica mediante un programa con una interfaz desarrollada en lenguaje visual que ofrece además la posibilidad de realizar consultas sobre el historial de dichos eventos. La ocurrencia de un evento es informado a la PC a través de una interfaz RS-422 diferencial. El sistema está diseñado para adaptarse a subestaciones eléctricas de cualquier dimensión, modificando solamente el número de amplificadores de potencia y el número de altavoces para altas frecuencias.

INTRODUCCIÓN

En una subestación eléctrica se encuentran entre otros equipos, los transformadores de mediana potencia tipo subestación, regularmente son trifásicos y reducen el voltaje proveniente del transformador de potencia de 34.5 KV a 13.8 KV. Contienen en sus terminales aisladores de porcelana denominados boquillas, las cuales sirven como enlace entre el cable de alta tensión y el interior del equipo, estos transformadores son los que principalmente sufren daños cuando se introducen animales en este lugar. La distancia entre boquillas es de 40 centímetros. Entre fase y tierra existe un voltaje de 19,918 Volts ($34.5 \text{ KV} / \sqrt{3}$) y entre fase y fase existe un voltaje de 7,967 Volts ($13.8 \text{ KV} / \sqrt{3}$) [1] [2]. Con esta gran caída de tensión y la pequeña resistencia que físicamente ofrecen los cuerpos de los animales cuando se acercan a estos transformadores, se incrementa considerablemente la corriente eléctrica, provocando cortos circuitos que dañan no solo a estos equipos, también afecta a los demás elementos que conforman una subestación eléctrica.

Cuándo las boquillas sufren algún daño, el personal de mantenimiento tarda normalmente entre 5 y 6 horas en sustituirlas, en caso de que el daño sea mayor debe cambiarse el transformador completamente, esta reparación toma entre 4 y 5 días ya sea en la espera de un nuevo transformador ó en adaptar alguno de características similares, repercutiendo considerablemente en la economía de la empresa dueña de la subestación y en el servicio que ésta presta.

Para proteger las subestaciones contra animales, se emplean una infinidad de métodos de protección tales como: Cercas con mallas ó tejidos metálicos, sistemas electrocutadores y sustancias químicas que se aplican bajo la supervisión directa de personal especializado que conoce a fondo los riesgos y daños que causan en la salud la manipulación de estas sustancias [3]. Las empresas que poseen subestaciones eléctricas se ven limitadas al emplear alguno de estos métodos debido a que tienen tratados con la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) para proteger la flora y la fauna [URL 1], además esta institución vigila constantemente sus centros de operación.

El método más sencillo de ahuyentación que se ha utilizado en las subestaciones eléctricas es la cerca, pero representa una técnica no muy adecuada debido a que provoca problemas

de movilización dentro de las subestaciones, ya que periódicamente se realizan actividades de mantenimiento y cuando ésto ocurre el personal necesita de maquinaria especializada, por lo tanto, la cerca es un método no muy conveniente debido a que no permite realizar las maniobras que requieren de cierto grado de libertad para llevarlas a cabo, es decir, obstaculiza el trabajo.

Una razón más para no utilizar este método es la generación de gastos de mantenimiento, pero la razón más importante es que es un método poco eficiente, porque la cerca sólo protege a las subestaciones eléctricas de animales rastreros, deteniéndolos sólo por un momento ya que regularmente tienden a escalar el obstáculo o excavar y penetrar por debajo de la tierra, además deja libre el acceso a los animales aéreos, los cuales también causan daños en las subestaciones.

Otro método de ahuyentación es la electrificación, el cual resulta ser un método efectivo para proteger una determinada área en contra de intrusos a través de descargas eléctricas de alto voltaje. En las subestaciones eléctricas esta técnica es la que se emplea actualmente generando descargas eléctricas mediante arillos metálicos cuando un intruso se aproxima a una determinada distancia, éstos sólo protegen a los transformadores dejando sin protección a los demás elementos que conforman la subestación. Los arillos se encuentran ubicados en las boquillas de los transformadores y cuando un animal se aproxima a ellas se producen descargas eléctricas que normalmente matan al animal. Este es un método efectivo pero no cumple con los tratados que existen con la SEMARNAP, además los cuerpos de los animales quedan tirados dentro del área protegida provocando daños a otros elementos activos de la subestación eléctrica.

Cuando otras medidas de ahuyentación no son eficientes, por lo general se recurre al empleo de plaguicidas, estas sustancias químicas son capaces de exterminar por completo una plaga, pero antes de aplicarlos se debe tener cuidado de proteger todos los equipos y accesorios que puedan contaminarse para no poner en riesgo la vida del personal de mantenimiento; después de aplicarlos debe limpiarse minuciosamente el equipo y los accesorios contaminados para eliminar los residuos y se puedan realizar las maniobras correspondientes sin riesgo alguno. Este método aparte de ser más peligroso que los anteriores es mucho más caro que cualquier otro, porque requiere de personal especializado y adiestrado en el manejo de estas sustancias [2] [URL 2].

Debido a los problemas presentados por estos métodos y el riesgo que representan para el personal, surge la necesidad de desarrollar un sistema de protección que mantenga alejados a todo tipo de animales de una subestación eléctrica y que a su vez sea un sistema completamente seguro para el ser humano.

La emisión de ondas ultrasónicas es el método más confiable para proteger las subestaciones eléctricas, ya que el ultrasonido afecta directamente al sistema auditivo y al sistema nervioso de los animales lastimándolos fuertemente [4], además es un método completamente seguro para el ser humano debido a que las vibraciones ultrasónicas solo causan malestares auditivos y nerviosos a los animales, sometiéndolos a un estrés auditivo muy intenso. El hombre no puede percibir estas frecuencias debido a sus limitaciones auditivas naturales [5] [6].

Investigaciones de laboratorio realizadas por reconocidas empresas como *LENTEX*, *STEREN* y *SONIC Technology* [URL 3], quienes entre su vasta producción fabrican también dispositivos repelentes ultrasónicos, han demostrado que las vibraciones de las

ondas ultrasónicas con un adecuado Nivel de Presión Sonora (NPS) atacan al sistema auditivo y nervioso de la gran mayoría de las plagas causándoles dolor y malestares.

Cuando se emiten ondas ultrasónicas se producen variaciones en la presión atmosférica, estas variaciones son las que producen el sonido y la intensidad de las ondas representan el Nivel de Presión Sonora (NPS) que se percibe a determinada distancia. El NPS siempre se expresa en decibeles (dB) ya que es una medida que relaciona el valor de la presión sonora ejercida por una onda acústica presente, con la mínima presión sonora que puede ser escuchada por el oído humano, la cual tiene un valor de 20 μ Pascales [6] [7] [8].

El NPS de los sonidos audibles sin provocar daño auditivo al ser humano varía entre 0 dB y 120 dB, ya que los sonidos de más de 120 dB pueden causar daños auditivos inmediatos e irreversibles. El oído de los animales es semejante al de los humanos, pero la amplitud de los sonidos perceptibles es más reducida [URL 4], ya que un NPS de 100 dB es bastante doloroso para la mayoría de ellos, esto quiere decir que no basta con generar una señal ultrasónica para repelerlos, la potencia con la cual debe ser emitida juega un papel muy importante, porque de acuerdo a ella las señales producirán el NPS que realmente les provoque malestar. Como el oído percibe los sonidos de acuerdo a una escala logarítmica y no lineal [5] [7] [9], es necesario incrementar considerablemente la potencia de la señal para obtener a determinada distancia un NPS adecuado que logre ahuyentar a los animales de manera instantánea.

La emisión de ondas ultrasónicas es un método menos hostil que las trampas, más seguro que los venenos, no obstruye las actividades de mantenimiento y no es percibido por las personas. A diferencia de las trampas y los venenos el ruido ultrasónico reduce al mínimo el contacto de las personas con los animales porque no los mata, evitando la necesidad de deshacerse de ellos.

OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo es diseñar y construir el prototipo de un sistema electrónico de protección basado en un microcontrolador que a través de la generación y emisión de ondas ultrasónicas sea capaz de repeler a todo tipo de animales que pudieran introducirse en las subestaciones eléctricas brindándoles una protección eficaz, para lograrlo se proponen los siguientes:

Objetivos particulares:

- Investigación de las características físicas de las ondas sonoras de alta frecuencia y su intensidad como método de ahuyentación, así como la seguridad que ofrece este método al sistema auditivo humano.
- Evaluación y comparación del rendimiento de diferentes modelos de sensores y la elección del modelo que ofrezca las mejores características de inmunidad a falsas alarmas y área de cobertura, para formar una red de sensores que cubran eficientemente el área protegida.
- Realizar un estudio de características y rendimiento sobre altavoces para altas frecuencias, asimismo de amplificadores de audio, para posteriormente elegir los modelos que cumplan con los requerimientos del sistema.

- Realizar un estudio sobre estándares de comunicación a distancia y elegir el más óptimo para transmitir una señal de aviso a una central, donde se registrará la ocurrencia de los eventos.
- Desarrollar un programa para que la PC reciba la señal de aviso, genere un archivo donde se registren los eventos que han sido evitados y sirva como interfaz con el usuario para realizar consultas sobre el historial de los eventos ocurridos.

Justificación

El desarrollo de un sistema de protección ultrasónico de potencia es de gran importancia para todas las empresas que poseen subestaciones eléctricas, principalmente porque evita posibles daños o la destrucción parcial o total de los equipos que se encuentran en operación en dichas subestaciones. Esta es la razón principal por la cual la Comisión Federal de Electricidad (CFE) propuso y semifinanció esta investigación para desarrollar un sistema que brinde una protección eficiente a las subestaciones eléctricas, ya que un accidente de este tipo afecta fuertemente su economía al interrumpir el servicio eléctrico y además porque los equipos son demasiado caros. Para esta empresa resulta muy rentable el desarrollo e implantación de este sistema, comparando el costo de su desarrollo contra el costo total que genera un evento de este tipo.

Metodología

- Tras una investigación acerca de los problemas que se presentan en las subestaciones eléctricas, se eligió como tema de tesis el diseño y la construcción de un sistema de protección con la finalidad de evitar los daños que provocan los animales que se introducen en ellas.
- Se hizo un estudio sobre los métodos de ahuyentación que han sido utilizados como protección y las fallas que éstos presentan. Con base en estas referencias, la emisión de ondas ultrasónicas se eligió como método de protección, lo cual requirió que posteriormente se realizara un estudio bibliográfico sobre los temas principales que influirían en su diseño y desarrollo.
- Se realizó un estudio sobre acústica y psicoacústica para analizar las características físicas de las ondas sonoras de alta frecuencia, la forma en que son percibidas por el oído y como alteran el comportamiento natural de los animales.
- Con base en la investigación previa, el paso siguiente fue el análisis y la elección de los elementos electrónicos con los cuales se llevaría a cabo su implementación.
- La elección del microcontrolador como elemento principal del sistema, se llevó a cabo de acuerdo a las características requeridas, su disponibilidad en el mercado y su costo.
- Posteriormente se eligieron los transductores ultrasónicos de acuerdo a los cálculos matemáticos realizados sobre el NPS que se desea generar a determinada distancia, para lo cual se evaluaron sus características más importantes como son: respuesta en frecuencia, potencia admitida, impedancia y sensibilidad.
- De acuerdo a estos cálculos también se eligieron los amplificadores de potencia y el número de ellos evaluando características tales como: potencia de salida y ancho de banda.

- Como el sistema sólo debe activarse cuando un animal se introduce a la subestación eléctrica, se investigaron diferentes modelos de sensores para formar un subsistema de detección, los cuales cumplen con características especiales para no generar falsas alarmas provocadas por los componentes infrarrojos de la luz solar ó las ondas electromagnéticas presentes en las subestaciones eléctricas.
- Finalizada la elección de los diferentes elementos se diseñó y se montó en *protoboard*¹ el circuito electrónico que compone el sistema ahuyentador, realizando posteriormente las pruebas correspondientes.
- Después de probar y hacer algunos cambios en el diseño, se procedió a diseñar las tarjetas con los circuitos impresos.
- Una vez terminadas todas las tarjetas de los circuitos electrónicos se hicieron pruebas de laboratorio para la caracterización del sistema completo.

Propuesta y aportaciones

El sistema propuesto se basa en un microcontrolador por ser un componente electrónico versátil, proporcionando al sistema gran confiabilidad y versatilidad porque permite cambiar el diseño y funcionamiento del sistema con sólo modificar el programa del mismo.

Las señales que normalmente emiten los dispositivos ultrasónicos existentes en el mercado son señales que generan un tono definido y por medio de un potenciómetro se ajusta a la frecuencia adecuada para ahuyentar determinada plaga, otros activan y desactivan el tono a intervalos regulares de tiempo [URL 3] obteniendo resultados poco eficaces. Estos sistemas inicialmente funcionan pero los animales desarrollan habilidades de protección acostumbrándose al ruido, por lo que los repelen sólo por un corto tiempo.

El sistema propuesto evita que los animales se acostumbren al sonido porque genera una señal ultrasónica más apropiada a través del microcontrolador, esta señal es generada con múltiples sonidos ultrasónicos entre 20 kHz y 70 kHz teniendo la capacidad de modificar constantemente la frecuencia de salida y el tipo de barrido, lo cual impide que los animales se acostumbren a un sonido fijo, haciéndolo un sistema completamente confiable.

De acuerdo a los experimentos que se realizaron con distintos animales (ver sección 1.4) pudo determinarse que en un barrido de frecuencias entre 20 kHz y 70 kHz cada frecuencia debe generarse aproximadamente durante un intervalo de 26 milisegundos de tiempo para generar un tono realmente molesto al oído de los animales. Un barrido de frecuencias que mantenga cada frecuencia un intervalo mayor de tiempo generará un tono distinto al que es recomendable utilizar y es posible que no induzca un estrés auditivo adecuado en los animales.

El sistema está diseñado para generar tres tipos de barridos de frecuencias:

- El primer barrido inicia generando una frecuencia máxima de 69.4 kHz, ésta se genera durante 26 milisegundos, después se decrementa aproximadamente en uno generando la nueva frecuencia durante un intervalo igual de tiempo y así sucesivamente hasta generar una frecuencia mínima de 19.8 kHz (barrido descendente). En este barrido se generan 46 frecuencias distintas, por lo tanto el barrido completo se genera en 1.196 segundos. Una vez que se generan las 46

¹ Es un dispositivo que permite probar y modificar circuitos electrónicos.

frecuencias, se genera nuevamente el mismo barrido durante un ciclo de aproximadamente 5 minutos.

- El segundo barrido genera inicialmente una señal de 19.8 kHz y la incrementa aproximadamente en uno hasta alcanzar una frecuencia máxima de 69.4 kHz (barrido ascendente) generando cada frecuencia durante 26 milisegundos de tiempo, con lo cual se obtiene un tono diferente al primer barrido. Este barrido también se repite aproximadamente durante 5 minutos.
- El tercer barrido de frecuencias utiliza los dos barridos anteriores; intercala un barrido ascendente y un barrido descendente de tal manera que inicia generando una frecuencia mínima de 19.8 kHz, incrementa esta frecuencia en intervalos de 26 milisegundos hasta generar una frecuencia máxima de 69.4 kHz y viceversa de 69.4 kHz la decreta hasta 19.8 kHz nuevamente. En este caso un barrido completo se genera aproximadamente en 2.392 segundos debido a que genera 92 frecuencias distintas, produciendo con ésto una variante en el tono del barrido. Este barrido también entra en un ciclo de 5 minutos.

En la figura 1 se muestra el diagrama a bloques de la configuración general del sistema de protección desarrollado. El sistema consta básicamente de un subsistema de detección integrado por una red de sensores que tienen la función de detectar la presencia de intrusos y enviar una señal de aviso al subsistema de control, esta señal provoca que el microcontrolador envíe una señal de aviso a través de una comunicación RS-422 diferencial a una PC ubicada en una central para indicarle la ocurrencia de un evento, la PC contiene un programa donde se registra la hora y la fecha en que ocurrió dicho evento. Inmediatamente después el microcontrolador genera tres tipos de barridos de frecuencias, estas señales son proporcionadas a los amplificadores del subsistema de alarma, éstos les suministran la potencia adecuada para obtener el NPS que logre repeler a los animales. Para la emisión de las señales ultrasónicas se utilizan altavoces que emiten estas frecuencias con una baja distorsión. Se incluye también un sistema de ventilación que se activa cuando ocurre un evento, ésto con la finalidad de evitar el calentamiento de los amplificadores, lo cual podría ocasionar un mal funcionamiento del sistema.

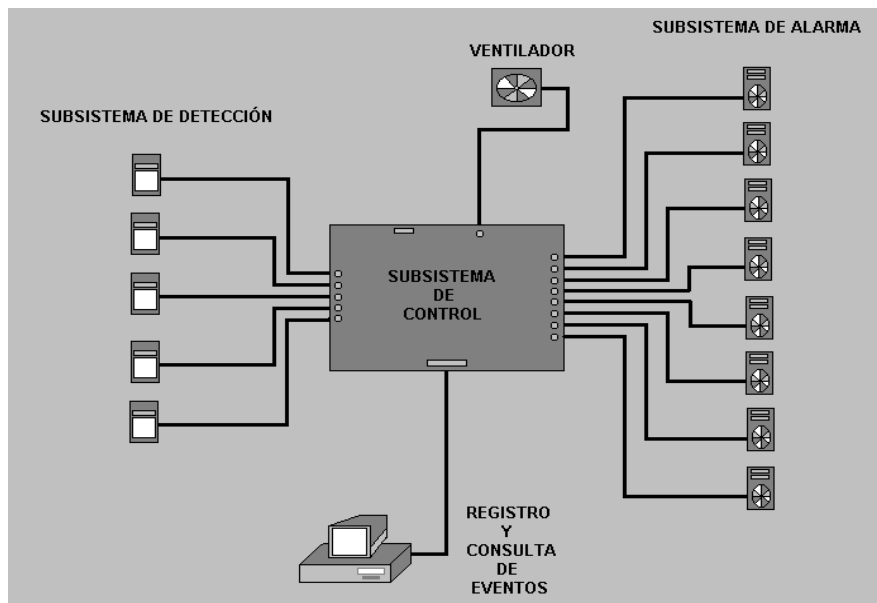


Figura 1 Configuración general del sistema de protección.

La tarjeta del subsistema de control es la parte central del sistema, la red de sensores tiene una interfaz directa con esta tarjeta y se pueden conectar 8 unidades como máximo. El subsistema de alarma es independiente de la tarjeta de control debido a que los amplificadores se agregan de acuerdo al área que se desea proteger, pero adquieren de la tarjeta de control la señal ultrasónica generada y acoplada.

Las tarjetas de los amplificadores tienen conectado a su salida un altavoz de 8 Ω y poseen conectores que permiten proporcionar esta señal hacia los demás amplificadores de potencia.

A continuación se describen los cuatro subsistemas que conforman el sistema completo:

Subsistema de control. Este subsistema se basa en un microcontrolador, por lo tanto puede considerarse como la parte central del sistema y tiene por función controlar todos los procesos que se realizan. Tras un estudio y comparación entre microcontroladores de distintas familias (ver anexo E), para el desarrollo de este subsistema se eligió un microcontrolador PIC16F876 de la familia *Microchip Technology*, esta familia sobresale por estar muy difundida actualmente a nivel mundial, ya que debido a su flexibilidad y su bajo costo la hacen muy atractiva para fabricaciones a gran escala [10] y pensando en la posibilidad de fabricar en serie este sistema de protección resulta más factible el uso de este microcontrolador.

Este subsistema se compone de una tarjeta que contiene el circuito electrónico adecuado para realizar las operaciones de control, la generación de los barridos de frecuencias, el acoplamiento de la señal ultrasónica que alimenta a los amplificadores y los dispositivos necesarios para transmitir la señal de alarma hasta una central ubicada a 400 metros de distancia utilizando el estándar RS-422 diferencial.

El programa principal del microcontrolador se encarga de configurar su funcionamiento y con base en la señal de alarma que provoca la interrupción, controla la ejecución del programa. El programa completo además del cuerpo principal, se auxilia de cuatro subrutinas. La primera de ellas es la subrutina de transmisión, la cual se encarga de tomar el dato correspondiente y lo transmite serialmente por el pin destinado a las transmisiones seriales del microcontrolador, para lo cual debe seguirse un algoritmo establecido por *Microchip Technology* [11]. La segunda subrutina genera un primer barrido de frecuencias produciendo una señal cuadrada a través de cambios alternos de niveles lógicos en uno de los puertos del microcontrolador, haciendo un barrido descendente. La tercer subrutina es semejante a la anterior solo que ésta genera un barrido de frecuencias de manera ascendente y por último, en la cuarta subrutina se combinan las dos anteriores para obtener una señal de barrido completo (descendente y ascendente) aproximadamente entre 70 kHz y 20 kHz y viceversa de 20 kHz a 70 kHz evitando el acostumbramiento de los animales a un sonido fijo.

Subsistema de detección. Este subsistema está integrado por una red de sensores, los cuales tienen una amplia área de cobertura, con lo que se pretende reducir al máximo las unidades a utilizar cubriendo completamente una subestación eléctrica, este tipo de sensores cuenta con dos sistemas de detección para evitar falsas alarmas y se encargan de enviar una señal de aviso al subsistema de control cuando detectan la presencia de algún intruso dentro del área protegida.

Subsistema de alarma. Este subsistema está integrado por amplificadores ultrasónicos de potencia y como no todas las subestaciones tienen las mismas dimensiones, el número de tarjetas con estos circuitos estará en función del volumen a proteger, este número se

determina en base a un estudio sobre acústica y cálculos matemáticos que tratan sobre el estudio del NPS que se debe obtener a determinada distancia, por lo tanto es necesario dejar abierta la opción de expandir las tarjetas amplificadoras de acuerdo al volumen máximo de protección y de acuerdo al NPS requerido. Los amplificadores tienen como entrada las señales ultrasónicas con la finalidad de proporcionarles la potencia necesaria, para después emitirlos a través de altavoces que reproducen señales sonoras de alta frecuencia con una baja distorsión.

Subsistema de registro y consulta de eventos. Este subsistema se encuentra en una central alejada de la subestación y consta de una PC donde se aloja una tarjeta receptora que tiene la capacidad de convertir señales RS-422 diferenciales a señales RS-232, esta última a través del puerto serie activa un programa instalado en la PC. El programa crea un archivo de tipo texto y registra en él cada uno de los eventos reportados, además ofrece opciones para realizar consultas sobre eventos ocurridos en cualquier intervalo de tiempo, el usuario sólo debe proporcionar una fecha inicial y una fecha final para que el sistema le proporcione la información solicitada.

Contenido

Este trabajo se presenta en 4 capítulos, los cuales serán desarrollados de acuerdo al contenido siguiente:

En el capítulo 1 se presenta un estudio sobre el comportamiento físico de las ondas sonoras y la forma en que son percibidas por el oído humano y por el oído animal. Se presenta también un estudio sobre los efectos que producen las ondas sonoras de alta frecuencia en los sistemas auditivo y nervioso de los animales, así como la elección de este método como técnica de ahuyentación.

El capítulo 2 desglosa la explicación del diseño e implementación de los cuatro subsistemas que conforman el sistema de protección ultrasónico de potencia, describiendo las bases teóricas de la elección de los dispositivos electrónicos con los cuales se diseña cada uno de ellos.

En el capítulo 3 se presenta el diseño del programa principal del microcontrolador, así como la descripción de la transmisión serial de la señal de aviso a la central, de cada barrido de frecuencias y la programación del Watchdog Timer, incluyendo sus diagramas de flujo. En este mismo capítulo se incluye el programa de registro y consulta de eventos y la descripción de la interfaz con el usuario.

El capítulo 4 contiene los resultados y las conclusiones obtenidas al finalizar el desarrollo del sistema, incluyendo resultados con respecto a las tarjetas de circuito impreso, la caracterización de los amplificadores de potencia, la medición del nivel de presión sonora y la verificación y ajuste de cada subsistema .

Capítulo 1

VIBRACIONES ULTRASÓNICAS Y EFECTOS SOBRE EL SISTEMA AUDITIVO

En este capítulo se describen los conceptos y fenómenos relacionados con la percepción del sonido. Para ello se estudian los resultados de experimentos psicoacústicos que aparecen en la literatura y se justifican en términos de la fisiología del aparato auditivo. Este estudio se hace con la finalidad de comprobar que las ondas ultrasónicas generadas por las altas frecuencias son inofensivas para el ser humano y que la emisión del ultrasonido altera el comportamiento natural de los animales al lastimar fuertemente sus oídos.

Con el propósito de determinar las características que deben poseer las señales generadas por el sistema de protección ultrasónico de potencia, se presenta un estudio sobre la naturaleza y el comportamiento de las ondas sonoras ultrasónicas. En la implementación de este sistema es también indispensable estudiar los fenómenos físicos que se presentan durante la emisión y percepción del sonido, para tener bases sobre investigaciones científicas que respalden su desarrollo y que permitan a su vez establecer un marco teórico que justifique la elección de este método como la mejor técnica de protección.

1.1 Características del sonido

La acústica es la parte de la física que estudia la producción y transmisión del sonido. Las ondas sonoras son ondas mecánicas vibratorias que necesitan de un medio para poder propagarse, este medio puede ser líquido, aire, o sólido. Al ser emitidas provocan que las partículas de estos medios oscilen alrededor de sus posiciones de equilibrio [5] [7] [12]. En el aire las partículas se comprimen y descomprimen debido a las vibraciones, produciendo pequeñas variaciones de presión atmosférica, siendo éstas las que se miden como sonido. La propagación del sonido en el aire se efectúa a una velocidad constante de 340 metros por segundo, siendo ésta más rápida en los líquidos y sólidos. El sonido se transmite en línea recta, pero si encuentra un obstáculo parte se absorbe y parte se refleja; por lo tanto, lo que llega al oyente es una mezcla del sonido directo junto con los múltiples rebotes del mismo.

Una de las propiedades de las ondas sonoras es la frecuencia con la que oscilan, la cual es medida en Hertz (Hz); de acuerdo a su frecuencia existen sonidos puros². Normalmente los sonidos son mezclas de tonos diferentes, pero están definidos por una frecuencia fundamental que es el tono más bajo sobre la cual se sobreponen frecuencias distintas más altas, definiendo el timbre del sonido [5] [7] [13] [14].

A pesar de que el sonido y el ultrasonido son de la misma naturaleza existe una diferencia entre ellos, las ondas sónicas o sonido tienen una frecuencia entre 20 y 20,000 Hz y las ondas ultrasónicas o ultrasonido tienen frecuencias mayores a los 20,000 Hz. Al emitir las ondas ultrasónicas se disipan o atenúan rápidamente con la distancia³, sufriendo reflexión, difracción y refracción a causa de partículas que tienen una longitud de onda mayor o similar [15] [16], además se comportan como una onda de sonido direccional, es decir, se comportan más como un haz luminoso que como sonido, ya que sus propiedades físicas no le permiten penetrar ninguna superficie sólida. Los materiales suaves que se encuentren a su alrededor pueden también absorberlas y las ondas se pierden completamente.

Otra medida del sonido es la amplitud, que es el valor máximo absoluto de la variación de presión atmosférica, es decir, cuanto más grandes son las variaciones de presión, mayor es la intensidad del sonido, relacionándose con la sensación dinámica audible, por lo tanto, el oído es extremadamente sensible a esta magnitud.

1.2 Percepción del sonido por el oído humano

La física de la audición o psicoacústica estudia al oído como instrumento receptor de los sonidos. El ser humano es capaz de detectar únicamente aquellos sonidos que se encuentran dentro de un determinado rango de amplitudes y frecuencias. En este sentido, se puede establecer una analogía entre el aparato auditivo y un sistema electrónico de audio en base al concepto convencional del rango dinámico. El rango dinámico del oído se define como la relación entre la máxima potencia sonora que éste puede manejar y la mínima potencia necesaria para detectar un sonido [URL 5]. Asimismo, el rango de frecuencias asignado convencionalmente al sistema auditivo va desde los 20 Hz hasta los 20 kHz [5] [6] [7], el cual puede variar de un sujeto a otro en función su edad y de sus trastornos auditivos.

² Tienen una sola frecuencia que los define y que representa su tono.

³ Esto depende del medio de transmisión.

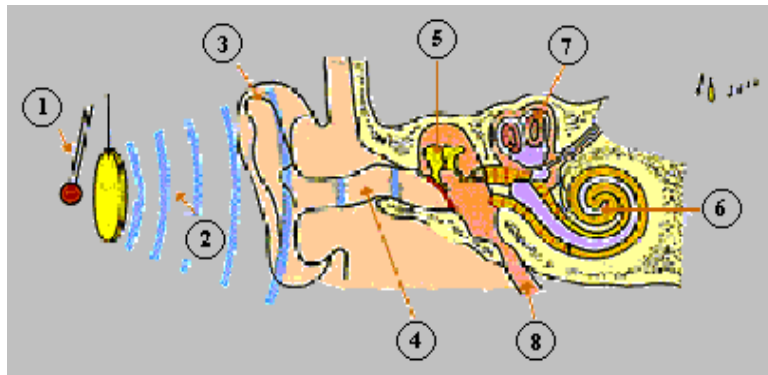


Figura 1.1 Sistema auditivo humano.

Las vibraciones ultrasónicas son producidas por ondas sonoras de alta frecuencia que están fuera del rango audible de los seres humanos, debido a que la membrana del tímpano del oído no puede vibrar con tanta rapidez. A continuación se enumeran los elementos que intervienen en un sistema de generación de ondas sonoras y en la figura 1.1 se muestra su distribución [6] [7] [URL 6].

1. Estímulo sonoro.
2. Medio aéreo de conducción del estímulo.
3. Pabellón de la oreja o entrada al receptor auditivo.
4. Conducto auditivo externo.
5. Cadena de huesecillos en el oído medio.
6. Cóclea: Es el órgano transductor para el estímulo auditivo.
7. Canales semicirculares: Son los receptores de la aceleración de rotación de la cabeza.
8. Trompa de Eustaquio.

El sistema auditivo humano se divide en tres partes:

Oído externo. Está constituido por el pabellón de la oreja, el conducto auditivo y la membrana timpánica. La oreja tienen doble finalidad, por un lado se comporta como un receptor direccional y por otro tienen una función amplificadora, ya que gracias a su superficie relativamente grande recoge la máxima cantidad de energía sonora para luego concentrarla en el conducto auditivo. Éste a su vez, estimula la membrana del tímpano cubriendo con eficacia la gama comprendida entre 20 Hz y 20 kHz. Al vibrar esta membrana se induce su vibración al oído medio.

Oído medio. Está constituido por una cavidad llena de aire, dentro de la cual se encuentran tres huesecillos denominados martillo, yunque y estribo, unidos entre sí en forma articulada. Uno de los extremos del martillo se encuentra adherido al tímpano y transmite las vibraciones hasta el estribo, a través del yunque. La cavidad del oído medio se comunica con la laringe por medio de un conducto llamado trompa de Eustaquio, su finalidad es igualar las presiones a ambos lados del tímpano. Desde el punto de vista estrictamente físico, la misión del oído medio es convertir las ondas de presión sonora en vibraciones mecánicas.

Oído interno. Es la parte estructuralmente más compleja, pues consta de tres elementos: los canales semicirculares, el vestíbulo y la cóclea. Es una cavidad hermética cuyo interior está llena de un líquido llamado linfa. Los canales semicirculares no tienen relación directa con el sentido de la audición, más bien su función tienen que ver con el sentido del equilibrio. El vestíbulo tiene dos orificios llamados ventana oval y ventana redonda. La primera está directamente unida a la base del estribo y recibe de él sus vibraciones. La cóclea está

arrollada en espiral formando tres vueltas y está dividida longitudinalmente por una membrana flexible llamada membrana basilar sobre la que se asientan los filamentos terminales del nervio auditivo. El conjunto formado por la membrana basilar y los terminales nerviosos se denomina órgano de Corti.

El funcionamiento del oído es de la siguiente manera: Al empujar el estribo la membrana de la ventana oval se produce una sobrepresión en la parte superior del caracol que obliga a circular el fluido linfático hacia la cavidad inferior a través del helicotrema, al mismo tiempo que la membrana basilar se deforma hacia abajo. Finalmente, la membrana elástica que cierra la ventana redonda cede hacia afuera. Si el estribo se mueve sinusoidalmente de izquierda a derecha con una frecuencia F , aparece una onda que se desplaza de izquierda a derecha por la membrana basilar, la velocidad de la onda depende de su frecuencia y del ancho y rigidez de la membrana basilar. Dado que esta última es más estrecha y rígida por su lado izquierdo y más ancha y flexible por su lado derecho, el resultado es que en algún punto de la cóclea la velocidad de la onda llega a ser cero; en ese punto la onda se para y la energía se absorbe. Llegando a la conclusión de que cada punto de la membrana basilar responde de la manera descrita a una determinada frecuencia.

La membrana del tímpano comienza a vibrar sólo cuando es excitada por ondas sonoras que tienen una frecuencia mayor a los 20 Hz, cuando las ondas sonoras alcanzan una frecuencia mayor a los 20 000 Hz esta membrana deja de vibrar y los terminales nerviosos no reciben excitación, dejando de percibirse el sonido.

1.3 Percepción del sonido por el oído animal

El oído animal está más desarrollado que el oído humano en cuanto a su sensibilidad, debido a que gran cantidad de especies dependen de señales auditivas para comunicarse entre sí. Estructuralmente el oído de las aves es similar al de los mamíferos. Su estructura se muestra en la figura 1.2 y se divide en tres partes [URL 4]:

Oído externo. En los mamíferos está constituido por la oreja, la cual tiene por función recoger la máxima energía sonora y enviarla al conducto auditivo. Las aves por su parte, poseen plumas que cubre la apertura del oído y están bajo control muscular, permitiendo guiar los sonidos hacia el conducto auditivo. Éste a su vez, estimula la membrana del tímpano cubriendo con eficacia la gama comprendida entre 20 Hz y 200 kHz en algunos animales como se aprecia en la figura 1.3 [URL 7]. Al vibrar esta membrana se induce su vibración al oído medio.

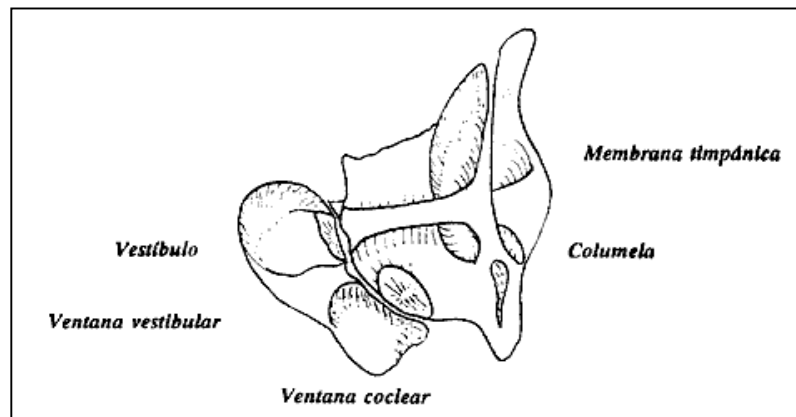


Figura 1.2 Anatomía interna del oído animal.

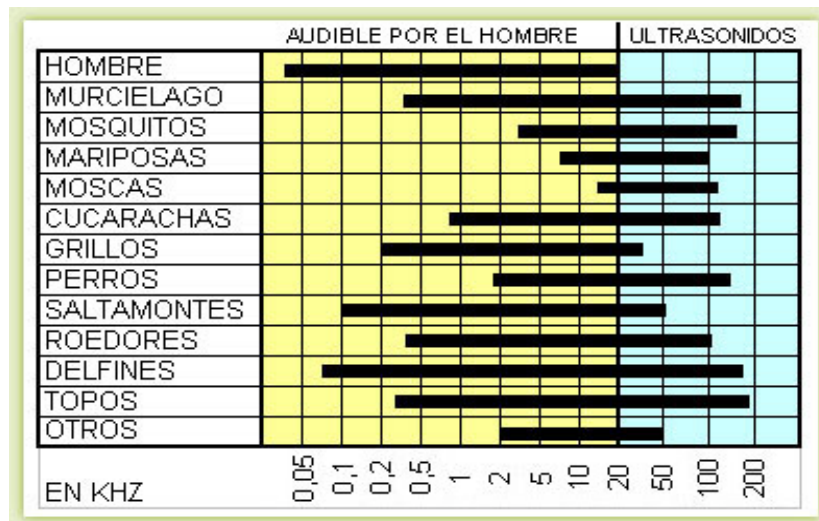


Figura 1.3 Frecuencia audibles en el hombre y frecuencias aproximadas para distintos tipos de animales.

Oído medio. Está constituido por un solo hueso llamado columela, el cual conduce las vibraciones de la membrana timpánica hacia el oído interno.

Oído interno. El oído interno es la parte estructural más compleja, en él se encuentran los receptáculos, los canales semicirculares, el sáculo y el utrículo, cuya función es la percepción de movimiento y posición. Entre las vellocidades de los receptáculos, del sáculo y del utrículo existe una partícula de carbonato calizo. Con la fuerza de gravedad en esta partícula se generan impulsos nerviosos que se envían al cerebro proporcionándole información sobre la posición en el espacio.

El funcionamiento del oído animal es de la siguiente manera: El oído externo y el oído medio conducen el sonido del medio ambiente hacia la cóclea. El oído interno se encuentra inmerso en un líquido llamado linfa. Cuando las vibraciones del tímpano llegan a este líquido a través de la columela, éstas se propagan hasta llegar y activar las vellocidades de la membrana basilar, la cual a su vez las envía a través del nervio auditivo al encéfalo medio, donde estas vibraciones son interpretadas como sonido.

La capacidad auditiva de los animales es más amplia que en los humanos, es decir, pueden percibir sonidos con una amplitud mínima, por lo tanto, son más sensibles a los sonidos con una mayor amplitud, los cuales les causan malestares auditivos. Especialmente los animales mamíferos perciben frecuencias muy superiores a los 20 kHz y los sonidos perceptibles por las aves es más reducida, alcanzando aproximadamente los 30 kHz [URL 4].

1.4 Comportamiento de los animales ante las vibraciones ultrasónicas

Los conocimientos adquiridos sobre el comportamiento de los animales frente a la emisión de ondas de ultrasonido se basan en el estudio de la percepción del sonido por el oído animal y la figura 1.3. Para comprobar esta información se realizaron los dos experimentos siguientes:

1. Determinación de frecuencias audibles. La determinación de las frecuencias audibles por los animales se llevó a cabo empleando el circuito electrónico mostrado en la figura 1.4, el cual genera señales en un rango de frecuencias entre 12 kHz y 71 kHz. Este circuito está diseñado para ajustar con un potenciómetro la frecuencia deseada.

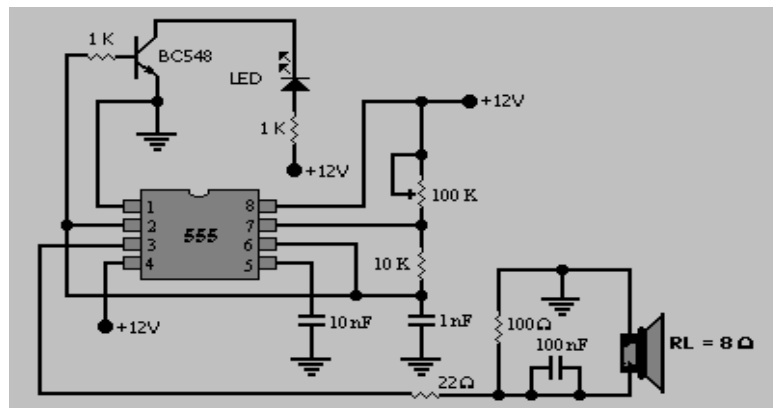


Figura 1.4 Circuito generador de frecuencias (12 a 71) kHz.

Con el circuito de la figura 1.4 fue posible comprobar que los animales poseen rangos de frecuencias audibles superiores a la de los humanos, estas frecuencias superan los 55 kHz en algunos animales domésticos. Este experimento se realizó de la siguiente manera:

En una jaula se encerraron una a la vez las siguientes aves: pájaros, pollos, palomas y pericos, adaptando previamente una bocina muy próxima a la jaula (15 cm de separación). Una vez transcurrido un tiempo de adaptación, se emitieron a intervalos regulares de tiempo sonidos con frecuencias ultrasónicas iniciando con una frecuencia de 20 kHz. Con cada incremento de frecuencia se observó un comportamiento distinto. Cuando la frecuencia emitida fue superior a 28 kHz las aves tuvieron un comportamiento indiferente a la emisión de estos sonidos. De esta manera se determinó el rango de frecuencias audibles en las aves con las que se experimentaron. De la misma manera se realizaron los experimentos con distintos roedores y animales rastreros.

La experimentación con perros y gatos se realizó en un cuarto cerrado. Una vez que se adaptaron a este medio, se llevó a cabo el mismo procedimiento que en los experimentos anteriores, con esto fue posible comprobar de acuerdo al comportamiento que mostraron, que son capaces de percibir frecuencias ultrasónicas de hasta 30 kHz.

Con base en estos experimentos, en la tabla 1.1 se muestran los rangos de frecuencias ultrasónicas audibles obtenidos experimentalmente con estos animales.

Generando una señal de barrido que cubra el rango de frecuencias de la tabla 1.1 es posible causar molestias auditivas en los animales que en ella se encuentran clasificados, aunque por naturaleza los animales desarrollan ciertas habilidades para acostumbrarse a estos sonidos. Para generar un tono realmente molesto a sus oídos fue necesario realizar el experimento 2.

CLASES DE ANIMALES	RANGO DE FRECUENCIAS ULTRASÓNICAS AUDIBLES (kHz)
Aves	20 a 28
Perros, gatos y conejos	20 a 30
Ratones y hámsters	20 a 33
Lagartijas	20 a 35
Ratas y tlacuaches	20 a 40
Roedores de campo	20 a 45

Tabla 1.1 Resultados experimentales de las frecuencias ultrasónicas audibles por algunos animales.

NIVELES SONOROS Y RESPUESTA DEL OÍDO HUMANO		
SONIDOS COMUNES	NIVEL DE PRESIÓN SONORA (dB)	EFEECTO
Zona de despegue de cohete (sin protección auditiva)	180	Pérdida irreversible del oído
Operación en pista de Jet Sirena de ataque aéreo	140	Posible pérdida del oído
Trueno	130	Dolorosamente fuerte
Despegue de un Jet (a 60 m)	120	Dolor auditivo
Martillo neumático (a 1 m) Concierto de rock	110	Extremadamente fuerte
Petardos Camión recolector	100	Muy fuerte
Camión pesado (a 15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 hrs.)
Reloj despertador (a 60 cm) Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso Tránsito por autopista	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación	60	Intrusivo
Tránsito liviano (a 30 m)	50	Suave
Living o Sala de Estar Dormitorio Oficina calma	40	
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy suave
Estudio radiofónico	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral de audición

Tabla 1.2 Nivel de presión sonora y daños que causa su audición.

Al medir el sonido en Pascales se obtienen números muy grandes y poco manejables, por este motivo se usa la escala de los decibeles (dB), correspondiente a una medida relativa conocida como NPS, además porque en el oído no existe proporcionalidad directa entre la intensidad del sonido con el grado de sensación percibida, es decir, el oído no percibe la intensidad de manera lineal sino de forma logarítmica.

El NPS en decibeles es el resultado de la siguiente operación matemática [5] [17] [URL 9]:

$$\text{NPS} = 20 \text{ Log}_{10} \left(\text{Presión Acústica} / \text{Presión de referencia} \right) \quad (1.1)$$

La presión de referencia es el sonido mínimo que puede detectar el oído humano (20 μ Pascales). Cuando la presión acústica presente es igual a la presión de referencia se obtiene un NPS = 0 dB, siendo este último valor el que representa el umbral de audición.

Los sonidos más intensos que pueden soportarse sin experimentar un dolor auditivo agudo corresponden a unos 20 Pascales, con el cual se obtiene un NPS = 120 dB; en este punto, el sonido es tan fuerte que se empieza a experimentar dolor auditivo [5] [7] [18] [URL 10].

En la tabla 1.2 se comparan algunos sonidos comunes y muestra cómo se clasifican los niveles de presión sonora desde el punto de vista del daño que pueden causar por su audición [5] [17] [URL 9].

NIVEL DE PRESIÓN SONORA (dB)	MÁXIMO TIEMPO DE EXPOSICIÓN
90	8 horas
93	4 horas
96	2 horas
99	1 hora
102	30 minutos
105	15 minutos
108	7 minutos, 30 segundos
111	3 minutos, 45 segundos
120	28 segundos

Tabla 1.3 Nivel de presión sonora y tiempo máximo de exposición.

Cuando el sistema auditivo se expone a presiones de sonido de alta intensidad durante un determinado tiempo, puede sufrir daños permanentes sin posibilidad de recuperación natural ó médica. Para proteger a la humanidad del peligro del ruido excesivo, la Comunidad Europea diseñó la tabla 1.3 [URL 11] donde se establecen los máximos niveles de presión sonora y los máximos tiempos de exposición del oído a estas presiones de sonido.

En cuanto a la audibilidad, al generar simultáneamente dos NPS iguales, no producen en el oído una sensación audible al doble [7] [18]. Esto se debe a que la sensación sonora se rige de forma aproximada por la gráfica de curvas Fletcher-Munson⁴. Esta gráfica se ilustra en la figura 1.6 [7] [5] [URL 12].

A bajo nivel de volumen, al oído le cuesta mucho oír las frecuencias graves y en menor medida las agudas. Conforme se va elevando el volumen las diferencias de nivel de sonoridad entre las dos frecuencias se van también igualando.

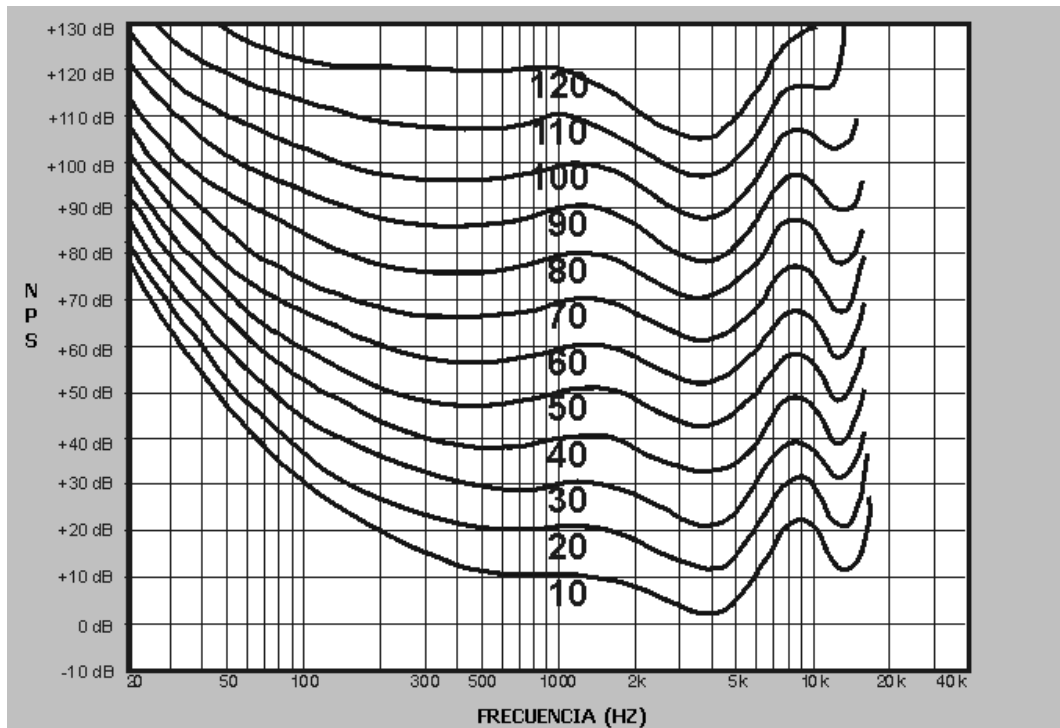


Figura 1.6 Gráfica de curvas Fletcher-Munson.

⁴ Llamadas así por Fletcher y Munson quienes en 1933 estudiaron concienzudamente este fenómeno por primera vez.

La respuesta en frecuencia del oído es más "plana" a niveles altos que a niveles bajos de volumen. Por ejemplo, una señal de 50 Hz y 60 dB de NPS se percibirá 30 dB más bajo que una señal de 1000 Hz y 60 dB de NPS. Sin embargo, una señal de 50 Hz y 100 dB de NPS sólo se percibirá con 10 dB más abajo que una señal de 1000 Hz y 100 dB de NPS.

Con base en el punto anterior, se puede observar que el dB no es un valor lineal. Si la presión acústica se midiera linealmente, tendría un valor incorrecto en cuanto a la percepción por el oído humano. El oído no se comporta igual para el mismo nivel de presión en diferentes frecuencias, por lo tanto, es necesario ajustar los niveles de dB medidos con respecto a la percepción del oído. Esta corrección se realiza ponderando los dB medidos mediante una tabla de ponderaciones ya especificada.

La gráfica de curvas de Fletcher-Munson se basa en las ponderaciones A, B y C que corresponden a los niveles bajos, medios y agudos respectivamente de presión sonora. Esta gráfica presenta un problema que tiene que ver con el hecho de que fueron obtenidas para tonos puros, los cuales son muy raros en la naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiental contienen muchas frecuencias simultáneamente. Esta ha sido tal vez la razón principal por la cual la intención original detrás de las ponderaciones A, B y C fracasó. A pesar de este problema la escala de ponderación A es utilizada actualmente y se ha vuelto muy popular y difundida en todo el mundo [URL 9]. La razón principal es que existe una buena correlación entre el nivel sonoro con ponderación A y el daño auditivo. Sin otra información disponible, la ponderación A es la mejor medida disponible para evaluar problemas de ruido y en consecuencia tomar decisiones.

Es interesante observar que a pesar de que esta escala fue originalmente concebida para medir sonidos de bajo nivel, resulta ser más adecuada para medir daño auditivo, porque proporciona una medida objetiva de los sonidos que afectan la salud y la tranquilidad, así como la interferencia con diversas actividades. Es difícil de entender como se dió esta relación, pero probablemente se pueda atribuir a la carencia de otros instrumentos de medición, a la suerte accidental, o al uso consciente de todos los tipos de instrumentos disponibles para superar las circunstanciales fronteras del conocimiento.

En la tabla 1.4 se muestra la tabla de ponderaciones A y C [URL 13]. Los decibeles ya ponderados en "A" se representan como dB(A) y los no ponderados (lineales) simplemente como dB. En esta tabla se puede observar que el oído percibe un NPS distinto al calculado ó medido. Por ejemplo, si para una frecuencia de 100 Hz se calcula y se miden 80 dB, al ponderarlo se obtienen sólo 60,9 dB(A) ($80 - 19.1$), esto quiere decir que un nivel de presión sonora de 80 dB en una frecuencia de 100 Hz es percibida por nuestro sistema de audición como si realmente tuviese 60,9 dB(A) y no 80 dB.

Tomando de la tabla 1.4 los valores con ponderación A para frecuencias superiores a los 20 kHz, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 1.5.

De acuerdo a la tabla 1.5 se puede comprobar que para frecuencias superiores a los 20 kHz el NPS disminuye rápidamente con el incremento de la frecuencia. Por ejemplo, si para 20 kHz se había calculado un NPS de 120 dB a determinada distancia, el oído solamente percibirá un NPS de 110.7 dB(A) a esa distancia. Una frecuencia de 40 kHz y 120 dB sólo se percibirá con un NPS de 58.2 dB(A) a dicha distancia. Esta es la razón por la cual el sistema de protección propuesto genera una frecuencia máxima aproximadamente de 70 kHz, ya que pierde sentido generar frecuencias superiores a ésta, con un nivel de presión sonora muy bajo.

TABLAS DE PONDERACIÓN A Y C			
FRECUENCIA NOMINAL	FRECUENCIA EXACTA	PONDERACIÓN A	PONDERACIÓN C
10	10.00	-70.4	-14.3
12.5	12.59	-63.4	-11.2
16	15.85	-56.7	-8.5
20	19.95	-50.5	-6.2
25	25.12	-44.7	-4.4
31.5	31.62	-39.4	-3.0
40	39.81	-34.6	-2.0
50	50.12	-30.2	-1.3
63	63.10	-26.2	-0.8
80	79.43	-22.5	-0.5
100	100.00	-19.1	-0.3
125	125.9	-16.1	-0.2
160	158.5	-13.4	-0.1
200	199.5	-10.9	00
250	251.2	-8.6	00
315	316.2	-6.6	00
400	398.1	-4.8	00
500	501.2	-3.2	00
630	631.0	-1.9	00
800	794.3	-0.8	00
1000	1000.0	0.0	00
1250	1259	+0.6	00
1600	1585	+1.0	-0.1
2000	1995	+1.2	-0.2
2500	2512	+1.3	-0.3
3150	3162	+1.2	-0.5
4000	3981	+1.0	-0.8
5000	5012	+0.5	-1.3
6300	6310	-0.1	-2.0
8000	7943	-1.1	-3.0
10000	10000	-2.5	-4.4
12500	12590	-4.3	-6.2
16000	15850	-6.6	-8.5
20000	19950	-9.3	-11.2
25000	25120	-37.6	
31500	31620	-49.7	
40000	39810	-61.8	

Tabla 1.4 Tabla de ponderaciones A y C.

TABLA DE PONDERACIÓN A PARA FRECUENCIAS ULTRASÓNICAS			
FRECUENCIA NOMINAL (kHz)	NPS CALCULADO (dB)	PONDERACIÓN A	NPS PONDERADO (dB(A))
20	120	-9.3	110.7
25	120	-37.6	82.4
31.5	120	-49.7	70.3
40	120	-61.8	58.2

Tabla 1.5 Tabla de ponderación A para frecuencias ultrasónicas.

En el caso de los sonidos complejos⁵ la sensación de sonoridad también depende del espectro de frecuencias que contienen [5]. Si éste contiene más frecuencias agudas será más alto su nivel de intensidad que otro sonido compuesto con un menor número de frecuencias agudas, aunque su intensidad sea menor. Otro fenómeno de la percepción del sonido es el enmascaramiento; si se emiten simultáneamente dos sonidos, uno fuerte y el otro débil, éste último puede no oírse en absoluto, debido a la disminución de sensibilidad en la membrana basilar producida por el sonido fuerte. El enmascaramiento varía mucho con la intensidad y la diferencia de frecuencia de los sonidos.

De forma general, en la práctica es mucho más fácil calcular las emisiones de sonido que medirlas. La razón por la que resulta difícil medir el sonido es que el nivel de sonido a medir tiene que ser por lo menos 10 dB(A) superior al ruido de fondo para poder medirlo adecuadamente. Así pues, en casi todo el mundo las autoridades públicas confían más en los cálculos que en las mediciones a la hora de diseñar equipos de audio [URL 9].

Con base en el estudio realizado acerca de la fisiología del oído animal con respecto a la percepción del sonido, las tablas 1.3, 1.4 y 1.6 se utilizan como referencias para los cálculos respectivos del NPS que el sistema debe generar.

1.6 Dispositivos repelentes ultrasónicos comerciales

Actualmente existen empresas que fabrican dispositivos repelentes ultrasónicos. En la tabla 1.6 se muestran algunos dispositivos comercializados; en ella se describen sus características, así como las empresas que los producen.

MODELO	FABRICANTE	RANGO DE FREC.	POT. DE CONSUMO	NPS A 1 m	FUENTE DE ALIMENTACIÓN
SC-4	Radarcán	ultrasónico	8 w	-	120 ó 220 VAC
SC-16	Radarcán	ultrasónico	4.6 w	110 dB	9 VCC
SC-10R	Radarcán	ultrasónico	-	-	4 pilas de 1.5 V
SC-11R	Radarcán	ultrasónico	1.5 w	-	120 ó 220 VAC
SC-12R	Radarcán	ultrasónico	-	-	120 ó 220 VAC
Repeltronic	Steren	(22-45) kHz	-	110 dB	120 VCA
S190162	Bark Free	4 kHz	-	120 dB	12 VDC
PC2020	Sonic Technology	(32-62) kHz	2 w	-	120 ó 220 VAC
PC1000	Sonic Technology	(32-62) kHz	1.5 w	-	120 ó 220 VAC
S190115	Sonic Technology	ultrasónico	15 w	120 dB	12 VDC
S190110	Lentes	ultrasónico	-	120 dB	-
S190112	Lentes	ultrasónico	-	120 dB	4 pilas tipo D

Tabla 1.6 Dispositivos repelentes ultrasónicos comerciales.

⁵ Estos sonidos se componen de varias frecuencias.

Capítulo 2

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ULTRASÓNICO DE POTENCIA

En este capítulo se describe en forma detallada el diseño e implementación de cada uno de los módulos que integran el sistema de protección completo. Para la elección de los elementos y las normas que caracterizan a cada uno de ellos se presenta el resultado de las correspondientes investigaciones y un análisis comparativo, con el propósito de elegir los elementos y las normas más indicadas para cada aplicación.

Con el fin de proporcionar bases sólidas al diseño e implementación del sistema, se describe la aplicación de la teoría obtenida bajo la investigación realizada en el capítulo 1, asimismo, se explican ampliamente las bases matemáticas y teóricas sobre la generación del NPS a través de sistemas de audio, tomando en consideración los factores que influyen en la percepción del mismo.

2.1 Configuración general del sistema de protección ultrasónico de potencia

El sistema de protección ultrasónico de potencia consta de los siguientes módulos:

- **Subsistema de control.** Genera tres barridos de frecuencias ultrasónicas, acopla las señales ultrasónicas antes de proporcionarlas a los amplificadores, transmite una señal de aviso a una central utilizando la norma de comunicación serial RS-422 diferencial, activa y desactiva el sistema de ventilación del subsistema de alarma y los leds indicadores del subsistema de control.
- **Subsistema de detección.** Detectan la presencia de algún intruso dentro del área protegida y envían una señal de alarma al subsistema de control.
- **Subsistema de alarma.** Amplifica las señales ultrasónicas y las emite a través de los altavoces.
- **Subsistema de registro y consulta de eventos.** El programa de registro y consulta de eventos configura el puerto serial de la PC para recibir la señal de aviso enviada por el subsistema de control; cada vez que recibe esta señal de aviso registra la hora y la fecha en que ha ocurrido el evento. La recepción de la señal se realiza a través de un circuito receptor de señales RS-422 diferencial y la convierte a RS-232, esta última se conecta al puerto serial de la PC.

En la figura 2.1 se muestra la distribución de los módulos que integran el sistema completo.

2.2 Subsistema de control

El subsistema de control basa su funcionamiento en el microcontrolador PIC16F876 de la familia *Microchip Technology*. A través de un circuito lógico combinatorio contenido en este mismo subsistema se reciben las señales de alarma generadas por alguno de los sensores del subsistema de detección; la salida de este circuito combinatorio genera una interrupción en el microcontrolador. Una vez generada la interrupción, el microcontrolador genera tres diferentes barridos de frecuencias ultrasónicas, éstas se acoplan y se proporcionan a los amplificadores de potencia. Este subsistema permite además establecer una comunicación serial RS-422 diferencial con una central ubicada a 400 metros de distancia. Contiene leds para indicar el funcionamiento del sistema e indicar la generación de la alarma, y un circuito que activa los ventiladores del subsistema de alarma.

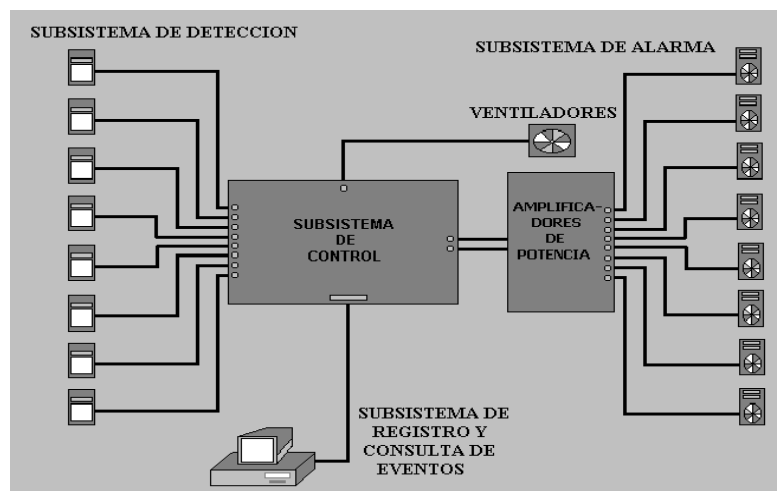


Figura 2.1 Diagrama a bloques del sistema de protección ultrasónico de potencia.

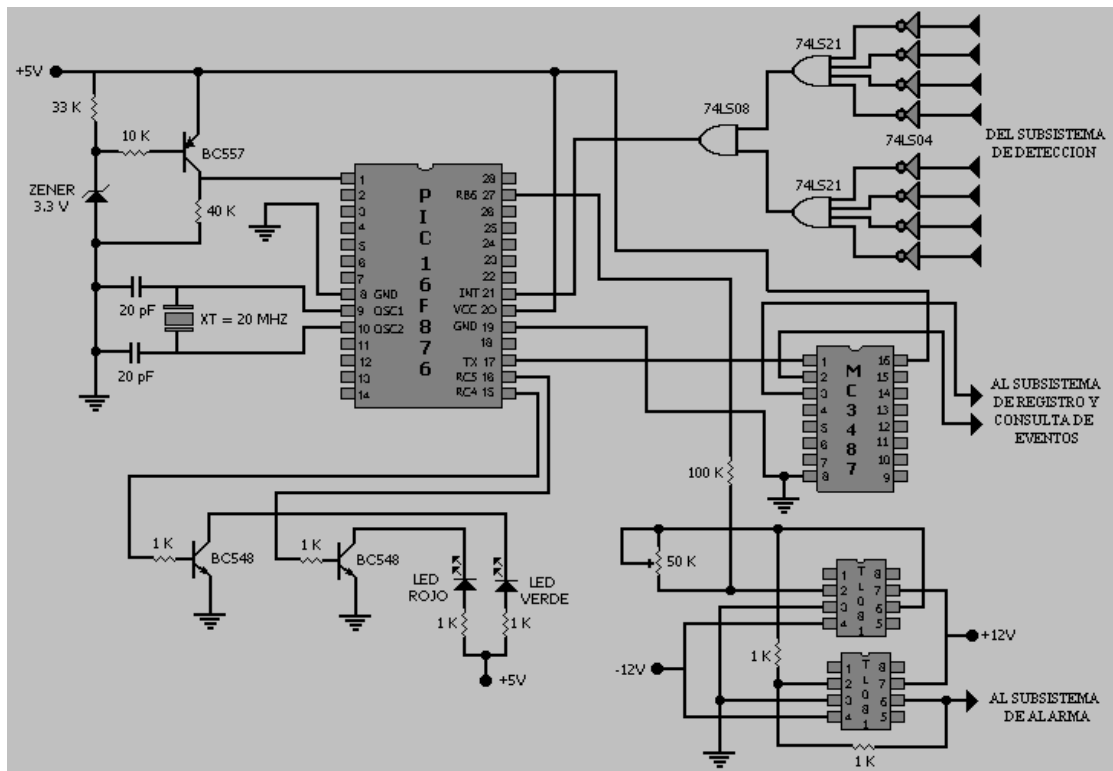


Figura 2.2 Esquemático del subsistema de control.

2.2.1 Diseño del subsistema de control

El subsistema de control se compone de una tarjeta que basa su funcionamiento en un microcontrolador PIC16F876, mediante el cual se generan los barridos de frecuencias. Este subsistema incluye: Un circuito lógico combinatorio que genera la interrupción en el microcontrolador y que tiene como entradas las señales de alarma provenientes de los sensores del subsistema de detección, un circuito que acopla las señales ultrasónicas para proveerlas a los amplificadores de potencia del subsistema de alarma y un circuito que utiliza el estándar RS-422 diferencial para transmitir una señal de aviso de la ocurrencia de un evento hasta una central ubicada a 400 metros de distancia. En la figura 2.2 se ilustra el esquemático de este subsistema.

La velocidad de operación del microcontrolador juega un papel muy importante en la programación de las señales, ya que para generar la frecuencia más alta del barrido (69.4 kHz), es necesario generar intervalos de tiempo de 7.2 microsegundos, el cual representa la mitad del periodo de esta frecuencia, en este intervalo de tiempo se debe hacer el cambio de nivel lógico en la terminal del microcontrolador que se ha destinado para la generación de los barridos de frecuencias (terminal RB6), obteniendo así la frecuencia máxima.

El microcontrolador trabaja a una frecuencia de operación de 20 MHz proporcionada por el cristal; internamente el microcontrolador divide esta frecuencia de operación entre 4, lo que hace que la frecuencia efectiva de trabajo sea de 5 MHz, logrando con esto que cada instrucción se ejecute en 200 nanosegundos. Esta es la frecuencia de operación que debe utilizarse para que el conjunto de instrucciones de las rutinas que generan los barridos de frecuencias generen las frecuencias exactamente como fueron programadas; en caso de utilizar un cristal con una frecuencia diferente, provocará un desajuste en las frecuencias de las señales.

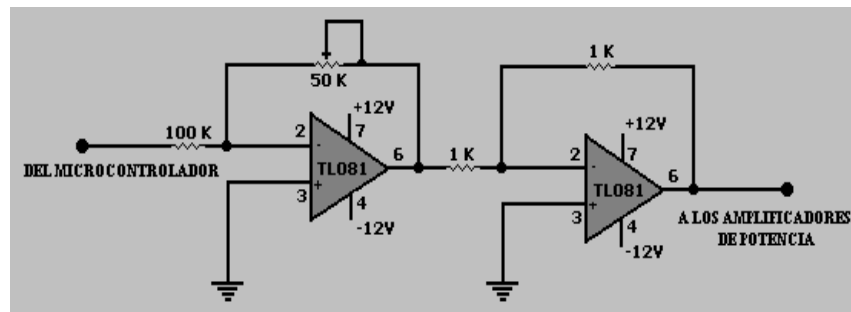


Figura 2.3 Circuito acoplador con TL081.

La señal de alarma es generada por alguno de los sensores del subsistema de detección, esta señal entra en un circuito lógico combinatorio contenido en el subsistema de control, el cual proporciona un nivel lógico bajo en la terminal correspondiente a las interrupciones externas del microcontrolador.

Tras una interrupción externa, el microcontrolador realiza lo siguiente:

- Activa los ventiladores del subsistema de alarma y los leds indicadores; el led rojo indica que se ha detectado un intruso o que ha ocurrido un evento y se apagará al igual que los ventiladores hasta que se termine la generación de la alarma. El led verde indica el funcionamiento del sistema; este led se desactiva cuando ocurre un evento y vuelve a activarse cuando termina la generación de la alarma.
- Ejecuta las rutinas que generan los tres barridos de frecuencias ultrasónicas. Estas señales se generan en el pin RB6 del puerto B. Como los amplificadores deben tener como entrada una señal con una amplitud máxima de 3 volts, es necesario acoplar la amplitud de las señales ultrasónicas antes de proporcionárselas. Para acoplar estas señales se usan los circuitos integrados TL081 de *Motorola*, los cuales permiten reducir la amplitud de la señal ultrasónica de manera eficiente, debido a que su ancho de banda es de 4 MHz [19] [20] introduciendo sólo 0.05% de distorsión en una señal de 80 kHz. El esquemático se muestra en la figura 2.3.

La primera configuración es un amplificador inversor con ganancia negativa que reduce la amplitud de la señal de entrada hasta un 50 %. La salida de este inversor puede enviarse a los amplificadores sin ningún problema, pero como la señal de salida se desfaza 180°, se adiciona un segundo amplificador inversor con ganancia unitaria, que simplemente invierte nuevamente la señal antes de proporcionarla a los amplificadores de potencia.

- Por último, envía una señal de aviso a una central localizada aproximadamente a 400 metros de distancia. Este aviso se realiza a través del pin destinado a las transmisiones seriales del microcontrolador (pin 17) y el circuito integrado MC3487 de *Texas Instrument Incorporated*, el cual está diseñado para convertir niveles de voltaje TTL a niveles de voltaje RS-422 diferencial. En la figura 2.4 se ilustra el circuito transmisor de señales RS-422 diferencial contenido en el subsistema de control, y en la sección 2.2.4 se explica con detalle esta transmisión.

2.2.2 Señales de barrido

Las señales de barrido generadas por el microcontrolador son de tres tipos: ascendente, descendente y ascendente-descendente. Para una mejor comprensión de la generación de los

barridos de frecuencias, en la figura 2.5 se muestran las gráficas correspondientes a la forma en que se realiza cada uno de ellos.

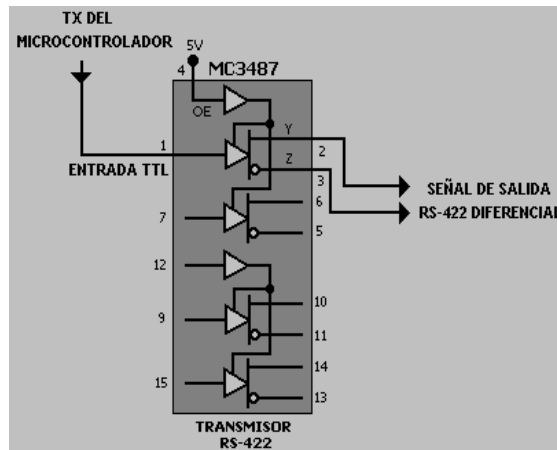
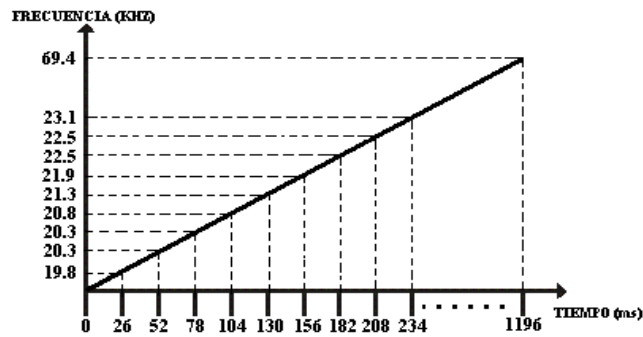
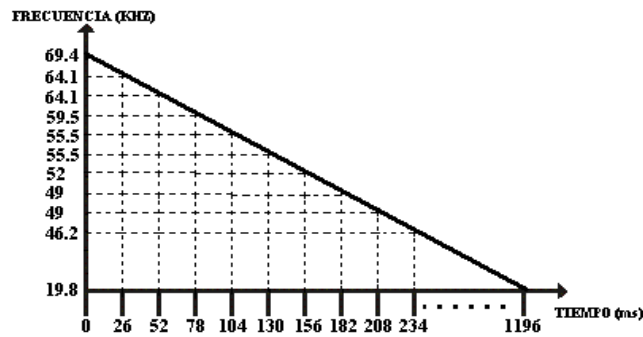


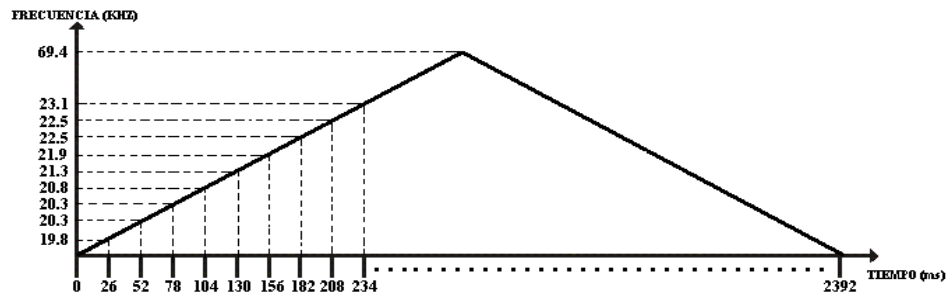
Figura 2.4 Circuito transmisor RS-422 diferencial.



a)



b)



c)

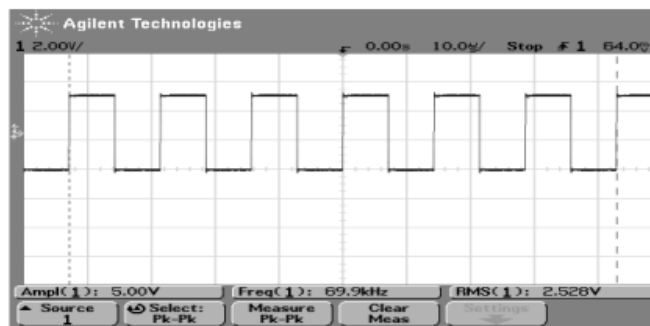
Figura 2.5 Gráficas de barrido: a) ascendente; b) descendente; c) ascendente-descendente.

La figura 2.5 a) muestra como se realiza el barrido ascendente entre 19.8 kHz y 69.4 kHz. Inicialmente genera una frecuencia mínima de 19.8 kHz y la mantiene durante 26 milisegundos de tiempo, después incrementa aproximadamente en uno esta frecuencia generando una nueva de 20.3 kHz, esta nueva frecuencia se mantiene generada durante el mismo intervalo de tiempo, y así sucesivamente se generan las demás frecuencias hasta alcanzar una frecuencia máxima de 69.4 kHz. En este barrido se generan 46 frecuencias distintas, debido a esto el barrido ascendente se genera en un intervalo de tiempo de 1.196 segundos.

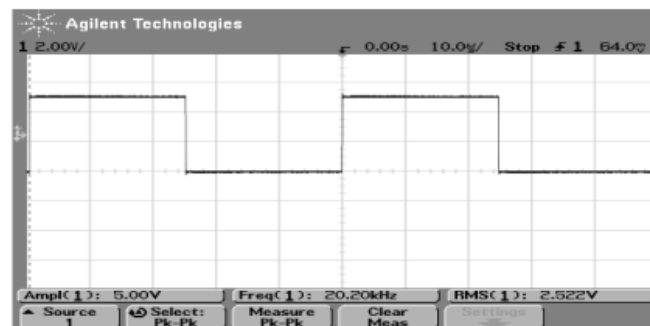
La figura 2.5 b) muestra el barrido descendente entre 69.4 kHz y 19.8 kHz. En este barrido se observa la generación inicial de una frecuencia máxima de 69.4 kHz., esta frecuencia también es generada durante un intervalo de 26 milisegundos de tiempo e inmediatamente la frecuencia desciende y se mantiene generada cada una de ellas durante intervalos regulares de 26 milisegundos hasta obtener la frecuencia mínima de 19.8 kHz. El tiempo que toma el barrido descendente para generar todas las frecuencias es de 1.196 segundos.

En la figura 2.5 c) se puede apreciar la forma en que se realiza un barrido ascendente-descendente. Este barrido como se puede observar utiliza los dos barridos anteriores, por lo tanto, inicia generando la frecuencia mínima de 19.8 kHz y la mantiene generada durante 26 milisegundos de tiempo, esta secuencia se repite hasta obtener una frecuencia intermedia de 69.4 kHz, al llegar a ésta, se decrementa la frecuencia y se mantiene generada durante 26 milisegundos, ésto se repite hasta obtener nuevamente la frecuencia inicial. La combinación de los barridos se lleva a cabo durante un intervalo de 2.392 segundos.

En la figura 2.6 se pueden apreciar dos frecuencias generadas por los barridos a través del microcontrolador. En la figura 2.6 a) se muestra la frecuencia máxima y en la figura 2.6 b) la frecuencia mínima. En los tres tipos de barridos se generan estas señales de forma idéntica.



a)



b)

Figura 2.6 Señales de barrido: a) Frecuencia máxima; b) Frecuencia mínima.

2.2.3 Circuito de vigilancia (Watchdog Timer)

La función del circuito de vigilancia ó Watchdog Timer es reiniciar al microcontrolador cuando el programa de éste se ha enclavado en un ciclo en el que no debe quedarse, debido a fallas en la programación o por alguna razón externa. El sistema desarrollado es un sistema autónomo, por lo tanto, debe contar con este circuito de vigilancia ya que es muy útil cuando se trabaja en ambientes con mucha interferencia o ruido electromagnético, tal es el caso de las subestaciones eléctricas.

El Watchdog Timer funciona como un oscilador interno con un periodo nominal de 18 milisegundos, este periodo puede ampliarse hasta 2.3 segundos utilizando el multiplicador (*prescaler*) de 128 en el registro OPTION_REG. El oscilador del Watchdog Timer corre de manera independiente al oscilador externo, lo que significa que el Watchdog correrá incluso si este último ha sido parado. Cuando se habilita el funcionamiento del Watchdog, dicho circuito hace que el microcontrolador se reinicie cada determinado tiempo. Esta reinicialización puede ser evitada mediante una instrucción especial del microcontrolador (CLRWDT: borra el conteo del Watchdog), la cual se debe ejecutar antes de que termine el periodo nominal de dicho temporizador. Si el programa se sale de su flujo normal por algún ruido o interferencia externa, el microcontrolador se reinicia cuando termina el tiempo programado y restablece el programa para continuar con su funcionamiento normal, cuidando de no reiniciarlo durante la generación de los barridos de frecuencias y la transmisión.

El microcontrolador espera continuamente una interrupción externa para ejecutar la rutina de alarma, mientras no se produzca ninguna interrupción, el microcontrolador se reinicia cada 2.3 segundos. Una vez provocada la interrupción externa, el microcontrolador ejecuta el primer barrido de frecuencias. Dado que un barrido ya sea ascendente o descendente se genera durante 1.196 segundos, se ejecuta la instrucción CLRWDT antes de volver a generar el mismo barrido para evitar que se cumpla el periodo del temporizador y se pueda generar el barrido completamente, es decir, durante 5 minutos.

Considerando que el oscilador interno es del tipo RC, su periodo puede variar con las condiciones de voltaje y temperatura, por ello se ubican las instrucciones CLRWDT en sitios específicos dentro del programa del microcontrolador.

2.2.4 Comunicación serial

Existen dos formas de intercambiar información binaria: la paralela y la serial. La comunicación paralela transmite todos los bits de un dato de manera simultánea y tiene la ventaja que la transferencia es rápida, pero la desventaja de necesitar una gran cantidad de hilos o líneas, situación que encarece los costos, además surgen problemas de comunicación cuando la distancia es grande, debido a que la capacitancia entre los conductores limita el correcto intercambio de datos a unos pocos metros. La comunicación serial por su parte transmite un bit a la vez, por lo tanto es más lenta, pero posee la ventaja de necesitar un menor número de líneas para la transferencia de la información y las distancias a las cuales se puede realizar el intercambio de datos es mayor [21] [22].

2.2.4.1 Normas de comunicación serial

Para la comunicación de datos en serie la Unión Internacional para la Reglamentación de las Telecomunicaciones (UIT) dispone del Comité Consultivo Internacional de Telegrafía

y Telefonía (CCITT), el cual establece una serie de normas para diferentes campos de las comunicaciones, dentro de estas descripciones de normatividad y control de las telecomunicaciones está el libro naranja para la telegrafía y la telefonía que contiene a la serie "X" para las redes y circuitos especializados en la transmisión de datos, estas normas se designan como RS-232, RS-422, RS-423 y RS-485 [URL 14] [URL 15].

2.2.4.1.1 Norma RS-232

En 1969 la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA), conjuntamente con los Laboratorios Bell y los fabricantes de equipos de comunicaciones, formularon el EIA RS-232-C [21]. El propósito inicial fue la conexión entre un DTE⁶ y un DCE⁷, empleando un intercambio de datos binarios en serie.

Con respecto a las características mecánicas del estándar RS-232, existen dos tipos de conectores, el DB25 (con 25 terminales) y el DB9 (con 9 terminales). Sin embargo actualmente la mayoría de los equipos utilizan éste último [21] [URL 15]. En la tabla 2.1 se muestran las funciones asignadas a cada una de las terminales del conector DB9.

Existen dos formas de comunicación serial: la síncrona y la asíncrona [21] [22]. En la comunicación síncrona además de una línea sobre la que se transfieren los datos, se necesita otra que contenga pulsos de reloj que indiquen cuando un dato es válido; la duración del bit está determinada por la duración del pulso de sincronismo. En la comunicación asíncrona los pulsos de reloj no son necesarios y se acude a otros mecanismos para realizar la lectura o escritura de los datos; la duración de cada bit está determinada por la velocidad de transmisión. En la figura 2.7 se muestra la estructura de un carácter transmitido de forma asíncrona.

NUM. DE PIN	NOMBRE DE LA SEÑAL
1	Detector de portadora (CD)
2	Recepción de datos (RxD)
3	Transmisión de datos (TxD)
4	Datos listos en terminal (DTR)
5	Tierra (GND)
6	Datos listos para enviar (DSR)
7	Solicitud de envío (RTS)
8	Listo para envío (CTS)
9	Detector de tono (RI)

Tabla 2.1 Terminales del conector DB9.

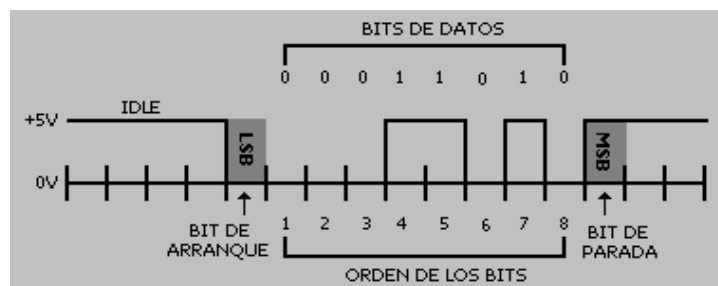


Figura 2.7 Señal presente sobre una línea RS-232.

⁶ Equipo Terminal de Datos.- Es el sistema generador o receptor de datos.

⁷ Equipo de Comunicaciones de Datos.- Es el sistema encargado de establecer, mantener y terminar una conexión.

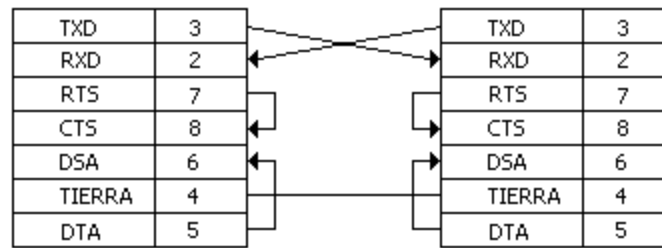


Figura 2.8 Conexión entre dos equipos RS-232 DTE sin señales de acoplamiento.

Normalmente cuando no se realiza ninguna transferencia de datos, la línea del transmisor es pasiva (*idle*) y permanece en un estado alto. Para empezar a transmitir datos, el transmisor coloca esta línea en bajo durante un tiempo de un bit, lo cual se conoce como bit de inicio (*start bit*) y a continuación empieza a transmitir con el mismo intervalo de tiempo los bits correspondientes al dato (que pueden ser 7 u 8 bits), empezando por el menos significativo (LSB) y terminando con el más significativo (MSB). Al finalizar se agrega el bit de paridad (*parity*) si es que está activada esta opción, y los bits de paro (*stop*) que pueden ser 1 o 2, en los cuales la línea regresa a un estado alto. Cuando esta operación concluye, el transmisor está preparado nuevamente para transmitir el siguiente dato.

El receptor no está sincronizado con el transmisor y desconoce cuando va a recibir datos. La transición de alto a bajo de la línea del transmisor activa al receptor y este genera un conteo de tiempo de tal manera que realiza una lectura de la línea medio bit después del evento; si la lectura realizada es un estado alto asume que la transición ocurrida fue ocasionada por ruido en la línea; si por el contrario la lectura es un estado bajo, considera válida la transición y empieza a realizar lecturas secuenciales a intervalos regulares de tiempo hasta conformar el dato recibido. El receptor puede tomar el bit de paridad al igual que los bits de parada para determinar la existencia o no de errores y realizar las acciones correspondientes.

Físicamente la transmisión de datos se realiza cambiando la diferencia de potencial entre la línea transmisora y la línea de tierra. En la recepción de datos se realiza el proceso inverso, las diferencias de potencial de la línea transmisora se detectan entre la línea receptora y la línea de tierra. Para conectar dos dispositivos DTE sin señales de acoplamiento, deben efectuarse las conexiones descritas en la figura 2.8.

En este estándar, la presencia de motores, generadores y las largas distancias restan eficiencia a la transmisión de datos, permitiendo comunicar solamente dispositivos separados por una longitud máxima de 15 metros con una velocidad de transmisión no mayor a 9.6 kbps (kilo bits por segundo) [21], siendo suficiente sólo para la conexión de equipos cercanos o que no están sujetos a importantes interferencias electromagnéticas.

2.2.4.1.2 Norma RS-422A y RS-423A

Para superar los problemas que presenta la norma RS-232, la EIA desarrolló y formuló en 1975 otros estándares de transmisión de datos más robustos, el RS-422A y el RS-423A. Estas normas están diseñadas para conexiones punto a punto en comunicaciones seriales con mayores velocidades de transmisión y mayores distancias [URL 15]. Utilizando cable trenzado es posible transmitir a distancias de hasta 1200 metros con velocidades de transmisión cercanas a 1 Megabit por segundo (1Mbps).

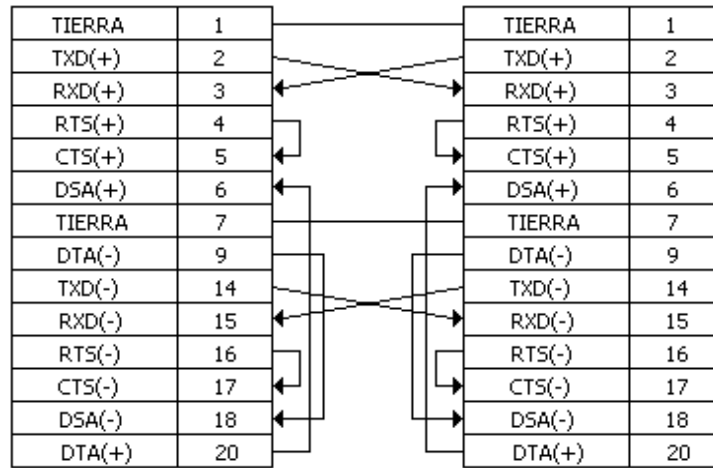


Figura 2.9 Conexión entre dos equipos RS-422 sin señales de acoplamiento.

La norma RS-422A utiliza señales diferenciales⁸ y la RS-423A emplea señales no diferenciales⁹ en los circuitos de interface [URL 15].

Si no se requiere la utilización de señales de acoplamiento, se opta por conectar las salidas de acoplamiento con las entradas del mismo dispositivo. Un esquema de conexión correcto sin acoplamiento se representa en la figura 2.9.

2.2.4.1.3 Norma RS-485

El modelo EIA-RS-485 es similar al RS-422 con respecto a la longitud y velocidad de transmisión, pero permite el alargamiento de la red en otros 1200 metros insertando un repetidor RS-485 en la línea. Dentro del estándar RS-485 existen diferentes variantes, una de ellas es conocida como 4D-RS-485 [URL 15], donde los pares de cables para transmisión y recepción se mantienen por separado, además soporta hasta 30 equipos emisores/receptores conectados en cada segmento de la red, como se muestra en la figura 2.10.

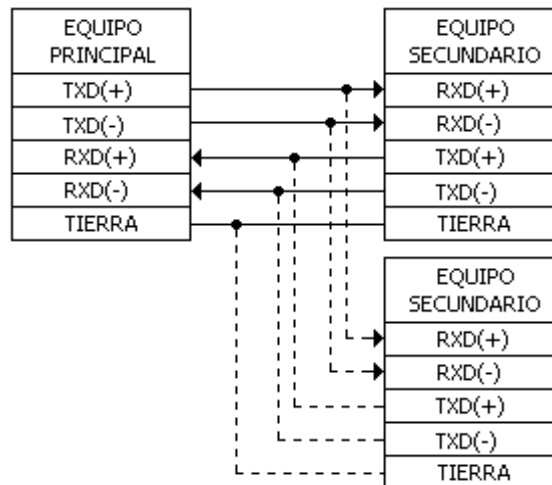


Figura 2.10 Conexión entre equipos 4D-RS-485.

⁸ Utiliza dos hilos para cada señal, así las condiciones de 0 y 1 lógico se determinan por cambios en la polaridad de los dos hilos, tomando como referencia uno con respecto del otro .

⁹ Utiliza un sólo hilo para transmitir, cambiando la polaridad con referencia a un circuito común.

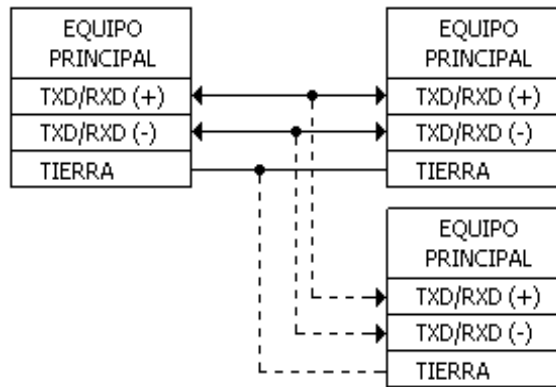


Figura 2.11 Conexión entre equipos 2D-RS-485.

El estándar 2D-RS-485 comúnmente conocido como estándar RS-485 [URL 15], utiliza una sola línea de transmisión balanceada bidireccional y la diferencia con el anterior es que los dispositivos deben conmutar entre modo receptor y modo transmisor. La interconexión entre equipos debe establecerse como se muestra en la figura 2.11.

En este modelo sólo uno de los puntos puede iniciar una comunicación, debido a que pueden conectarse hasta 30 equipos diferentes, por lo que no pueden ocupar la línea de envío simultáneamente. En este caso, el equipo principal (maestro), puede mandar datos en cualquier momento, mientras que los equipos secundarios (esclavos), únicamente deben responder cuando el mensaje va dirigido a ellos.

Por otra parte, los equipos deben estar siempre en modo receptor, excepto en el momento que transmitirán, en el cual pasan a modo de envío. El equipo principal debe cambiar a modo de envío cuando mande datos a un equipo secundario. Una vez finalizado el envío de datos, debe pasar a modo de recepción y esperar a que el equipo secundario le devuelva una respuesta a su mensaje.

En ambos casos la línea de tierra común es opcional, pero debe utilizarse en conexiones donde puedan existir interferencias.

2.2.4.2 Comparación entre normas de comunicación serial

Para cumplir con los reglamentos que rigen a las subestaciones eléctricas, el subsistema de registro y consulta de eventos debe ubicarse en una central a 400 metros de distancia de la subestación. Como el puerto serial de la PC se usa para la recepción de la señal de aviso, es necesario realizar una comparación entre los estándares de comunicación serial antes vistos y elegir el que cumpla con los requerimientos del sistema.

En la tabla 2.2 se muestra una comparación entre los estándares más usuales de comunicación serial [URL 15]. No se incluye el estándar RS-485 debido a que sus características sobrepasan las requeridas en este sistema de comunicación.

Con base en sus características y en la tabla 2.2, la norma RS-422 resulta ser la más eficiente para la transmisión serial entre el subsistema de control y la central, ya que si el microcontrolador se configura para transmitir a una velocidad de 9600 baudios, es posible establecer una transmisión hasta una distancia de 12 mil metros, lo cual incrementa considerablemente la posibilidad de ampliar las aplicaciones del sistema.

PARÁMETROS	RS232C	RS422A	RS423A
Longitud máxima de la línea	15 metros	1220 metros	1220 metros
Velocidad de transmisión	9600 bauds a 15 metros	10 Mbauds/12metros 1 Mbauds/122 metros 100 Kbauds/1220metros	100 Kbauds/10 metros 10 Kbauds/90 metros 1 Kbauds/1220 metros
Modo de transmisión	Simple	Diferencial	Diferencial
Nivel lógico "0"	+3 Volts ≤ "0" ≤ +25 Volts	A<B	+4 Volts ≤ "0" ≤ +6 Volts
Nivel lógico "1"	-3 Volts ≤ "1" ≤ -25 Volts	A>B	-4 Volts ≤ "1" ≤ -6 Volts
Número de receptores permitidos en línea	1	10	10
Impedancia de entrada	De 3 a 7 KΩ en 2500 pF	> 4 K Ω	>4 KΩ
Impedancia de salida		<100 Ω	<50 Ω

Tabla 2.2 Comparación entre los estándares RS-232C, RS-422A y RS-423A.

2.2.4.3 Implementación de la transmisión serial

Los dispositivos RS-422 comercializados eliminan las señales de acoplamiento entre ellas, algunos sólo utilizan uno de los acoplamientos posibles: RTS/CTS o DTR/DSR, otros únicamente mantienen los pares de cables de transmisión y recepción, tal es el caso de los circuitos integrados MC3487 y MC3486 de *Texas Instrument Incorporated* que se utilizan en la implementación del circuito para la transmisión y recepción de la señal de aviso.

El MC3487 ofrece cuatro líneas transmisoras RS-422 diferenciales independientes [23]. Cada transmisor tiene una entrada compatible con niveles TTL para reducir la corriente y minimizar la carga. Las salidas transmisoras utilizan una circuitería de tres estados para proporcionar un estado de alta impedancia en cualquier par de salidas diferenciales, siempre y cuando la habilitación de salida Output Enable (OE) se encuentre en un nivel lógico bajo como lo muestra la tabla 2.3.

El transmisor MC3487 está diseñado para un funcionamiento óptimo cuando se complementa con el MC3486. El MC3486 es un receptor de línea balanceada cuádruple. Este dispositivo ofrece cuatro líneas receptoras independientes de entrada diferencial y tiene salidas compatibles con niveles TTL. La tabla 2.4 muestra como el receptor MC3486 es capaz de reconocer niveles de voltajes muy pequeños, por ello es recomendable que los voltajes de entrada en la línea diferencial se encuentren en un rango de ± 6 volts [24].

Las cuatro líneas transmisoras RS-422 del MC3487 tienen como entradas señales TTL, en una de ellas se conecta la señal enviada por el microcontrolador. La salida de esta línea se conecta a una de las cuatro líneas receptoras del MC3486.

ENTRADAS	OUTPUT ENABLE	SALIDAS	
		Y	Z
H	H	H	L
L	H	L	H
X	L	Z	Z

H = Nivel alto TTL, L = Nivel bajo TTL, X = No importa, Z = Alta impedancia

Tabla 2.3 Tabla de funcionamiento del transmisor MC3487.

ENTRADAS	HABILITACIÓN	OUTPUT Y
$V_{ID} \geq 0.2 \text{ V}$	H	H
$-0.2 \text{ V} < V_{ID} < 0.2 \text{ V}$	H	?
$V_{ID} < -0.2 \text{ V}$	H	L
X	L	Z

V_{ID} = Voltaje de entrada diferencial, H = Nivel alto, L = Nivel bajo, X = No importa, Z = Alta impedancia

Tabla 2.4 Tabla de funcionamiento del receptor MC3486.

La línea receptora tiene como salida nuevamente una señal TTL, por lo que resulta necesario el uso del dispositivo MAX232 para llevarlo a un nivel RS-232 y hacerlo compatible con el puerto serie de la PC.

La figura 2.12 muestra el circuito de transmisión/recepción RS-422, de acuerdo a la configuración interna de los dispositivos MC3487, MC3486 y MAX232.

El MAX232 es un circuito integrado que soluciona los problemas de niveles de voltaje cuando se requiere enviar señales digitales sobre una línea RS-232 [21] [25], ya que solamente necesita una fuente de +5 volts para su operación, después un elevador de voltaje interno convierte el voltaje de +5 volts al de doble polaridad de ± 12 volts. Como la mayoría de las aplicaciones de RS-232 necesitan de un receptor y un emisor, este dispositivo incluye en un solo empaque 2 parejas completas de transmisor y receptor, además requiere de capacitores electrolíticos de 22 μ Faradios que son utilizados por el elevador de voltaje y el inversor de voltaje internos para obtener los voltajes con niveles RS-232.

Para que un sistema de comunicación funcione correctamente, tanto el transmisor como el receptor deben tener los mismos parámetros de velocidad, paridad, número de bits del dato transmitido y número de bits de paro. El microcontrolador envía los datos serialmente con una velocidad de 9600 Baudios, 8 bits de datos, sin paridad y con un bit de paro. Utilizando la norma RS-422 diferencial y ésta velocidad de transmisión, es posible transmitir la señal de aviso a una distancia mayor a los 400 metros, lo cual beneficia al sistema, ya que la central puede ubicarse no precisamente a 400 metros de distancia, puede estar más alejada.

En el microcontrolador PIC16F876 el valor de la velocidad de transferencia (*Baud Rate*) en modo asíncrono, se obtiene a través de la ecuación 2.1 [11]:

$$\text{Baud Rate} = \text{Frecuencia del oscilador} / (16 * (\text{Valor de SPBRG} + 1)) \quad (2.1)$$

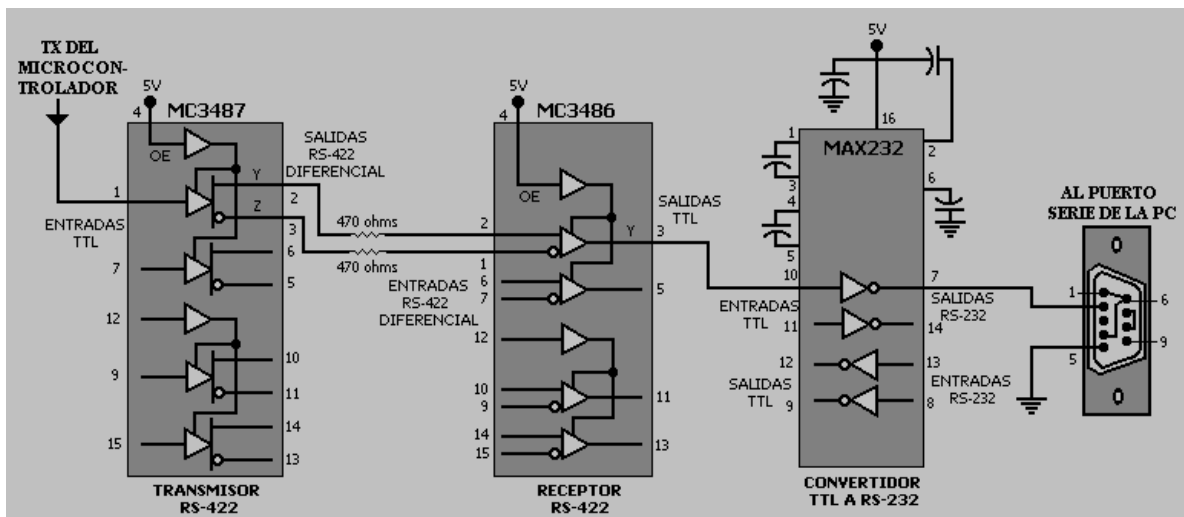


Figura 2.12 Circuito Transmisor-Receptor RS-422 diferencial.

2.3 Subsistema de detección

El subsistema de detección se compone de una red de 8 sensores de movimiento que brindan una cobertura completa a una subestación eléctrica con un volumen de 1000 m³. Sensan continuamente el área protegida y cuando detectan la presencia de un intruso envían una señal de alarma al subsistema de control.

La elección del sensor más adecuado para esta aplicación requiere de un estudio de las distintas tecnologías de detección que actualmente existen, además de una comparación entre las características que ofrecen los modelos más comunes en el mercado.

A continuación se mencionan las tecnologías más comunes en sensores de presencia, posteriormente se describe el funcionamiento de las tecnologías más utilizadas.:

- Tecnología de Rayos Infrarrojos Pasivos (PIR)
- Tecnología de Microondas
- Tecnología de Ultrasonido
- Tecnología Dual

2.3.1 Tecnología de Rayos Infrarrojos Pasivos (PIR)

Los detectores con Tecnología de Rayos Infrarrojos Pasivos (PIR) reaccionan ante determinadas fuentes de energía de cuerpos en movimiento. Son capaces de detectar cuerpos tan pequeños como el de un ratón ó animales de tamaño similar [15] [26]. Estos captan la presencia detectando la diferencia entre el calor emitido por el cuerpo y el espacio alrededor. Los sensores PIR utilizan un lente de Fresnel que divide el área de cobertura en zonas, los cuales tienen diferentes longitudes e inclinaciones, obteniendo así una mejor cobertura del área protegida. Cuando se da un cambio de temperatura en alguna de estas zonas, se detecta la presencia y se acciona una alarma. Para lograr una alta confiabilidad, esta tecnología integra un filtro especial de luz que elimina toda posibilidad de falsas detecciones causadas por la luz visible de los rayos solares, así como dispositivos electrónicos que otorgan mayor inmunidad a las ondas de radiofrecuencia.

2.3.2 Tecnología de Microondas

Los detectores diseñados con tecnología de microondas utilizan el principio Doppler, empleando frecuencias portadoras de radio frecuencia en la banda de UHF (*Ultra High Frequency*) o microondas. La frecuencia utilizada está situada usualmente entre 800 MHz y 15 GHz [15]. Estos sensores se usan para proteger áreas en el exterior emitiendo microondas hacia el área a proteger, éstas rebotan en los objetos presentes y regresan al receptor del detector. Los sensores de microondas contienen un transmisor y uno o varios receptores. El movimiento de un cuerpo en el área provoca que las microondas regresen con una frecuencia diferente a la que fue emitida, lo cual es interpretado como un cambio Doppler.

2.3.3 Tecnología Dual

Los sensores diseñados con tecnología Dual combinan las tecnologías PIR y Microondas, proporcionando cobertura en áreas donde sensores de una sola tecnología presentan deficiencias en la detección. La combinación PIR/Microondas permite que el sensor aproveche las mejores características de ambas tecnologías, ofreciendo así mayor exactitud

de operación y mayor sensibilidad [15] [26]. Para que una señal de alarma se considere válida es necesaria la detección de ambas tecnologías.

2.3.4 Elección del sensor

La tabla 2.5 muestra una comparación entre varios modelos de sensores de presencia. Con base en las características que éstos presentan se eligió el tipo de sensor que integra la red de sensores del subsistema de detección.

MODELO	ÁREA DE COBERTURA	TECNOLOGÍA DE DETECCIÓN	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
Senstar Stellar 14101	457 m. de largo.	Señales de microondas	Inmune a fenómenos ambientales, ideal para aplicaciones en áreas donde existen radiofrecuencias.
DT-706	2.3 m. de largo por 15 m. de ancho.	Dual PIR/Microondas	Tecnología de microondas, ignora los cambios de temperatura ambiental, ajuste del patrón de cobertura infrarrojo y microondas, inmune a radiofrecuencias y a la luz blanca.
DT-7235EU	11 m. de largo por 11 m. de ancho.	Dual PIR/Microondas	Tecnología de microondas en banda K, inmunidad a la luz blanca, inmune a radiofrecuencias, ópticas de sensibilidad uniforme.
DT-400EU	44 m. de largo.	Dual PIR/Microondas	Tecnología de microondas, inmune a falsas alarmas y no pierde sensibilidad cuando la temperatura del recinto se acerca a la temperatura corporal.
DT-600STC	2.3 m. de largo por 12 m. de ancho.	Dual PIR/Microondas	Avanzado procesamiento microcontrolado (MAP), diagnóstico y supervisión de fallas, óptica de espejos para sensar la zona baja del sensor.
DT-7450EU	15 m. de largo por 18 m. de ancho.	Dual PIR/Microondas	Procesamiento de señal avanzado con funciones de diagnóstico simultáneo, alta inmunidad a las falsas alarmas, tecnología de microondas en banda K, procesamiento por umbral adaptable que ignora los cambios de temperatura ambiental, óptica de espejos para sensar la zona baja del sensor, compensación electrónica de temperatura, ajuste del patrón de cobertura infrarrojo y microondas, filtro digital de interferencias de luz fluorescente, inmunidad a la luz blanca e inmunidad a radiofrecuencias.
QUEST 2000	12 m. de largo por 15 m. de ancho.	Dual PIR/Microondas con 22 zonas de cobertura.	Tecnología de microondas, basado en microprocesador, ajuste del patrón de cobertura infrarrojo y microondas, procesamiento de imágenes ADEMCO de 256 niveles diferentes de condiciones ambientales, óptica de espejos para sensar la zona baja del sensor.

Tabla 2.5 Modelos de sensores y sus características.

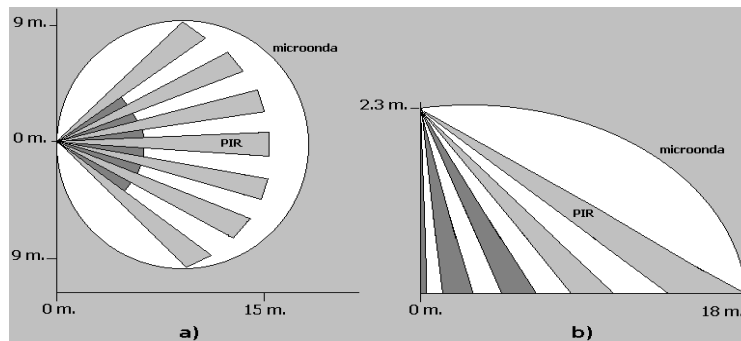


Figura 2.13 Área de cobertura: a) Vista plana; b) Vista de perfil.

De acuerdo a la tabla 2.5 cualquiera de estos sensores podría utilizarse, pero en esta aplicación es más conveniente elegir el modelo que ofrezca mayores características de inmunidad. Por esta razón, se elige el modelo DT-7450EU de la firma *ADEMCO* para integrar el subsistema de detección. A continuación se mencionan sus principales características [27]:

- Realiza un procesamiento de señales denominado Dual-Core, el cual analiza las señales infrarrojas y microondas por medio de un microcontrolador, proporcionando así una excelente inmunidad a falsas alarmas.
- La tecnología de microondas en banda-K con frecuencia de 24.125 GHz forma un patrón de cobertura volumétrico que se superpone al patrón de cobertura PIR para brindar una mayor protección, pudiendo atravesar la madera, el cristal y otros materiales, detectando así intrusos escondidos detrás de algún objeto.
- La lente de Fresnel está diseñada para proporcionar la misma sensibilidad en toda el área de cobertura.
- Ofrece una excelente inmunidad a falsas alarmas adaptándose a perturbaciones producidas por ventiladores y otros objetos con movimientos repetitivos.
- Es inmune a falsas alarmas producidas por luces fluorescentes, esto se logra ajustando un filtro digital interno a una frecuencia entre 50 Hz y 60 Hz.
- Evita falsas alarmas causadas por la luz solar, linternas u objetos reflejantes gracias a un sistema de protección contra luz blanca.
- Proporciona un área de cobertura de 15 metros de largo por 18 metros de ancho. La figura 2.13 muestra los patrones de detección PIR/Microondas para una altura nominal de 2.3 metros. En la tabla 2.6 se muestran las 6 terminales que contiene internamente el sensor DT-7450EU y sus respectivas funciones.

TERMINAL	FUNCIÓN
1	FUENTE DE +12 VDC: La energía deberá ser suministrada por una fuente de 12VDC con una capacidad de 25 mA.
2	GND: Tierra de la fuente.
3 y 4	Son las terminales del RELAY interno, el cual es Normalmente Cerrado. Se abre cuando se detecta un intruso dentro del área protegida.
5	DESHABILITACIÓN DEL LED DE ALARMA: Desactiva el led de alarma aplicando +12V o activando el número 3 del DIP swicht interno.
6	SALIDA DE RENDIMIENTO: Supervisa la ocurrencia de fallas en el sensor

Tabla 2.6 Terminales del sensor DT-7450EU.

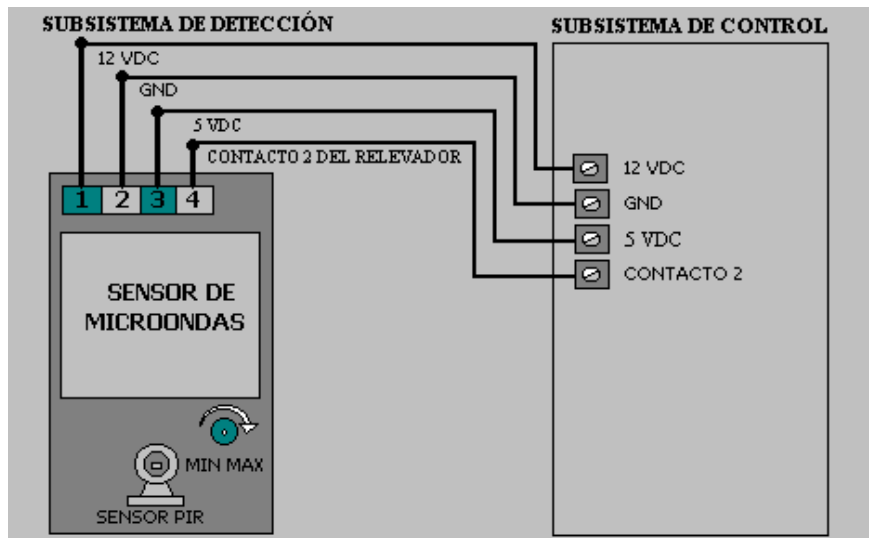


Figura 2.14 Diagrama de conexiones del sensor DT-7450EU.

Para eliminar las interferencias por ruido eléctrico y campos magnéticos propios de una subestación eléctrica, la conexión de cada sensor se realiza con cable blindado de 4 hilos trenzados. En la figura 2.14 se ilustra la conexión de un sensor (se utiliza la misma forma de conexión para los demás sensores). Una vez que la unidad es colocada apropiadamente, se debe ajustar la sensibilidad del detector por microondas a través del control giratorio que contiene internamente el sensor, figura 2.14.

La fuente de alimentación para la red de sensores debe entregar 12 volts con una capacidad de corriente suficiente para alimentar a los ocho sensores, quienes en total consumen 200 mA. En la sección 2.6. se muestra el diseño y la explicación del circuito correspondiente a la alimentación de este subsistema.

2.4 Subsistema de alarma

El subsistema de alarma está integrado por altavoces ultrasónicos y amplificadores de potencia con su respectivo ventilador; conjuntamente los amplificadores y los altavoces emiten las señales ultrasónicas proporcionadas por el subsistema de control, otorgándoles la potencia adecuada.

En el desarrollo de este subsistema, la correcta elección de las bocinas y los amplificadores es esencial para un buen funcionamiento del sistema de protección ultrasónico de potencia.

2.4.1 Elección de los altavoces ultrasónicos

Los altavoces o bocinas se encargan de transformar la energía eléctrica proveniente del amplificador en energía acústica radiada al aire en forma de variaciones de presión atmosférica [28] [29]. En cualquier sistema de audio éstos son los componentes que requieren de atención especial en su elección, porque aunque parezcan iguales por fuera, cada uno suena de manera distinta, por lo tanto, son los primeros componentes que se deben elegir en el desarrollo del subsistema de alarma. Las características más importantes en cualquier bocina son las siguientes:

- **Potencia admisible.** Es la potencia máxima que puede manejar sin sufrir daños. Es recomendable que sea al menos un 50% mayor que la potencia del amplificador para evitar distorsiones al llevarlas al límite e incluso dañarlas. Debe tomarse en cuenta

que un amplificador ofrece mayor potencia RMS sobre una carga igual a la impedancia a la que fue diseñado. Si un amplificador entrega 100 Watts sobre una carga de 8Ω , entregará aproximadamente la mitad sobre una de 4Ω ó sobre una carga de 16Ω . Por otra parte, la impedancia de un altavoz varía con la frecuencia [28] [29] [16], es decir, en un altavoz de 8Ω que llegue a bajar su impedancia a 2Ω en ciertas frecuencias, disminuirá considerablemente la potencia en Watts continuos que ofrece el amplificador.

- **Impedancia nominal.** Es un valor de resistencia pura, útil sólo para medidas de potencia. Los valores típicos son 2, 4, 8 y 16Ω .
- **Ancho de Banda.** Es el margen de frecuencias que puede reproducir con buena fidelidad y se clasifican de acuerdo al margen de frecuencias que cubren [28] [29]: *woofers* y *sub-woofers* (bajas frecuencias), *mid-range* (frecuencias medias) y *tweeters* (altas frecuencias). Los *tweeters* a emplear deben tener una respuesta en frecuencia con un rango entre 20 kHz y 70 kHz para emitir las señales ultrasónicas adecuadamente.
- **Sensibilidad o eficiencia.** Es la relación entre la potencia acústica que radía el altavoz y la potencia eléctrica necesaria para ello (Pot. acústica / Pot. eléctrica), es decir, representa el nivel de presión sonora que es capaz de suministrar a cierta distancia [28] [URL 10]. Una forma bastante común de encontrar especificada la eficiencia de una bocina es: "Sensibilidad = 88 dB/w a 1 m.". Esto significa que si suministramos 1 watt de potencia eléctrica y medimos el NPS que hay a 1 metro de distancia, el resultado es de 88 decibeles. Por lo tanto, deben seleccionarse las bocinas que tengan la mayor sensibilidad posible para no exigir una gran potencia a los amplificadores, reduciendo el costo de su desarrollo.

Comercialmente existen una gran cantidad de modelos de *tweeters* con excelentes características con respecto a su sensibilidad, potencia e impedancia, desafortunadamente éstos sólo cubren el rango de frecuencias audibles, son escasos los modelos que cubren el rango ultrasónico. En la tabla 2.9 se muestra la comparación realizada entre modelos comercializados por algunas marcas como *B-52 Ultra-Compact Systems*, *STEREN*, *Xtasis*, *JBL*, *Pioneer* y *Kenwood*.

Con base en la tabla 2.9 el modelo 80-1016 de *STEREN* es el *tweeter* que se elige como emisor para el subsistema de alarma, a continuación se describen más ampliamente sus características [URL 16]:

- Su funcionamiento se basa en la propiedad de los materiales piezo-cerámicos de contraerse ante impulsos eléctricos.
- Su impedancia nominal es de 8Ω .
- Tiene una sensibilidad de 120 dB/w a 1 metro.
- La superficie de radiación es muy pequeña, lo que facilita la emisión de frecuencias ultrasónicas.
- Su respuesta en frecuencia se encuentra entre 3 kHz y 40 kHz.
- La potencia máxima que puede soportar es de 75 watts.
- Posee un difusor pequeño tipo trompeta rectangular.
- Su dimensión es de 14.6 cm. de largo por 5.5 cm. de ancho.

MODELO	MARCA	IMPEDANCIA NOMINAL (Ω)	RANGO DE FRECUENCIAS (Hz)	POTENCIA (Watts)	SENSIBILIDAD (NPS a 1w, 1m)
TW-2000	Xtasis	8	2 000 a 30 000	500	98
TW-25R	Xtasis	4	3 000 a 19 000	80	No disponible
TW-1000GR	Xtasis	8	1 500 a 20 000	250	110
80-1000	STEREN	8	4 000 a 27 000	70	No disponible
80-1005N	STEREN	8	4 000 a 27 000	75	98
80-1016	STEREN	8	3 000 a 40 000	75	120
80-1033	STEREN	8	4 000 a 25 000	75	No disponible
PA-310	Pioneer	8	35 a 18 000	300	95
PA-15X	Pioneer	8	40 a 19 000	650	98
PA-1515X	Pioneer	4	35 a 19 000	1300	101
TST15	Pioneer	4	2 500 a 30 000	40	90
PA-1212X	B-52 Ultra-Compact	6	2 500 a 25 000	15	105
T8NEO	MXT Audio	4	4 000 a 20 000	60	85.5
GTO15t	JBL	4	2 500 a 21 000	50	91
Power P 23t	JBL	4	5 000 a 22 000	45	91
KFC_T204	Kenwood	4	4 000 a 30 000	50	90

Tabla 2.7 Tabla comparativa entre modelos de tweeters.

Las características de este *tweeter* son las más adecuadas para el subsistema de alarma y aunque su ancho de banda no cubre todo el rango de frecuencias que generan los barridos, éste es suficiente. A pesar de que introduce una pequeña distorsión en las frecuencias superiores a 40 kHz no repercute en la eficiencia del sistema, ya que las frecuencias superiores a ésta, sólo cubren el rango de holgura del sistema de protección.

2.4.2 Elección del amplificador

El amplificador es el equipo al que se conecta la fuente de sonido y a su salida se conectan los altavoces. Por lo general los amplificadores poseen un preamplificador, éste es el encargado de proporcionar al amplificador la señal en óptimas condiciones con respecto a su nivel, impedancia, dinámica y equalización.

La función del amplificador es suministrar potencia eléctrica a los altavoces. La señal eléctrica a la salida tiene igual forma de onda que a la entrada, pero una mayor amplitud. Un amplificador alimenta a los altavoces con tensiones en decenas de volts (V) y corrientes que pueden llegar al orden de los amperes (A), esta tensión y corriente que se emplea para mover mecánicamente a los altavoces se obtienen de la fuente de alimentación interna del amplificador, éste a su vez la toma de la red eléctrica general, siendo su potencia RMS (P) en Watts, el producto del voltaje por la corriente [16] [17].

$$P = I \cdot V \quad (2.2)$$

La potencia de los amplificadores se determina con base en los datos siguientes:

- **Distancia máxima que se desea proteger.** Las subestaciones eléctricas más comunes tienen un volumen de 1000 m^3 ($20 \times 10 \times 5$), donde los equipos más delicados regularmente se encuentran ubicados en medio de la subestación, por lo tanto el subsistema de alarma debe colocarse cerca de estos equipos. Con el teorema de Pitágoras se calcula que el punto más lejano a cubrir se encuentra a una distancia de 11.45 metros, como puede verse en la figura 2.15.

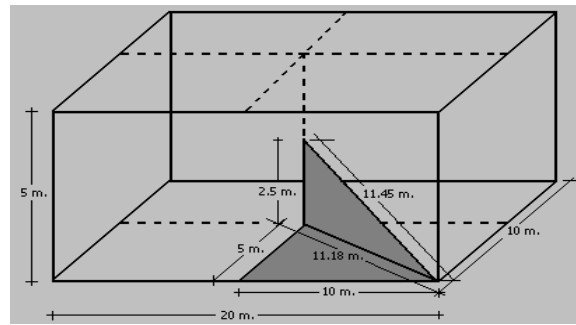


Figura 2.15 Dimensión de una subestación eléctrica.

- **NPS que se desea a esta distancia.** El sonido que perciban los animales que deseen entrar a la subestación debe ser muy fuerte, por lo que es necesario cubrir el punto más lejano por lo menos con un NPS de 110 dB(A), así, cuando los animales se introduzcan cada vez más a la subestación, el NPS se incrementará causándoles un dolor auditivo más intenso obligándolos a retroceder.
- **Distorsión Total Armónica (THD).** Esta distorsión se produce por la aparición de armónicos de la señal original. Un armónico es una señal de frecuencia múltiplo de otra original [5] [7]. Por ejemplo, si se tiene a la entrada un tono puro de frecuencia 1 kHz sus armónicos aparecerán como tonos puros de frecuencia en 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz y así sucesivamente. La distorsión armónica o THD se mide en porcentaje (%) y los valores suelen ser inferiores al 1%. El porcentaje representa la energía que pertenece a los armónicos en la señal de salida, es decir, qué porcentaje es distorsión. Los fabricantes de dispositivos amplificadores suelen facilitar este dato ya que es de los más relevantes.

Aparentemente cualquier amplificador podría usarse en este subsistema, pero no es así, ya que al igual que en las bocinas, una de las características más importantes es su respuesta en frecuencia o ancho de banda. Este dato en un amplificador indica el rango de frecuencias que puede amplificar con una mínima distorsión de la señal de entrada.

Los amplificadores con alta potencia de salida, distorsionan considerablemente las señales con frecuencias superiores a los 20 kHz. Por esta razón, es conveniente utilizar amplificadores de menor potencia y realizar los cálculos adecuados para generar el mismo NPS que pudiera generar uno de mayor potencia, considerando otros datos como la distancia a cubrir, el NPS a generar a esa distancia y los factores físicos que influyen en la emisión de las ondas sonoras.

Actualmente en el mercado existen amplificadores integrados¹⁰ de diferentes potencias y ancho de banda configurable, algunos modelos se muestran en la tabla comparativa 2.8.

De acuerdo a la tabla 2.8 se elige el amplificador integrado TDA2006 de la firma *SGS-THOMSON Microelectronics* para integrar el subsistema de alarma, ya que ofrece las mejores características para esta aplicación [30], tales como:

- **Potencia de salida.** Proporciona 12 watts sobre una carga de 4Ω y 8 watts sobre una carga de 8Ω.
- **Ancho de banda.** Ofrece un amplio ancho de banda que comprende frecuencias entre 20 Hz y 100 kHz, permitiendo la amplificación de señales ultrasónicas.
- **Fuente de alimentación.** Se puede alimentar con voltajes entre ±6 volts a ±15 volts.

¹⁰ Contienen el preamplificador integrado, comúnmente se conocen sólo como amplificadores.

MODELO	FABRICANTE	POTENCIA	ALIMENTACIÓN (Volts)	ANCHO DE BANDA (Hz.)
TDA2030	SGS-Thomson	14 watts sobre 4Ω 12 watts sobre 8Ω	14 ±14	10 a 140 000
TA2024	SGS-Thomson	15 watts sobre 4Ω 10 watts sobre 8Ω	16 16	22 a 22 000
TDA2004	SGS-Thomson	2.5 watts sobre 2Ω 2.5 watts sobre 4Ω	14.4 14.4	Configurable Fci=35, Fcs>15 000
TDA2005	SGS-Thomson	20 watts sobre 2Ω 20 watts sobre 4Ω	14.4 14.4	Configurable fci=35, fcs>15 000
TDA2006	SGS-Thomson	12 watts sobre 4Ω 8 watts sobre 8Ω	±12 ±12	20 a 100 000
TDA8510J	SGS-Thomson	7 watts sobre 4Ω 13 watts sobre 2Ω	15 15	25 a 20 000
TDA1562Q	SGS-Thomson	70 watts sobre 4Ω	14.4	20 a 20 000
LM386N-3	Fairchild Semiconductor	700 miliwatts	9	300 000

Fci = Frecuencia de corte inferior, Fcs = Frecuencia de corte superior.

Tabla 2.8 Tabla comparativa de amplificadores integrados.

- **Distorsión Total Armónica (THD).** Su distorsión total armónica THD es muy baja, introduce una distorsión de 0.2% cuando proporciona una potencia de 8 watts sobre una carga de 4Ω y una distorsión de 0.1% cuando proporciona 4 watts sobre una carga de 8Ω.
- **Configuraciones.** El TDA2006 puede configurarse en modo puente¹¹. La configuración que se emplea en este subsistema se ilustra en la figura 2.16 [30]. Este circuito proporciona una potencia de salida de 24 Watts sobre una carga de 8Ω cuando se alimenta con una fuente bipolar de ±12 volts y 1.5 amperes. Su funcionamiento se resume en la tabla 2.9, en ella se analiza sólo una configuración, considerando que el circuito completo se compone de dos configuraciones iguales.

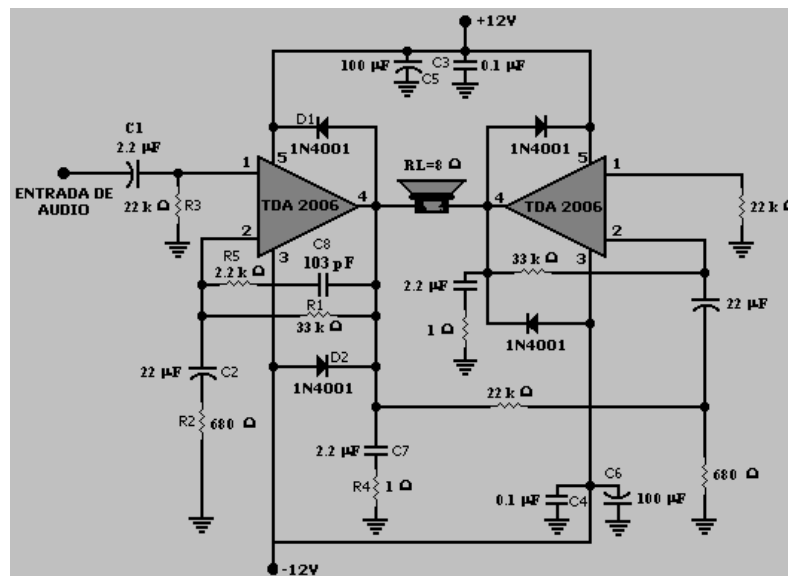


Figura 2.16 Circuito amplificador en configuración puente de 24 watts.

¹¹ Se diseña con dos configuraciones iguales de 12 watts.

COMPONENTE	VALOR	PROPÓSITO	MAYOR QUE EL VALOR CALCULADO	MENOR QUE EL VALOR CALCULADO
R1	22 K Ω	Retroalimenta y determina la ganancia	Incrementa la ganancia	Decrementa la ganancia
R2	680 Ω	Determina la ganancia	Decrementa la ganancia	Incrementa la ganancia
R3	22 K Ω	Acopla la impedancia de entrada	Incrementa la impedancia de entrada	Decrementa la impedancia de entrada
R4	1 Ω	Estabiliza la frecuencia	Peligro de oscilación a altas frecuencias	
R5	3 R2	Frecuencia de corte superior	Atenúa las frecuencias altas	Peligro de oscilación
C1	1 μ F	Desacopla la entrada DC	No afecta	Incrementa la frecuencia de corte inferior
C2	22 μ F	Desacopla la entrada inversora DC	No afecta	Incrementa la frecuencia de corte inferior
C3,C4	0.1 μ F	Estabilizan la fuente de voltaje	No afecta	Peligro de oscilación
C5,C6	100 μ F	Estabilizan la fuente de voltaje	No afecta	Peligro de oscilación
C7	0.22 μ F	Estabiliza la frecuencia	No afecta	Peligro de oscilación
C8	1 / 2 π BR1	Frecuencia de corte superior	Menor ancho de banda	Mayor ancho de banda
D1,D2	1N4001	Protege al dispositivo contra picos del voltaje de salida.		

Tabla 2.9 Funcionamiento del circuito amplificador.

- **Potencia de disipación.** Conjuntamente los dispositivos electrónicos que componen el circuito amplificador de la figura 2.16 disipan 4.2 watts en forma de calor durante su operación, lo que hace indispensable la adición de un ventilador por cada amplificador. El circuito amplificador incluye un ventilador modelo VN4-012P de *STEREN* de 3000 revoluciones por minuto (RPM) y 230 miliamperes de consumo cuando se alimenta con una fuente de 12 VDC [URL 16].

El valor del capacitor C8 y la resistencia R5 del circuito amplificador se determina en función del ancho de banda (B) que se desea. En esta aplicación se requiere una frecuencia de corte superior en 70 kHz y una frecuencia de corte inferior en 20 kHz. De acuerdo a la tabla 2.9 el valor del capacitor C8 se obtiene aplicando la ecuación 2.3 [30].

$$C8 = 1 / 2\pi BR1 \quad (2.3)$$

Donde R1=22 k Ω y B=(70 kHz – 20 kHz)

C8 = 144 pF

La resistencia R5 es igual a 3(R2) y R2 es igual a 680 Ω (indicado en la tabla 2.11), por lo tanto R5 debe ser de 2.2 k Ω para que la frecuencia de corte superior se encuentre en 70 kHz.

2.4.3 Diseño del subsistema de alarma

El diseño del subsistema de alarma consiste en calcular el valor del NPS que se desea generar a determinada distancia. El NPS generado debe ser lo suficientemente alto para causarles dolor auditivo a los animales y obtener con esto una buena eficiencia del sistema.

El NPS se calcula con base en los siguientes datos:

- Potencia eléctrica del amplificador = 24 Watts
- Sensibilidad del tweeter = 120 dB/w a 1 metro
- Distancia = 11.45 metros
- NPS deseado a 11.45 metros = 110 dB

Partiendo del hecho de que el *tweeter* proporciona un NPS de 120 dB a 1 metro cuando se le aplica 1 watt de potencia, surge la pregunta ¿Qué NPS generará a 1 metro cuando se le apliquen 24 watts de potencia?. Considerando que el amplificador y el *tweeter* conforman un sistema de audio, se puede calcular el NPS que éste genera tomando en cuenta que el dB es una medida relativa; en audio una referencia válida es 1 watt de potencia, del cual se obtiene el decibel watt (dB/w)¹², 1 watt equivale a 0 dB/w. Realizando las conversiones de unidades adecuadas es posible conocer el valor del NPS generado.

Si se cuenta con un amplificador de 24 watts de potencia y un *tweeter* con una sensibilidad de 120 dB/w a 1 metro, el cálculo del NPS que se genera a 1 metro se realiza de la siguiente forma:

1. Se convierte la potencia eléctrica a dB/w.
 $10 \log (24) = 13.8 \text{ dB/w} \approx 14 \text{ dB/w}$
2. Se suman los valores en dB de la potencia y la sensibilidad del tweeter.
 $\text{NPS} = 120 \text{ dB} + 14 \text{ dB} = \mathbf{134 \text{ dB}}$

De esta manera se determina que cuando se le aplican los 24 watts de potencia al tweeter, su NPS a 1 metro de distancia aumenta a 134 dB, pero a 11.45 metros de distancia éste valor es mucho menor, la razón es que el oído y la mente tanto en humanos como en animales perciben el sonido en términos del logaritmo de la presión sonora, es decir, la recepción del sonido se realiza como una escala logarítmica o escala relativa y no de manera lineal [5] [7].

La energía de las ondas sonoras o intensidad del sonido, cae 6 dB debajo de su valor inicial conforme la distancia se incrementa al doble con respecto a la fuente sonora [7]. Para comprobar este fenómeno físico se asume que la velocidad del sonido (C) es igual a 340 m/s a una temperatura de 22°C con una densidad del aire $\rho=1.18 \text{ Kg/m}^3$ y considerando los siguientes conceptos [URL 17]:

1. **NIVEL DE PRESIÓN SONORA (NPS):** Es una medida que relaciona el valor RMS de la presión sonora con el mínimo audible promedio.

$$\text{NPS} = 20 \log (\text{Presión sonora} / P_0) \quad (2.4)$$

$$\text{NPS} = 10 \log (\text{Presión sonora}^2 / P_0^2) \quad (2.5)$$

Donde $P_0 = 20 \mu\text{Pascales}$

¹² Es la cantidad de dB referida a 1 watt.

- 2. INTENSIDAD SONORA (I):** Es el valor medio de la energía que cruza una unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. Este valor depende del campo acústico donde se encuentre el sonido.

En campo abierto para una onda acústica plana o esférica progresiva:

$$I = \text{Presión sonora}^2 / \rho C \quad (2.6)$$

En campo difuso cerca de paredes:

$$I = \text{Presión sonora}^2 / 4 \rho C \quad (2.7)$$

- 3. NIVEL DE INTENSIDAD SONORA (IL):** Es una medida que relaciona la intensidad sonora respecto a una referencia.

$$IL = 10 \log (I / I_o) \quad (2.8)$$

Donde $I_o = 10^{-12}$ [w/m²]

- 4. POTENCIA ACÚSTICA (Pa):** Es la cantidad de energía radiada por una fuente determinada. Esta potencia es un valor intrínseco de la fuente y no depende del campo acústico.

- 5. NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA (PWL):** Consiste en una medida relativa a un valor de referencia de potencia y se define como:

$$PWL = 10 \log (W / W_o) \quad (2.9)$$

Donde $W_o = 10^{-12}$ [w] y W = Potencia irradiada por la fuente.

Para una fuente puntual que irradia ondas esféricas, I es la porción que fluye por unidad de área y W es la potencia total generada:

$$I = W / 4\pi d^2 \quad (2.10)$$

Donde d = distancia de medición.

Se despeja W de la ecuación 2.10 y se sustituye en la ecuación 2.6, la cual corresponde a un campo acústico libre de paredes:

$$W = 4\pi d^2 I$$

$$W = (4\pi d^2 \text{Presión sonora}^2) / \rho C \quad (2.11)$$

Se sustituye la ecuación 2.11 en la ecuación 2.9:

$$PWL = 10 \log [(4\pi d^2 \text{Presión sonora}^2 / \rho C) / W_o]$$

$$PWL = 10 \log (4\pi d^2 \text{Presión sonora}^2 / \rho C W_o) \quad (2.12)$$

Se multiplica la ecuación 2.12 por (Po^2 / Po^2) :

$$PWL = 10 \log (4\pi d^2 \text{Presión sonora}^2 Po^2 / \rho C W_o Po^2) \quad (2.13)$$

Aplicando propiedades de logaritmos a la ecuación 2.13 se obtiene:

$$PWL = 10 \log (4\pi d^2 \text{Presión sonora}^2 Po^2) - 10 \log (\rho C W_o Po^2)$$

$$PWL = 10 \log (4\pi d^2 Po^2) + 10 \log (\text{Presión sonora}^2) - [10 \log (\rho C W_o) + 10 \log (Po^2)]$$

$$PWL = 10 \log (4\pi Po^2) + 10 \log (d^2) + 10 \log (\text{Presión sonora}^2) - 10 \log (\rho C W_o) - 10 \log (Po^2)$$

$$PWL = 10 \log (\text{Presión sonora}^2 / P_o^2) + 10 \log (d^2) + 10 \log (4\pi P_o^2 / \rho C W_o)$$

$$PWL = 20 \log (\text{Presión sonora} / P_o) + 20 \log (d) + 10 \log (4\pi P_o^2 / \rho C W_o)$$

$$PWL = NPS + 20 \log (d) + 11 \text{ dB} \quad (2.14)$$

$$NPS = PWL - 20 \log (d) - 11 \text{ dB} \quad (2.15)$$

Con este desarrollo matemático se obtienen las ecuaciones 2.14 y 2.15, con las que es posible demostrar que al aire libre cada vez que se dobla la distancia el NPS disminuye 6 dB. Para comprobarlo se retoma el NPS=134 dB calculado a 1 metro de distancia y se sustituye en la ecuación 2.14.

$$PWL = 134 + 20 \log (1) + 11 \text{ dB} = 145 \text{ dB}$$

Sustituyendo PWL=145 dB en la ecuación 2.15 e incrementando la distancia al cuadrado, se obtienen los siguientes resultados:

$$NPS = 145 - 20 \log (1) - 11 \text{ dB} = 134 \text{ dB}$$

$$NPS = 145 - 20 \log (2) - 11 \text{ dB} = 128 \text{ dB}$$

$$NPS = 145 - 20 \log (4) - 11 \text{ dB} = 122 \text{ dB}$$

$$NPS = 145 - 20 \log (8) - 11 \text{ dB} = 116 \text{ dB}$$

$$NPS = 145 - 20 \log (16) - 11 \text{ dB} = 110 \text{ dB}$$

En d=11.45 metros se tiene:

$$NPS = 145 - 20 \log (11.45) - 11 \text{ dB} = \mathbf{113 \text{ dB}}$$

Con esta comprobación se observa que efectivamente el valor del NPS se decrementa 6 dB al doblar la distancia que existe entre el oyente y la fuente sonora. A una distancia de 11.45 metros se generan 113 dB de NPS, este valor en ausencia de ruido ambiental es suficiente para ahuyentar a los animales, pero el nivel de ruido ambiental debe ser superado al menos con 10 decibeles para que el sonido emitido no pierda intensidad.

Inicialmente se pretendía generar un NPS de 110 dB a una distancia de 11.45 metros, ahora es necesario incrementar el NPS a 120 dB para superar el nivel de ruido ambiental. Una solución es aumentar la potencia hasta alcanzar éste NPS, pero sólo se cuenta con un amplificador de 24 Watts con el que se obtienen 113 dB a dicha distancia. Para adicionarle los 7 dB restantes deben analizarse las siguientes consideraciones.

- Si un *tweeter* y un amplificador conforman un sistema de audio ultrasónico que genera un NPS de 113 dB a 11.45 metros, no porque se introduzca otro sistema de audio igual (otro amplificador y otro *tweeter*) se obtendrá el doble, es decir 226 dB [5] [7] [URL 13], esto también se debe al comportamiento logarítmico y no lineal de la recepción del sonido en el oído humano y animal.
- La suma de dos niveles de sonido idénticos proporcionan un nivel sonoro solamente de 3 dB mayor [5] [7] [32]. Esto significa que al aumentar al doble la presión sonora o energía del sonido, sólo aumentará el nivel en 3 dB y no al doble. Como el decibel es una función logarítmica, el cual se asemeja demasiado al comportamiento de la percepción del sonido, entonces al tratar con decibeles de presión sonora no es posible sumarlos de manera lineal, deben sumarse de acuerdo a la ecuación 2.16 [URL 13].

$$\text{Suma dB1} + \text{dB2} = 10 \log (\text{Antilog} (\text{dB1}/10) + \text{Antilog} (\text{dB2}/10)) \quad (2.16)$$

- La suma de dos niveles de presión sonora nunca puede ser más de 3 dB que el mayor de los dos [URL 13]. Si la diferencia que hay entre los dos valores a sumar es mayor de 10 dB, la suma no tiene valor práctico y se toma el valor del mayor de los dos. Solamente son significativos para la suma los valores que tienen una diferencia menor a 10 dB.

Si se emplean dos sistemas de audio ultrasónico que generan 113 dB cada uno y se aplica la ecuación 17 se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{NPS} &= 113 \text{ dB} + 113 \text{ dB} \\ &= 10 \log (\text{Antilog} (113 / 10) + \text{Antilog} (113 / 10)) \\ &= 10 \log (\text{Antilog} (11.3) + \text{Antilog} (11.3)) \\ &= \mathbf{116 \text{ dB}} \end{aligned}$$

La tabla 2.10 muestra los valores correspondientes de NPS para cada una de las combinaciones de sistemas de audio ultrasónico. De acuerdo a esta tabla se requieren 8 amplificadores de 24 Watts con su respectivo *tweeter* para generar un NPS de 122 dB a 11.45 metros de distancia, repercutiendo directamente en el incremento de circuitos y en el costo de desarrollo del sistema.

Una solución para aumentar el NPS a 120 dB con menos dispositivos, consiste en incrementar la potencia del amplificador usando un solo *tweeter*. Para el cálculo del NPS una fórmula también empleada es la ecuación 2.17 [URL 8].

$$\text{NPSd} - \text{NPSo} + 20 \log d = 10 \log (\text{Pot.}) \quad (2.17)$$

Donde:

NPSd = NPS que se desea a una distancia d, adicionando 10 dB para superar el nivel de ruido ambiental.

NPSo = Sensibilidad del altavoz [dB/w a 1 metro]

d = Distancia a considerar [metros]

Pot. = Potencia eléctrica [watts]

Así, el cálculo de la potencia eléctrica que se necesita para generar un NPS=120 dB a una distancia de 11.45 metros usando un *tweeter* con sensibilidad igual a 120 dB/w a 1 metro, se realiza de la siguiente forma:

Se sustituyen los datos en la ecuación 18 y se despeja Pot., obteniendo:

$$120 \text{ dB} - 120 \text{ dB} + 20 \log(11.45) = 10 \log(\text{Pot.})$$

$$10 \log(\text{Pot.}) = 120 \text{ dB} - 120 \text{ dB} + 21.176 \text{ dB}$$

$$\text{Pot.} = \text{Antilog} (21.176 / 10)$$

$$\mathbf{\text{Potencia eléctrica} = 131 \text{ Watts}}$$

NÚMERO DE SISTEMAS DE AUDIO	NPS (dB)
1	113
2	116
3	117
4	119
6	120
8	122
16	125
32	128

Tabla 2.10 Sistemas de audio y NPS generado.

POTENCIA (watts)	POTENCIA (dB/w)	SENSIBILIDAD DE LA BOCINA (dB)	SUMA EN dB = NPS EN (dB)
1	0	120	120
2	3	120	123
3	4.7	120	124.7
4	6	120	126
6	7.7	120	127.7
8	9	120	129
9	9.5	120	130
10	10	120	130
12	10.7	120	131
16	12	120	132
20	13	120	133
25	13.9	120	133.9
32	15	120	135
50	16.9	120	137
64	18	120	138
100	20	120	140
128	21	120	141
150	21.7	120	141.7
256	24	120	144

Tabla 2.11 Incremento de potencia y NPS generado.

Como se observa en el resultado, puede generarse un NPS de 120 dB pero se requiere de un amplificador que proporcione 131 Watts de potencia; de acuerdo a la tabla 2.8 no es posible encontrar comercialmente un circuito integrado que proporcione esta potencia y que a su vez ofrezca un ancho de banda que cubra el rango ultrasónico. Una razón más, es que al incrementar la potencia al doble sólo se obtiene un incremento del NPS en 3 dB [URL 13] [URL 18]. Por ejemplo, si el *tweeter* tiene una sensibilidad de 120 dB a 1 metro cuando se le aplica 1 Watt de potencia, es porque 1 watt equivale a 0 dB/w como se mencionó al inicio de este tema, al hacer la suma en decibeles de la potencia y la sensibilidad se obtiene como resultado el NPS que se genera a 1 metro de distancia, en este caso 120 dB.

La tabla 2.11 muestra la relación que existe en el aumento del NPS con respecto al incremento de la potencia eléctrica del amplificador. En esta tabla se puede observar que el oído escucha la misma diferencia al incrementar la potencia de 1 a 2 Watts que de 128 a 256 Watts, ya que sólo se obtiene un incremento del NPS en 3 dB.

En el desarrollo de este proyecto uno de los aspectos más importantes que se debe tomar en cuenta es el costo del sistema, debido a que si alguna empresa deseara utilizarlo como sistema de protección con estas características, deberá producirlo en serie en caso de tener varias subestaciones eléctricas. Para producir en serie cualquier producto éste debe diseñarse de tal manera que el costo de producción sea mínimo; en este caso, construir un amplificador de 24 Watts es más barato que construir uno con el doble de potencia y el ancho de banda adecuado, con el cual se obtendrían sólo 3 dB más de NPS; es más rentable emplear *tweeters* con alta sensibilidad que requieran de menor potencia para generar un mayor NPS. Esta es la razón por la cual en la aplicación de este sistema es mejor construir 8 sistemas de audio independientes, como se indica en la tabla 2.10. Otra ventaja de utilizar 8 sistemas de audio ultrasónico consiste en que cada uno de ellos es capaz de proporcionar una cobertura de hasta 50 metros de distancia con un NPS de 100 dB, como se demuestra a continuación aplicando la ecuación 2.15.

$$\text{NPS} = \text{PWL} - 20 \log(d) - 11 \text{ dB}$$

Donde:

$$\text{PWL} = 145 \text{ dB y } d = 50 \text{ metros}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 2.15 se obtiene el siguiente resultado:

$$\text{NPS} = 145 - 20 \log(50) - 11 \text{ dB} = \mathbf{100 \text{ dB}}$$

Este NPS corresponde a un nivel de sonido muy fuerte para el oído de las personas ó animales que se encuentren a 50 metros de distancia, lo cual hace que el sistema ahuyentador sea todavía más confiable, porque evita que los animales se aproximen demasiado a la subestación eléctrica cuando la alarma esté activada. Si algún animal se introduce a ella y se aproxima demasiado a un equipo, el sistema de protección le proporcionará un NPS de 133 dB cuando se encuentre a 1 metro de distancia obligándolo a retirarse del lugar, de lo contrario, de acuerdo a la tabla 1.3 le provocará un dolor auditivo muy intenso y daños inmediatos e irreversibles en su sistema auditivo en un tiempo máximo de 28 segundos de exposición a este nivel de presión sonora.

Realizando algunas operaciones algebraicas, se puede comprobar que el circuito puede reducirse. Por ejemplo, si se cuenta con un *tweeter* con sensibilidad de 120 dB/w a 1 metro y un amplificador de 24 Watts, se obtiene un NPS de 113 dB a 11.45 metros. Si se aumenta al sistema otra *tweeter* y otro amplificador igual, para el oído se incrementa el NPS a 116 dB, pero utilizando el mismo *tweeter* con un amplificador de 50 Watts se obtendría el mismo NPS, es decir, 116 dB.

Por otra parte, para incrementar el NPS en 3 dB, es decir a 119 dB, se necesitan 4 *tweeters* y 4 amplificadores de 24 Watts, o bien, un solo *tweeter* pero con un amplificador de 100 Watts, lo cual resultaría en una reducción del sistema, pero más alto en costo y más difícil de construir con características ultrasónicas como se mencionó anteriormente.

Una desventaja más al utilizar amplificadores de potencia grande, se debe a que no es fácil conseguir comercialmente emisores ultrasónicos que soporten estas potencias, mucho menos emisores que superen en un 50% estos valores para que funcionen correctamente y sin ningún riesgo, como se mencionó en la sección 2.4.1.

2.5 Subsistema de registro y consulta de eventos

Este subsistema consta de una PC ubicada en una central que se encuentra por lo menos a 400 metros de distancia de una subestación eléctrica. La PC contiene instalado un programa que registra la ocurrencia de un evento cada vez que recibe una señal de aviso. El circuito receptor de señales diferenciales RS-422 se muestra en la figura 2.17.

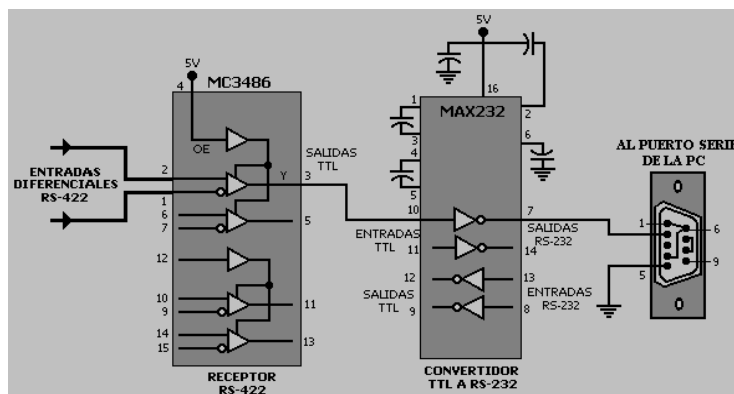
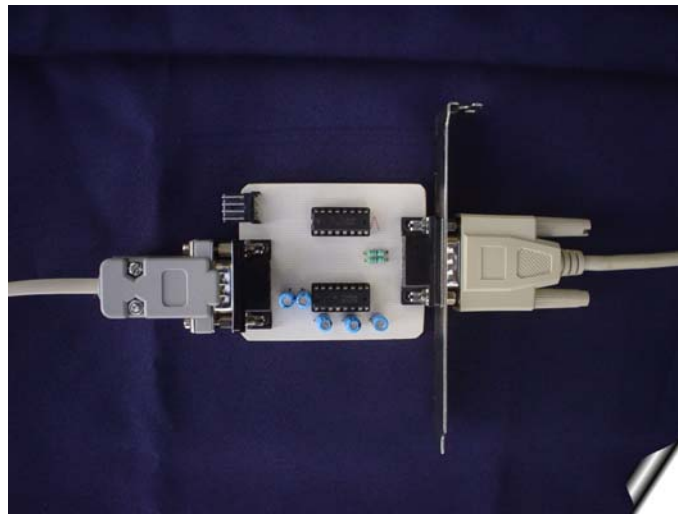


Figura 2.17 Circuito receptor de señales RS-422 diferencial.



a)



b)

Figura 2.18 Tarjeta convertidora de señales RS-422 a RS-232: a) Vista ampliada; b) Conexión a la PC.

En la PC de este subsistema se instala una tarjeta convertidora de señales RS-422 diferencial a RS-232. Esta tarjeta contiene como entrada un conector DB-9 que permite la conexión de los conductores de señal RS-422 diferencial transmitidas por el subsistema de control. En su salida contiene otro conector DB-9 para conectarla al puerto serial de la PC. En la figura 2.18 a) se ilustra la tarjeta de circuito impreso del circuito convertidor RS-422 diferencial a RS-232 y en la figura 2.18 b) se muestra la conexión de esta tarjeta a la PC.

El programa para registrar y hacer consultas sobre el historial de los eventos ocurridos, está hecho en Visual C++ para poder ejecutarse bajo ambiente Windows, y ofrecer una buena interfaz al usuario. El funcionamiento de este programa se describe en el anexo A.

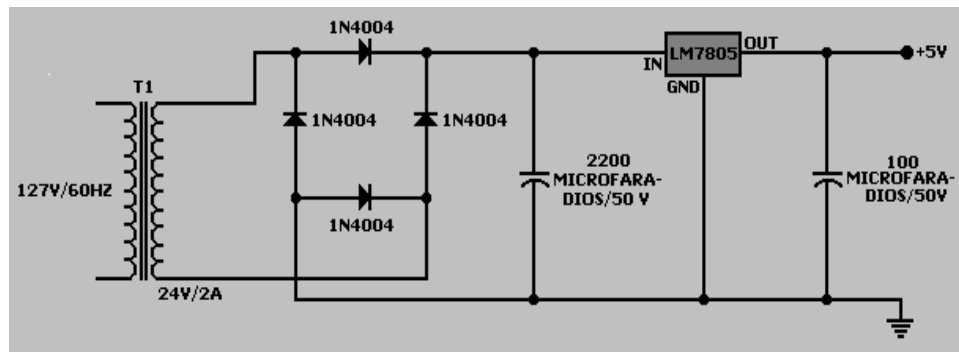


Figura 2.19 Fuente de alimentación (5V / 1A).

2.6 Alimentación de los circuitos

La fuente de alimentación es una parte determinante para el buen funcionamiento del sistema de protección ultrasónico de potencia, ya que sin una alimentación correcta y suficiente, el rendimiento o eficiencia del sistema estará muy por debajo del que normalmente debe ofrecer. Por esta razón, es conveniente contar con una fuente de alimentación para cada subsistema y así proporcionarle a los elementos o circuitos de cada uno de ellos, el voltaje y la corriente necesaria para su operación.

El diseño del circuito de la fuente de alimentación para el subsistema de control, es un circuito compacto y con un número reducido de componentes, pero que proporciona un nivel de voltaje y corriente suficiente para alimentar los elementos que conforman este subsistema de manera correcta. En la figura 2.19 se muestra el diagrama de esta fuente de alimentación.

Este circuito se alimenta desde la red de 127 VAC a través de T1, éste se encarga de transformar la tensión alterna de 127 Volts en tensión alterna de 12 Volts (RMS) con 2 A y una frecuencia de 60 Hz provenientes de la red eléctrica. Posteriormente, la salida del transformador se conecta a 4 diodos de uso general (1N4004) en puente, la salida del puente de diodos se conecta a un capacitor electrolítico de 2200 µFaradios a 50 Volts, debido a que en la salida del puente se obtiene una señal continua pulsante y lo que se desea es una continua pura, con este capacitor se obtiene un menor rizado en la señal.

En este circuito se utiliza el regulador de tensión LM7805 de *Fairchild Semiconductor*. El LM7805 es capaz de proporcionar un voltaje estable de 5 Volts DC con una corriente máxima de 1 A [31], la cual es suficiente para alimentar al circuito de control que consume tan solo 300 mA. Es necesario alimentar con una corriente mayor a 1 Amper al LM7805 para que pueda proporcionar esta corriente, esta es la razón por la cual T1 se ha elegido de 2 Amperes.

La figura 2.20 muestra el diagrama de la fuente de voltaje que alimentará a los 8 sensores del subsistema de detección. El funcionamiento de este circuito es exactamente el mismo que el de la fuente anterior, con la diferencia de que el elemento regulador es un LM7812, cuyo principio de funcionamiento es el mismo que el LM7805 [31]. Cada sensor de este subsistema consume 25 mA y como los 8 sensores estarán conectados en paralelo, consumirán en total 200 mA. Este circuito sin ningún problema puede proporcionar esta corriente, lo que permite utilizarla también como fuente para la alimentación del ventilador.

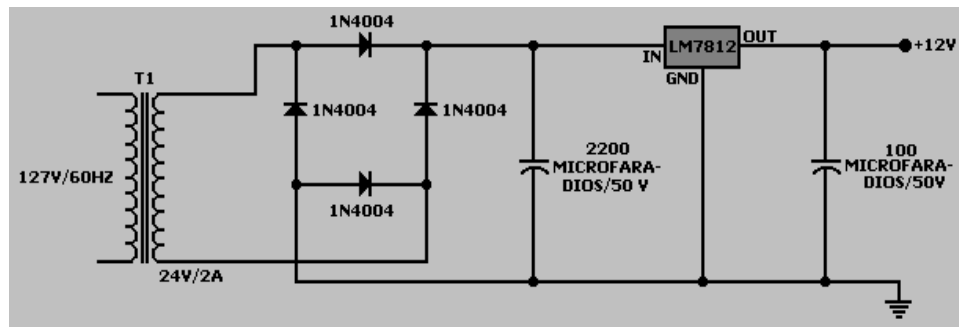


Figura 2.20 Fuente de alimentación (12V / 1A).

La alimentación de los amplificadores de potencia del subsistema de alarma debe ser muy precisa y estable, ya que la potencia de salida depende directamente de los niveles de voltaje y corriente de alimentación. Los amplificadores requieren de una fuente bipolar de ± 12 Volts para su alimentación y consumen una corriente de 1.5 A cuando operan a su máxima potencia. En la figura 2.21 se muestra el diagrama de la fuente bipolar utilizada para alimentar a cada amplificador.

Esta fuente funciona de la misma manera que los circuitos anteriores, pero ahora se utilizan los reguladores de voltaje variable LM317 y LM337 [31]. Estos reguladores se han configurado para proporcionar voltajes de +12 y -12 volts respectivamente. Se utilizan estos tipos de reguladores no tanto por el voltaje, más bien por la corriente, ya que proporcionan una corriente máxima de salida de 1.5 A cuando se alimentan con una corriente superior a ésta. En esta fuente se coloca un segundo capacitor electrolítico de menor capacidad en paralelo con la salida, para eliminar fluctuaciones parásitas que pudieran inducir ruido en los amplificadores.

En total los 8 amplificadores que conforman el subsistema de alarma consumen una corriente aproximada de 12 A, por lo tanto, se requiere de un transformador que proporcione esta corriente para alimentarlos de manera eficiente.

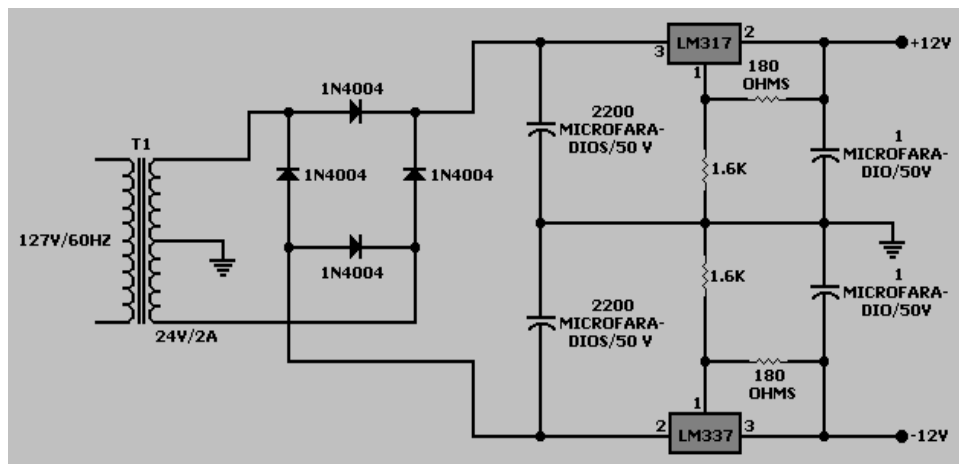


Figura 2.21 Fuente de alimentación bipolar (± 12 V / 1.5 A).

Capítulo 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ULTRASÓNICO DE POTENCIA

El diseño de los programas al igual que el de los circuitos electrónicos desempeñan un papel trascendental en el desarrollo de cualquier aplicación basada en microcontroladores. El programa es lo que hace funcionar al microcontrolador, puesto que las tareas que se ejecutan y las secuencias que se realicen dependen de dicho programa.

En este capítulo se describen los algoritmos y los diagramas de flujo correspondientes al programa principal del microcontrolador, las rutinas para la transmisión serial utilizando el protocolo USART, las rutinas para la generación de los tres barridos de frecuencias y el programa de registro y consulta de eventos.

Cuando se desarrolla un proyecto utilizando un microcontrolador realmente se diseña un circuito integrado con un comportamiento propio, hecho a la medida, donde se ven reflejadas las ideas y los conceptos. En este proceso, el código fuente del programa puede ser dividido en porciones más pequeñas destinadas a realizar una función específica.

Las rutinas son uno de los recursos más valiosos en programación; ellas permiten que los programas sean más simples, debido a que el programa principal se disminuye cuando algunas tareas se escriben en forma de programas pequeños e independientes. En programación una rutina se define como un procedimiento independiente, que realiza una labor específica y a la cual se puede llamar desde cualquier parte del programa principal.

Para la elaboración de cualquier rutina, es necesario conocer a fondo las instrucciones que la forman y cuales son las banderas (*flags*) que son afectadas por algunas operaciones lógicas o aritméticas. La consulta de las banderas se utiliza para tomar decisiones dentro del programa principal.

3.1 Programa principal del microcontrolador

El programa principal se encarga de configurar al microcontrolador y con base en la señal proveniente del subsistema de detección, controla la ejecución del programa cuando ésta provoca la interrupción. El código fuente debe cumplir unas normas simples para ser aceptado por el ensamblador, como por ejemplo el tipo de microcontrolador usado, la dirección de inicio del programa en el microcontrolador, las etiquetas y las instrucciones.

En el programa principal primeramente se activan los puertos, bits y registros especiales. Se ha configurado como entrada el bit RB0INT del puerto B correspondiente a las interrupciones externas y los bits restantes como salidas para facilitar la interfaz con dispositivos externos, además se inicializan todas las variables a usar en las subrutinas.

Cuando en el microcontrolador se genera una interrupción, a través del pin RC4 se desactiva al led indicador de funcionamiento y se activa al led indicador de alarma, posteriormente se transmite una señal de aviso a la central a través del pin correspondiente a las transmisiones seriales asíncronas del microcontrolador. Por último, se activan los ventiladores del subsistema de alarma e inmediatamente después se ejecutan las subrutinas que generan los tres barridos de frecuencias ultrasónicas.

Al terminar la ejecución de los barridos de frecuencias, se desactiva nuevamente al led indicador de alarma y a los ventiladores, activando enseguida al led que indica el funcionamiento del sistema.

Para una mejor comprensión del algoritmo, en la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo correspondiente, el cual facilita la programación de las instrucciones que debe ejecutar el microcontrolador.

3.2 Rutina de servicio a la interrupción

La rutina de servicio a la interrupción está formada por cuatro subrutinas, como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.2. Una vez ejecutadas las cuatro subrutinas retorna nuevamente al programa principal.

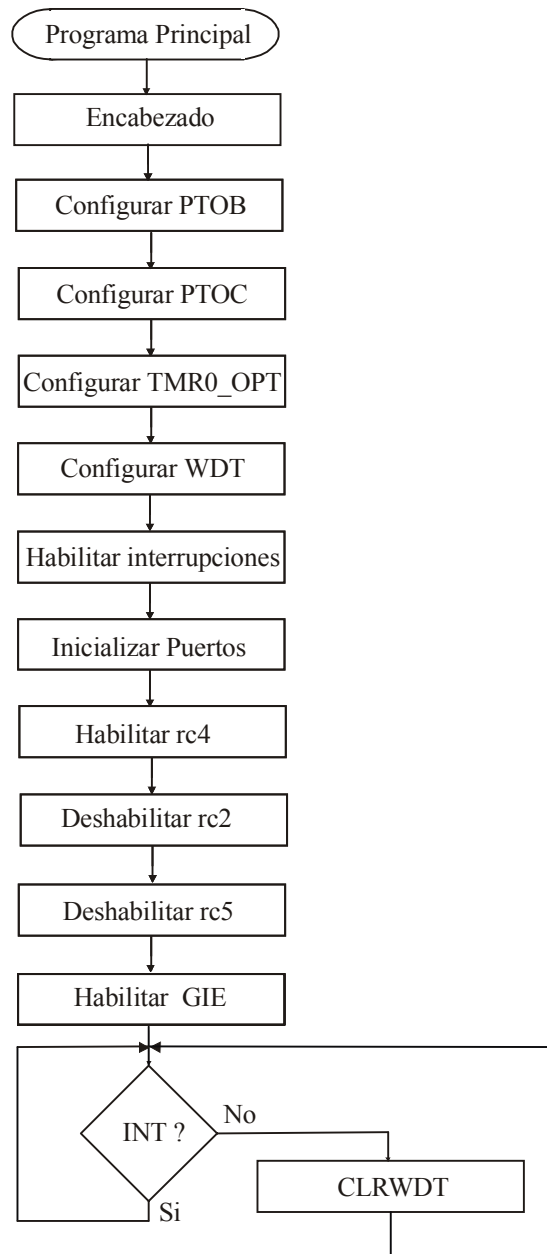


Figura 3.1 Diagrama de flujo del programa principal.

3.2.1 Subrutina de transmisión

La subrutina de transmisión se encarga de tomar el dato guardado en un registro de propósito general y transmitirlo serialmente a través del pin destinado a las transmisiones seriales asíncronas USART del microcontrolador. Para la programación de esta rutina se deben configurar los registros especiales TXSTA y RCSTA correspondientes a las transmisiones seriales.

Para realizar una transmisión asíncrona en modo USART usando el microcontrolador PIC16F876 debe seguirse la secuencia establecida por *Microchip Technology*[11]:

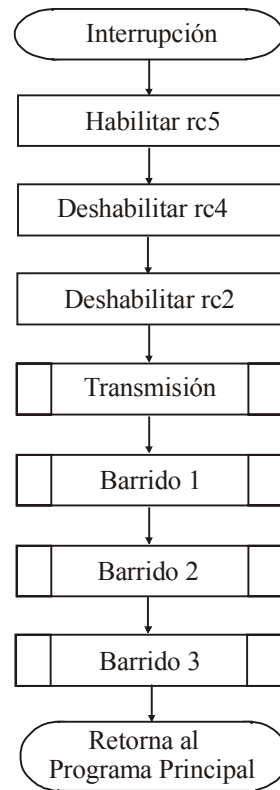


Figura 3.2 Diagrama de flujo de la rutina de servicio a la interrupción.

- Primeramente se debe inicializar el registro SPBRG con la velocidad de transmisión deseada.
- Si se elige una velocidad de transmisión alta debe habilitarse el bit BRGH del registro TXSTA.
- Para habilitar el puerto serial asíncrono debe deshabilitar el bit SYNC del registro TXSTA y habilitar el bit SPEN del registro RCSTA.
- Si desea la interrupción por transmisión USART debe habilitar el bit TXIE del registro de interrupciones por periféricos PIE1.
- Si desea nueve bits de transmisión, debe habilitar el bit TX9 del registro TXSTA. Si se desea una transmisión de 8 bits se debe deshabilitar TX9.
- Para poder transmitir debe habilitar el bit TXEN del registro TXSTA, finalizada la transmisión se habilita la bandera TXIF del registro PIR1, para poder transmitir nuevamente se debe deshabilitar esta bandera.
- Si seleccionó una transmisión de 9 bits de datos, el noveno bit se carga en el bit TX9D del registro TXSTA.
- Si está usando interrupciones debe asegurarse que los bits GIE y PEIE del registro INTCON estén habilitados.
- Para empezar la transmisión debe cargar el dato a transmitir en el registro TXREG.

El diagrama de flujo correspondiente a la transmisión, se muestra en la figura 3.3.

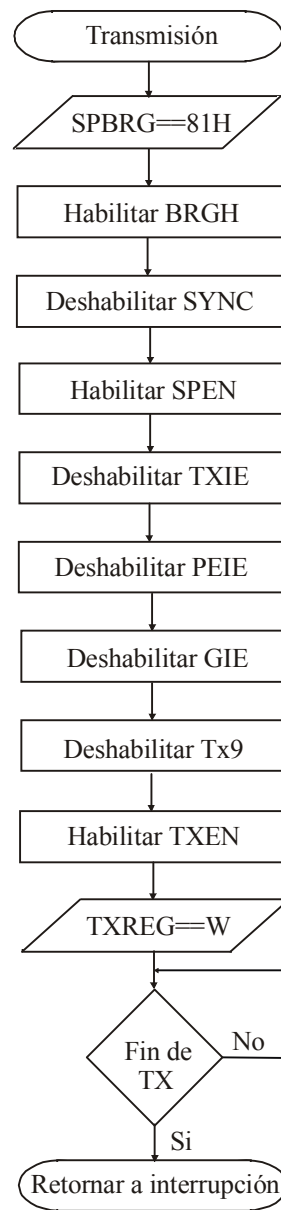


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la subrutina de transmisión.

3.2.2 Subrutina del primer barrido de frecuencias

Esta subrutina es la encargada de generar una señal cuadrada con múltiples frecuencias en el pin RB6 del puerto B del microcontrolador. Primeramente se genera una señal con una frecuencia cercana a 70 KHz, después ésta se decrementa aproximadamente en uno hasta generar una señal cuadrada de 20 KHz, es decir, genera un barrido descendente.

Las variables a utilizar son BIT0=0000 0000 y XOR=1000 0000 las cuales son inicializadas previamente en el programa principal.

La generación del barrido descendente inicia cargando el valor de BIT0 en el puerto B, en ese momento el pin RB6 contiene como salida un nivel lógico bajo. Para generar en este pin una frecuencia aproximada de 70 kHz se carga en una variable el valor del Timer calculado para generar medio ciclo de la señal, de igual manera se carga en otra variable el valor

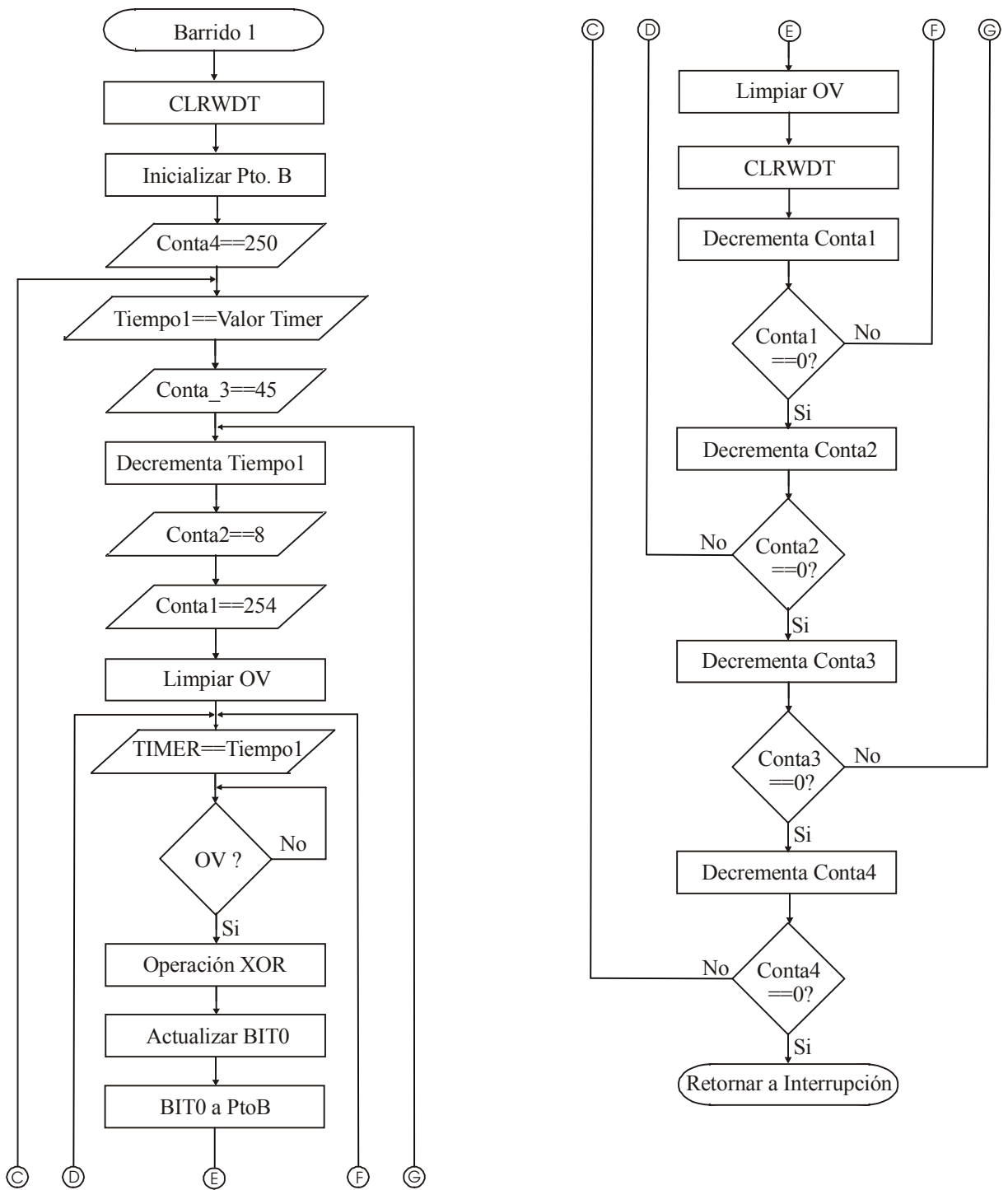


Figura 3.4 Diagrama de flujo del barrido de frecuencias descendente.

calculado para mantener generada esta frecuencia durante 26 milisegundos de tiempo. En seguida se incrementa la cuenta del Timer para generar medio ciclo de la señal, es decir, el pin RB6 se mantiene en bajo durante 7.2 μ segundos de tiempo. Una vez que el Timer ha generado 7.2 μ segundos activa una bandera de sobreflujo; al ocurrir un sobreflujo en el Timer se realiza una operación XOR entre BIT0 y la variable XOR para intercambiar el pin RB6 a un nivel lógico alto, este nivel lógico también se mantiene en RB6 durante 7.2

μsegundos, de esta manera se genera una frecuencia aproximada a 70 kHz. Este proceso se repite durante 26 milisegundos, entonces se carga en el Timer un nuevo valor para generar en RB6 una nueva frecuencia decrementada aproximadamente en uno. El valor máximo que se carga en el Timer es de 25.2 μsegundos, esto para generar una frecuencia de 19.8 kHz.

La figura 3.4 muestra el diagrama de flujo correspondiente a la generación de este barrido.

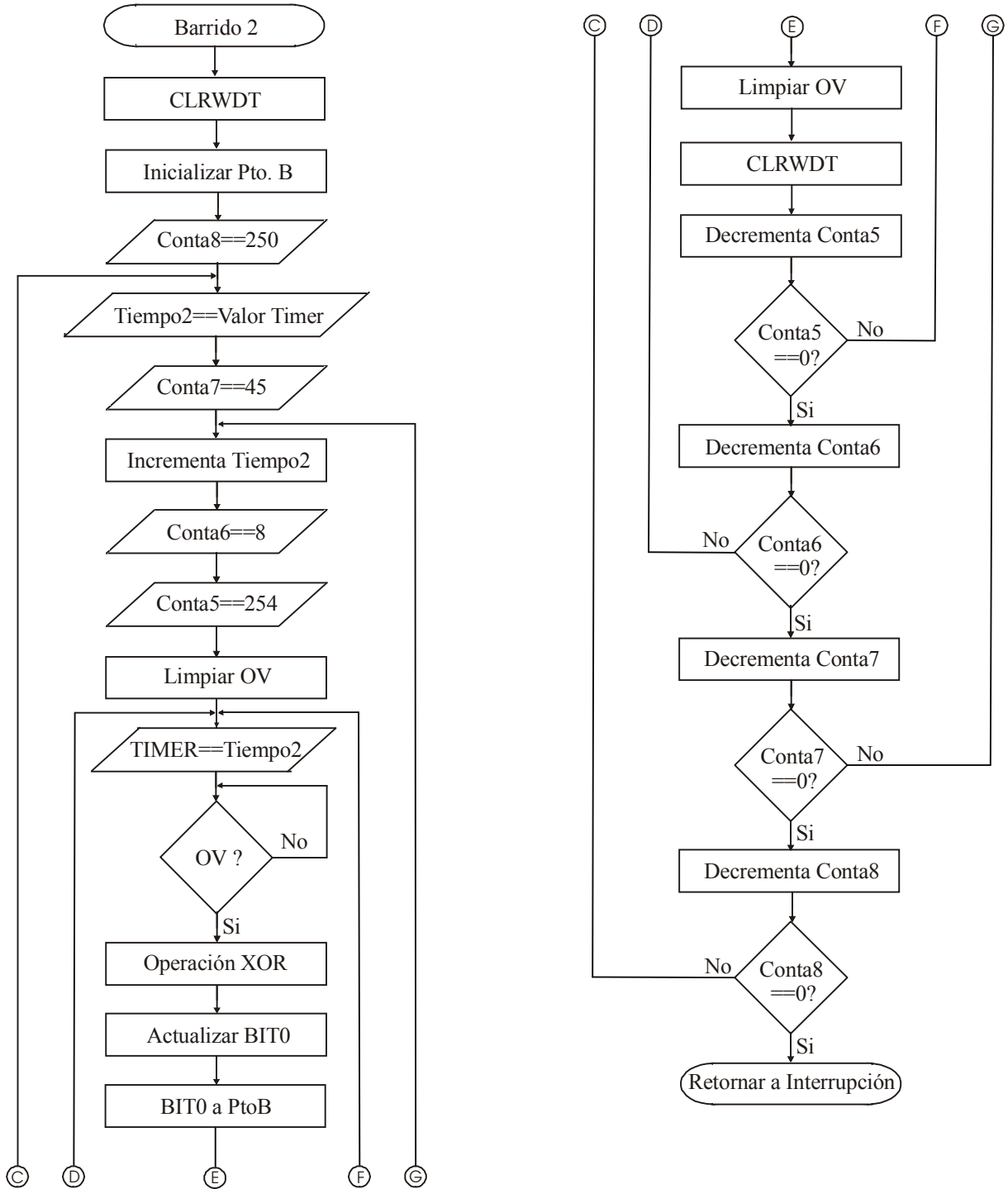


Figura 3.5 Diagrama de flujo del barrido de frecuencias ascendente.

3.2.3 Subrutina del segundo barrido de frecuencias

Esta subrutina es semejante a la anterior, pero ahora genera primero una señal cuadrada cercana a los 20 KHz y después va incrementando la frecuencia de la señal hasta generar una señal cuadrada de aproximadamente 70 KHz (*barrido ascendente*). Las variables a utilizar son también BIT0=0000 0000 y XOR=1000 0000, éstas son inicializadas en el programa principal antes de ejecutar la subrutina.

Para generar el barrido ascendente se sigue el mismo proceso que en el barrido descendente pero de manera inversa, es decir, se inicia generando una frecuencia aproximada de 20 kHz cargando en una variable el valor del Timer calculado para generar medio ciclo de esta señal, de igual manera se carga en otra variable el valor para mantener generada esta frecuencia durante 26 milisegundos de tiempo. En seguida se incrementa la cuenta del Timer para generar medio ciclo de la señal manteniendo el pin RB6 en bajo durante 25.2 μ segundos de tiempo. Una vez generado un tiempo de 25.2 μ segundos, se activa la bandera de sobreflujo del Timer; ocurrido el sobreflujo se realiza una operación XOR entre BIT0 y la variable XOR, intercambiando RB6 a un nivel lógico alto, este nivel lógico también se mantiene en RB6 durante 25.2 μ segundos de tiempo, generando así una frecuencia de 19.8 kHz. Este proceso también se repite durante 26 milisegundos y después se carga en el Timer otro valor para generar una nueva frecuencia incrementada aproximadamente en uno y así sucesivamente hasta cargar en el Timer el valor que genere 7.2 μ segundos para obtener una frecuencia máxima de 69.4 kHz.

En la figura 3.5 se muestra el diagrama de flujo de este proceso.

3.2.4 Subrutina del tercer barrido de frecuencias

Para obtener una señal cuadrada que genere un barrido de frecuencias completo (*ascendente-descendente*), en esta subrutina se combinan las dos subrutinas anteriores para generar una señal de barrido que inicia generando una frecuencia cercana a los 20 kHz y la incrementa aproximadamente en uno hasta generar una frecuencia aproximada de 70 kHz, inmediatamente después vuelve a decrementar esta última frecuencia hasta alcanzar de manera aproximada los 20 kHz nuevamente.

Este tipo de barrido inicia cargando el valor de BIT0 en el puerto B para poner el pin RB6 en un nivel lógico bajo. Este nivel lógico se mantiene en RB6 durante 25.2 μ segundos, esto se logra cargando en una variable el valor del Timer calculado para generar medio ciclo de una señal con una frecuencia aproximada a los 20 kHz. Una vez cargado el Timer su cuenta se incrementa hasta generar los 25.2 μ segundos. Cuando la cuenta del Timer alcanza su máximo valor ocurre un sobreflujo; al ocurrir el sobreflujo se realiza una operación XOR entre BIT0 y la variable XOR, con esto el pin RB6 pasa a un estado lógico alto manteniendo este nivel durante otros 25.2 μ segundos de tiempo, de esta forma se consigue la generación de la frecuencia mínima. Esta frecuencia se genera durante 26 milisegundos, entonces se carga nuevamente en el Timer un nuevo valor para generar en RB6 una nueva frecuencia incrementada aproximadamente en uno, así hasta que el Timer genere 7.2 μ segundos para obtener la frecuencia máxima de 69.4 kHz. Cada frecuencia generada se mantiene en RB6 durante 26 milisegundos de tiempo.

Una vez generada la frecuencia máxima del barrido, se decrementa el último valor cargado en el Timer para incrementar nuevamente la frecuencia.

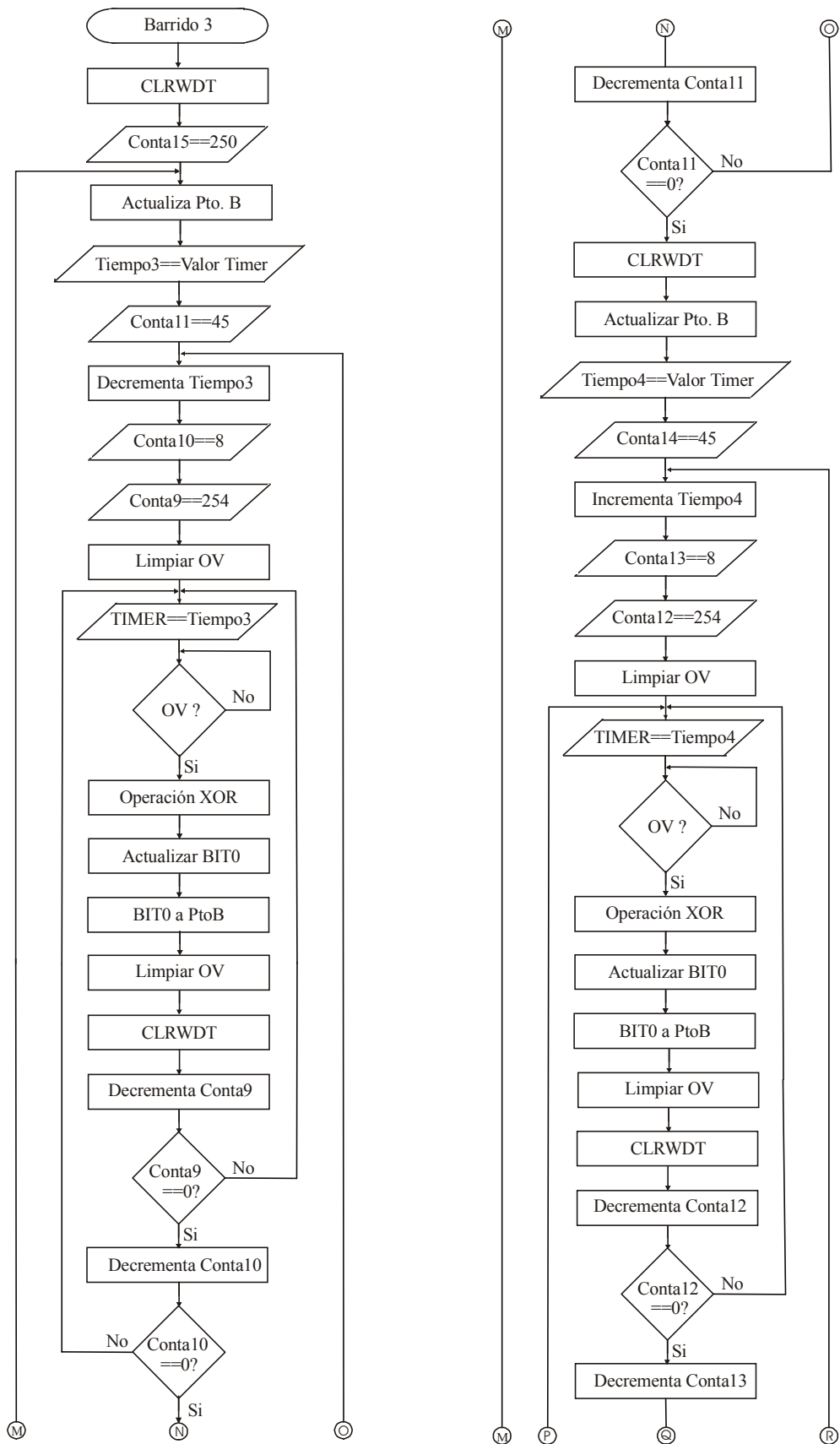


Figura 3.6 Diagrama de flujo del barrido descendente-ascendente.

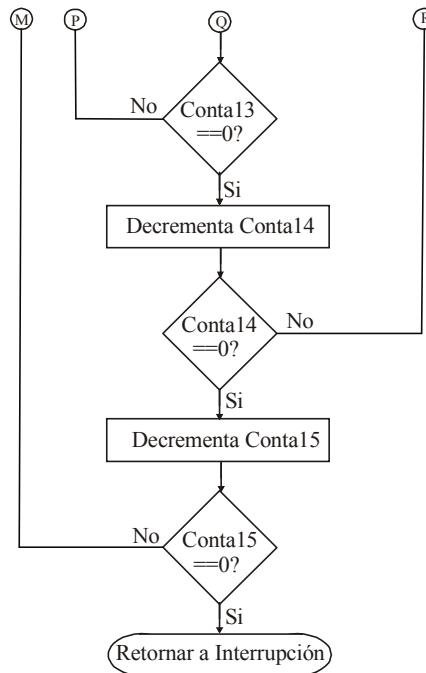


Figura 3.6 Diagrama de flujo del barrido descendente-ascendente. (continuación)

El proceso para decrementar la frecuencia sigue la misma secuencia del barrido descendente, generando medio ciclo de cada señal durante un periodo de tiempo, después intercambia el nivel lógico actual de RB6, generando de esta manera las distintas frecuencias hasta alcanzar nuevamente la frecuencia máxima de 69.4 kHz.

Para comprender más claramente este proceso en la figura 3.6 se ilustra el diagrama de flujo correspondiente.

3.3 Programa de registro y consulta de eventos

El programa de registro y consulta de eventos recibe a través del puerto serie de la PC la señal transmitida por el subsistema de control; cuando esta señal se recibe por primera vez, el programa crea un archivo de tipo texto donde se almacena la información correspondiente al evento ocurrido, para consultar posteriormente dicha información.

Las tareas que realiza este programa son las siguientes:

- Configura el puerto serial de la PC con una velocidad de recepción de 9600 baudios, 8 bits de datos, sin paridad y un bit de paro.
- Recibe el dato transmitido por el subsistema de control.
- Crea un archivo de tipo texto.
- Lee de la configuración de la PC los siguientes datos: año, mes, día, y hora.
- Almacena los datos obtenidos de la PC en el registro de tipo texto.
- Genera un reporte de los eventos ocurridos durante el intervalo de tiempo que desee el usuario.

En la figura 3.9 se muestra la interfaz del programa de registro y consulta de eventos, así como la descripción de cada uno de sus componentes.

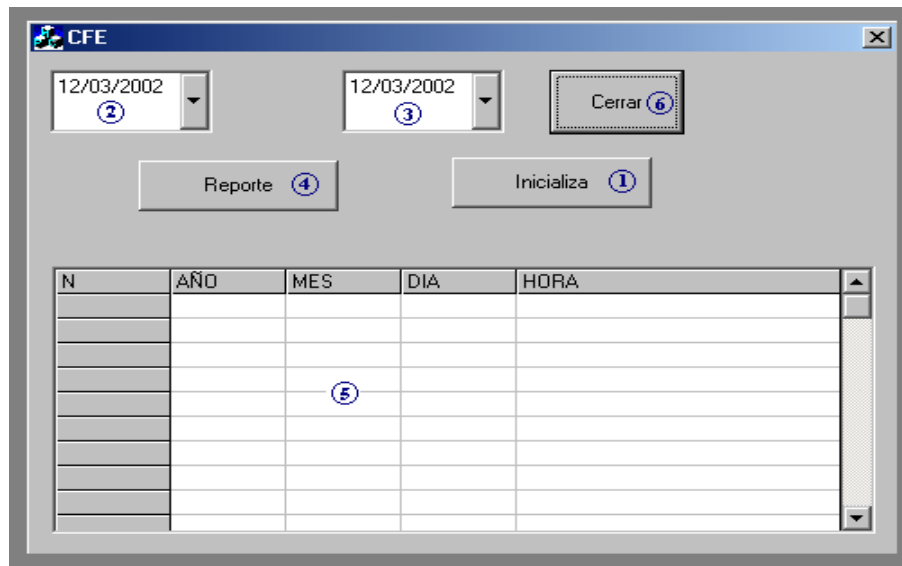


Figura 3.7 Interfaz del programa de registro y consulta de eventos.

1. **Configuración del puerto serial.** Con este botón se configura el puerto serial de la PC para recibir el dato proveniente del subsistema de control con una velocidad de recepción de 9600 baudios.
2. **Calendario de fecha inicial.** En esta ventana se elige la fecha inicial del intervalo de tiempo que se desea consultar.
3. **Calendario de fecha final.** En esta ventana se introduce la fecha final del intervalo de tiempo a consultar.
4. **Generación del reporte.** Con este botón se genera el reporte de eventos ocurridos durante el intervalo de tiempo dado.
5. **Datos del historial.** En esta ventana se despliega la información de los eventos con los siguientes datos: año, mes, día y hora en que ocurrieron dichos eventos.
6. **Cerrar el programa.** Dando un click en este botón se cierra el programa.

El funcionamiento y operación de este programa se detalla en el anexo A denominado “Manual de usuario del Programa de Registro y Consulta de Eventos”.

Capítulo 4

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se describen los resultados y las conclusiones obtenidas durante la caracterización y pruebas de laboratorio del sistema de protección ultrasónico de potencia desarrollado. Los resultados se obtienen con respecto al método de protección empleado, la teoría aplicada, el cálculo del NPS y la medición de la intensidad sonora emitida por el sistema, utilizando en este último un equipo de medición de Nivel de Presión Sonora (sonómetro).

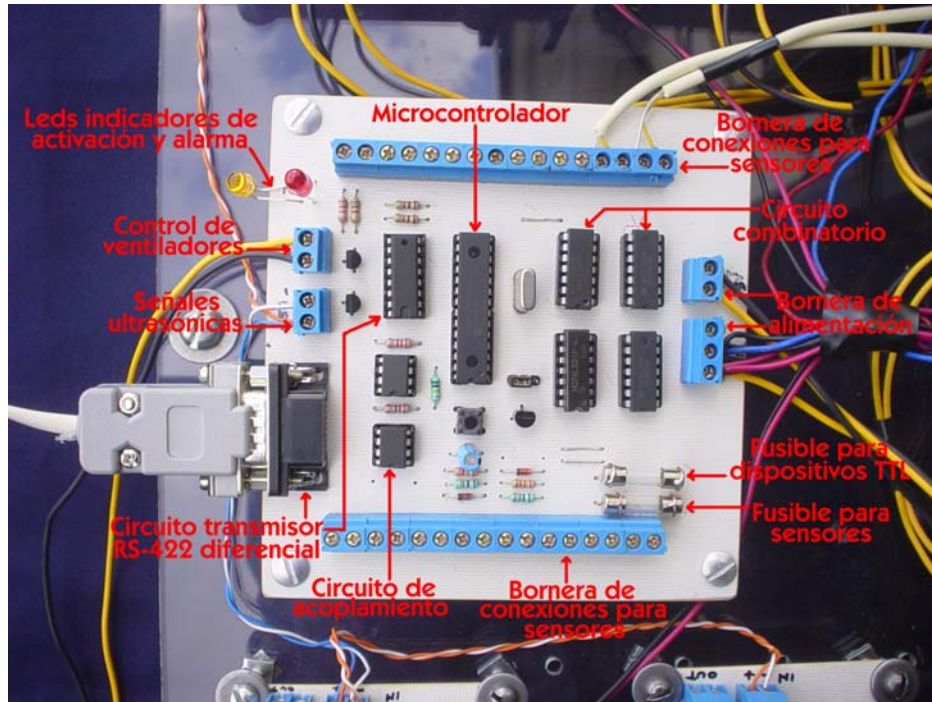
Al inicio de este capítulo se hace la descripción de cada una de las tarjetas que integran el sistema completo, posteriormente se describen los resultados obtenidos durante la caracterización de los amplificadores de potencia, así como las tablas de resultados obtenidas durante la medición del NPS generado en diferentes condiciones de prueba, ya que sin duda alguna, los resultados que se obtienen y las conclusiones a las que se llegan es lo más importante al finalizar el diseño, la implementación y las pruebas correspondientes de cualquier proyecto desarrollado.

4.1 Tarjetas de circuito impreso

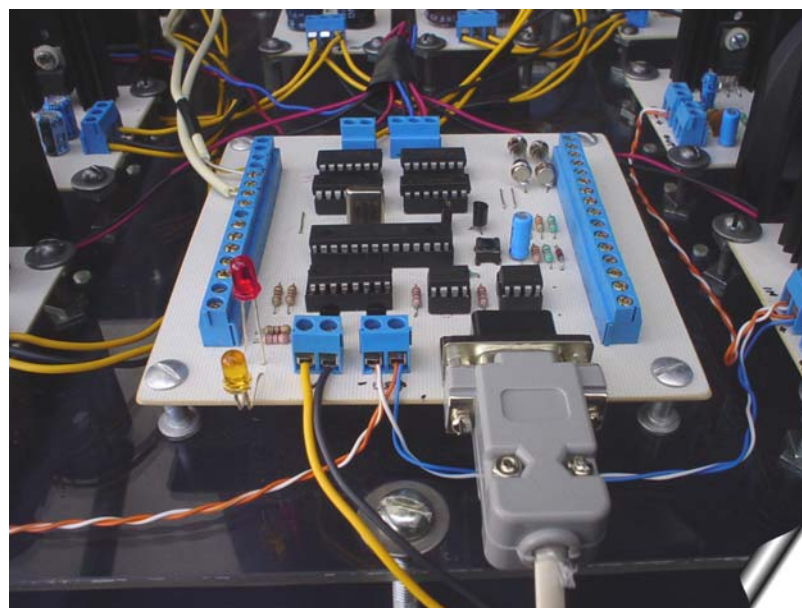
En el capítulo 2 se describieron de forma detallada los circuitos electrónicos de cada uno de los subsistemas. A continuación se ilustran las tarjetas de circuito impreso.

4.1.1 Tarjeta del subsistema de control

En la figura 4.1 se ilustra la tarjeta del subsistema de control, en la cual se indican cada uno de sus componentes.

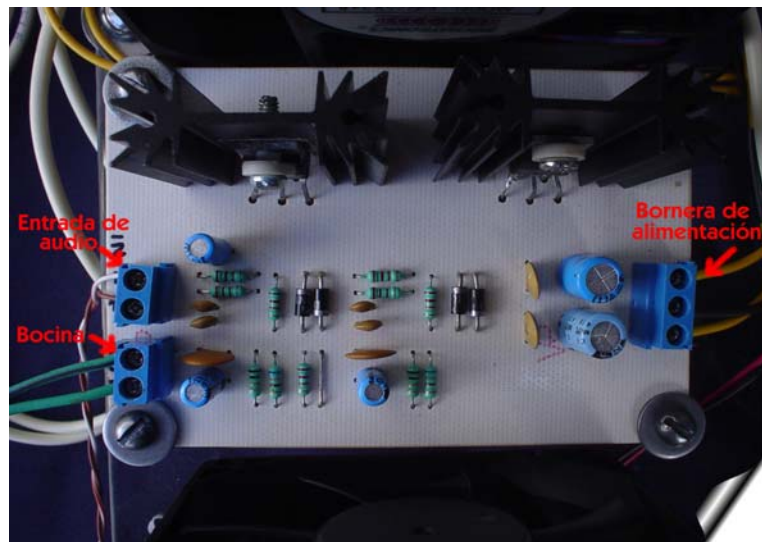


a)

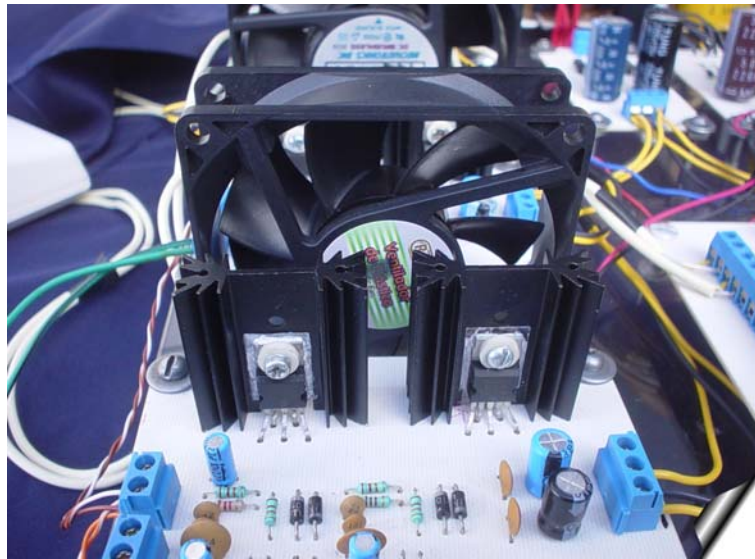


b)

Figura 4.1 Tarjeta del subsistema de control: a) Distribución; b) Vista frontal.



a)



b)

Figura 4.2 Tarjeta de los amplificadores de potencia: a) Distribución; b) Vista frontal.

4.1.2 Tarjeta de los amplificadores de potencia

En la figura 4.2 a) se muestra la tarjeta de circuito impreso de los amplificadores de potencia y la distribución de sus componentes. En cada amplificador se incluye un ventilador como se ilustra en la figura 4.2 b).

- **Borrera de conexión.** Estos conectores son para la alimentación del circuito, en ellos se conecta la fuente de $\pm 12\text{V}/1.5\text{A}$.
- **Entrada de audio.** En estos bornes se conectan los conductores de la señal ultrasónica proporcionada por el subsistema de control.
- **Bocina.** Es el conector para un *tweeter* de 8Ω .

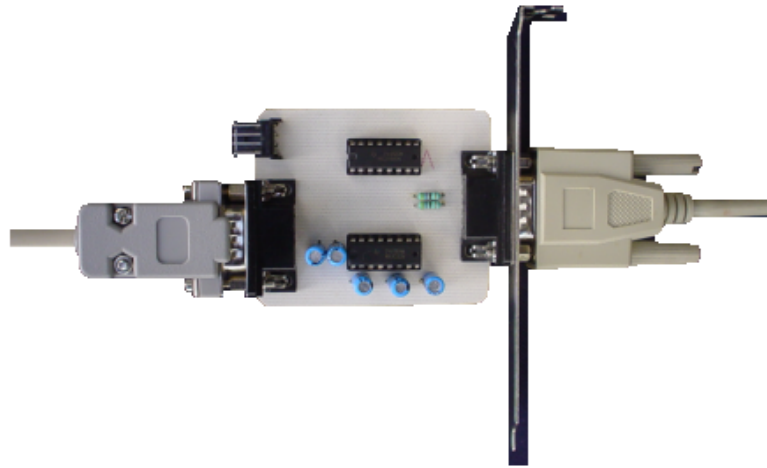


Figura 4.3 Tarjeta convertidora de señales RS-422 diferencial a RS-232.

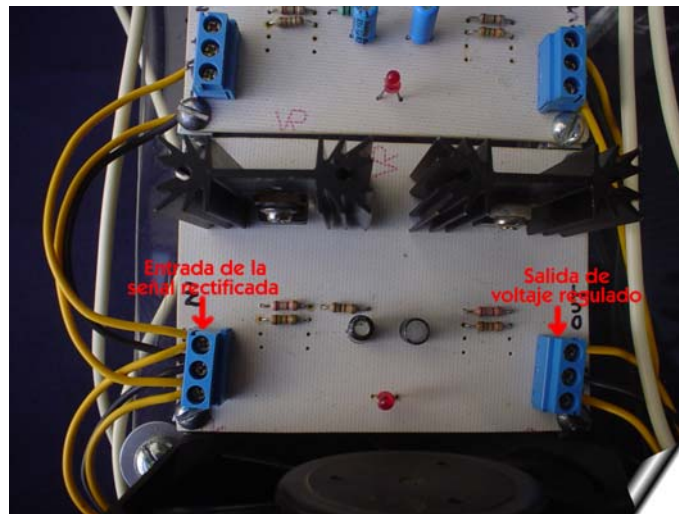


Figura 4.4 Tarjeta de la fuente de alimentación de $\pm 12V/1.5A$.

4.1.3 Tarjeta convertidora de señales RS-422 diferencial a RS-232

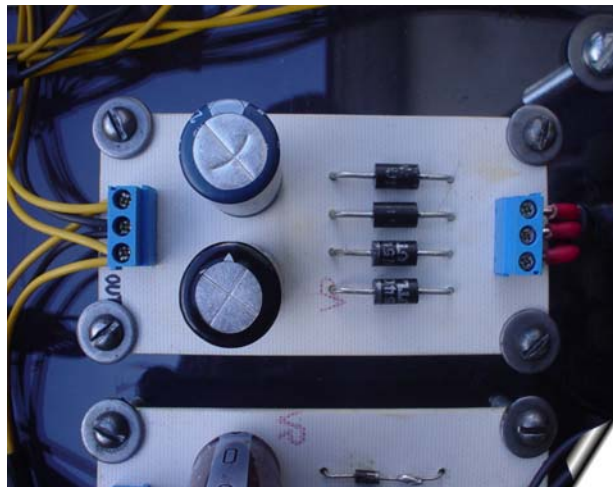
La tarjeta convertidora de señales RS-422 a RS-232 contiene dos conectores DB-9; uno para la señal de entrada RS-422 diferencial proveniente del subsistema de control y otro para la señal RS-232 enviada al puerto serie de la PC. (Figura 4.3).

4.1.4 Tarjetas de las fuentes de alimentación

En la figura 4.4 se ilustra la fuente de alimentación de los amplificadores de potencia y sus conexiones.

Entrada de la señal rectificadora. Esta señal proviene del circuito rectificador mostrado en la figura 4.5 a), éste a su vez se alimenta de un transformador de 24V/10A mostrado en la figura 4.5 b). La figura 4.5 c) muestra el circuito de protección para esta fuente de alimentación.

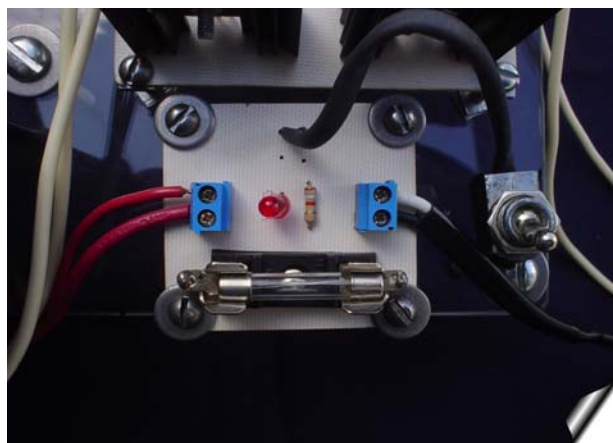
Salida de voltaje regulado. Estos conectores proporcionan un voltaje de $\pm 12V/1.5A$ a los amplificadores de potencia.



a)



b)



c)

Figura 4.5 Fuente de alimentación de los amplificadores: a) Circuito rectificador; b) Transformador 24V/10A; c) Circuito de protección.

4.1.5 Sistema completo

Las placas de circuito impreso se montaron sobre una placa de acrílico. En la figura 4.6 se puede apreciar el montaje del sistema completo.



Figura 4.6 Sistema completo.

Este sistema consta de los siguientes elementos:

- Una tarjeta del subsistema de control.
- Un sensor ADEMCO modelo DT7450EU.
- Cuatro amplificadores de 24 Watts con su respectivo ventilador.
- Cuatro *tweeters* modelo 80-1016 marca STEREN.
- Cuatro fuentes de alimentación de $\pm 12\text{V}/1.5\text{A}$.
- Dos placas con circuitos rectificadores.
- Un transformador de $24\text{V}/10\text{A}$.
- Un transformador de $24\text{V}/2\text{A}$.
- Una fuente de alimentación para PC modelo DT-1514P.
- Una tarjeta convertidora de señales RS-422 diferencial a RS-232.
- Una PC marca DELL.

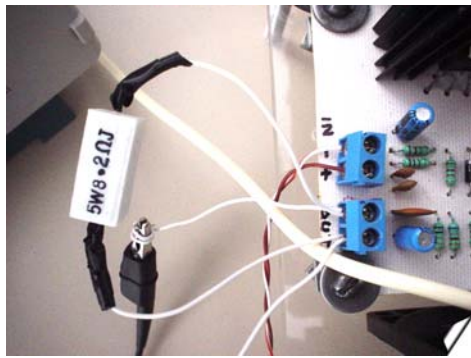
4.2 Caracterización del amplificador de potencia

La caracterización del amplificador de potencia se realizó de dos formas:

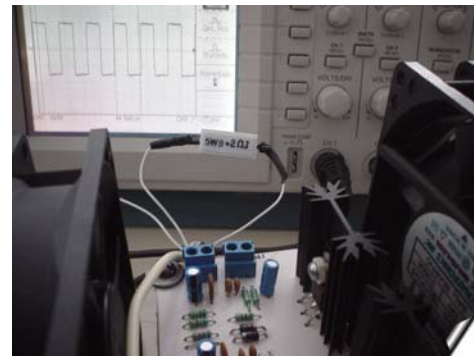
- Variando la impedancia de salida
- Variando la frecuencia de la señal de entrada.

Variando la impedancia de salida. Para determinar la potencia máxima del amplificador con respecto a las variaciones de impedancia en su salida, se emplearon resistencias de $8.2\Omega/5\text{W}$ como carga, ya que la configuración del amplificador empleado en este sistema está diseñada para una carga de 8Ω . La caracterización se realizó empleando una señal de 1kHz generada por el microcontrolador, debido a que en esta frecuencia el NPS se obtiene de manera lineal con respecto al incremento de la potencia de entrada¹³.

¹³ De acuerdo a la gráfica de curvas Fletcher-Munson

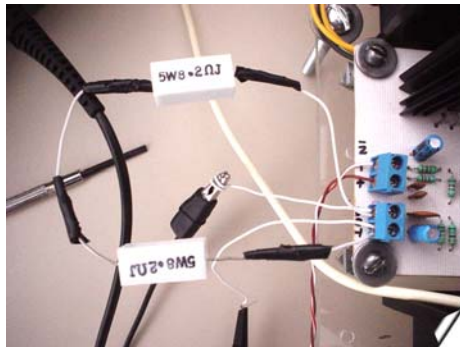


a)



b)

Figura 4.7 Medición del voltaje RMS: a) Resistencia de 8.2 Ω; b) Medición.

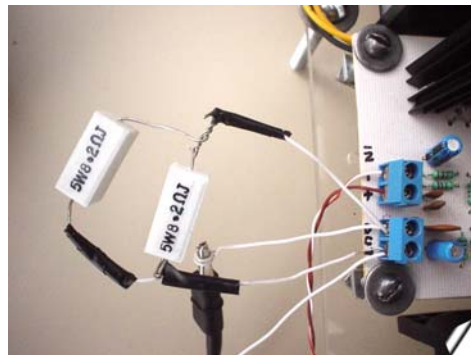


a)



b)

Figura 4.8 Medición del voltaje RMS: a) Resistencias en serie; b) Medición.



a)



b)

Figura 4.9 Medición del voltaje RMS: a) Resistencias paralelo; b) Medición.

Primeramente se conectó una sola resistencia como carga (Figura 4.7 a)). Con un osciloscopio se midió el voltaje RMS de la señal amplificada como se muestra en la figura 4.7 b) y se calculó posteriormente la potencia de salida empleando la ecuación 4.1.

$$P = (V_{rms})^2 / R \quad (4.1)$$

Posteriormente se conectaron dos resistencias en serie de 8.2Ω/5W para obtener una carga de 16.4Ω (Figura 4.8 a)). De igual manera se midió el voltaje RMS de la señal amplificada y se calculó la potencia de salida empleando la ecuación 4.1.

En la figura 4.9 b) se muestra la medición del voltaje RMS, conectando dos resistencias de 8.2Ω/5W en paralelo, para obtener una carga de 4.1Ω. La potencia del amplificador se determinó empleando nuevamente la ecuación 4.1.

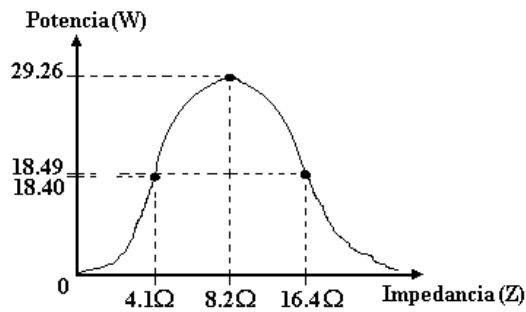


Figura 4.10 Gráfica de caracterización con respecto a la impedancia.

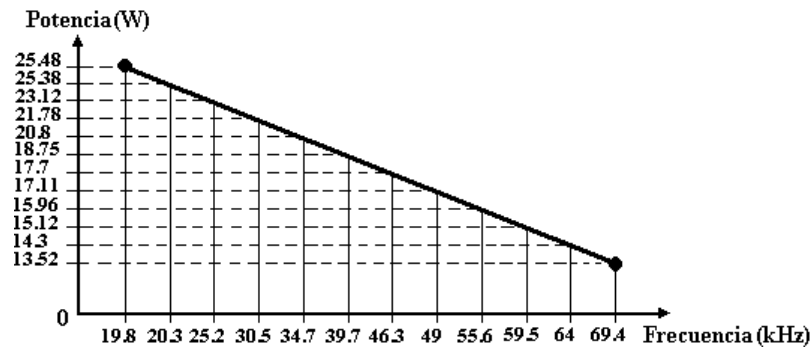


Figura 4.11 Gráfica de caracterización con respecto a las frecuencias ultrasónicas.

Los resultados obtenidos en esta caracterización se muestran en la figura 4.10. Con base en esta gráfica se determinó que al incrementar o disminuir en dos el valor de la carga, la potencia del amplificador disminuye aproximadamente 10.55 Watts.

Variando la frecuencia de la señal de entrada. La caracterización del amplificador de potencia con respecto a la variación de la frecuencia de la señal de entrada, se realizó con el fin de determinar la potencia que los amplificadores son capaces de entregar al *tweeter* cuando amplifican señales de frecuencias ultrasónicas, esto para determinar el NPS que genera el sistema cuando emite estas señales.

Esta caracterización se realizó utilizando como carga una resistencia de $8.2\Omega/5W$ y señales de diferentes frecuencias ultrasónicas, las cuales se generaron a través del microcontrolador. Inicialmente se generó una señal de 19.8 kHz, midiendo posteriormente con un osciloscopio el voltaje RMS de la señal amplificada. Una vez obtenido el voltaje RMS, se empleó nuevamente la ecuación 4.1 para calcular la potencia del amplificador. La caracterización se realizó con señales ultrasónicas entre 19.8 kHz y 69.4 kHz, siguiendo el mismo procedimiento.

En la figura 4.11 se muestran los resultados obtenidos en esta caracterización, y en la figura 4.12 se ilustra la forma en que se llevó a cabo.

Con base en la gráfica de la figura 4.11 se determinó que la potencia de los amplificadores disminuye hasta 13.52 Watts, cuando amplifican las señales de 69.4 kHz generadas en los tres barridos de frecuencias.

Como las resistencias usadas en ambas caracterizaciones son de 5 Watts, el sistema se puso en funcionamiento solo por algunos instantes debido al sobrecalentamiento de las mismas, este tiempo fue suficiente para capturar el voltaje RMS en el osciloscopio en cada uno de los casos, calculando posteriormente la potencia.



Figura 4.12 Medición del voltaje RMS para frecuencias ultrasónicas.

De acuerdo a los cálculos realizados en la sección 2.4.3, se tenía teóricamente que al emplear un amplificador y un *tweeter* se obtenía un NPS de 134 dB a 1 metro de distancia. En la práctica este NPS disminuye al emitir señales ultrasónicas. A continuación se muestran los resultados obtenidos una vez caracterizado el amplificador, considerando la frecuencia máxima emitida (69.4 kHz) y que en ultrasonido se aplican las normas de la acústica de igual forma que en el sonido [URL 19].

- NPS generado a 1 metro de distancia empleando un amplificador y un *tweeter*:

1. Se convierte la potencia eléctrica a dB/w.

$$10 \log (13.52) = 11.3 \text{ dB/w}$$

2. Se suman los valores en dB de la potencia y la sensibilidad del *tweeter*.

$$\text{NPS} = 120 \text{ dB} + 11.3 \text{ dB} = 131.3 \approx \mathbf{131 \text{ dB}}$$

- NPS generado a 11.45 metros de distancia por un amplificador y un *tweeter*:

Empleando las ecuaciones 2.14 y 2.15 de la sección 2.4.3:

$$\text{PWL} = 131 + 20 \log (1) + 11 \text{ dB} = 142 \text{ dB}$$

Sustituyendo PWL=142 dB en la ecuación 2.15 e incrementando la distancia al cuadrado, se obtienen los siguientes resultados:

$$\text{NPS} = 142 - 20 \log (1) - 11 \text{ dB} = 131 \text{ dB}$$

$$\text{NPS} = 142 - 20 \log (2) - 11 \text{ dB} = 125 \text{ dB}$$

$$\text{NPS} = 142 - 20 \log (4) - 11 \text{ dB} = 119 \text{ dB}$$

$$\text{NPS} = 142 - 20 \log (8) - 11 \text{ dB} = 113 \text{ dB}$$

$$\text{NPS} = 142 - 20 \log (16) - 11 \text{ dB} = 107 \text{ dB}$$

En d=11.45 metros se tiene:

$$\text{NPS} = 142 - 20 \log (11.45) - 11 \text{ dB} = \mathbf{109 \text{ dB}}$$

- NPS generado a 11.45 metros empleando 4 amplificadores con su respectivo *tweeter*:

$$\text{NPS con 2 sistemas de audio} = 109 \text{ dB} + 109 \text{ dB} = 112 \text{ dB}$$

$$\text{NPS con 4 sistemas de audio} = 112 \text{ dB} + 112 \text{ dB} = \mathbf{115 \text{ dB}}$$

Con base en estos cálculos se determina que el sistema ultrasónico de potencia genera un NPS de 115 dB cuando se emite la frecuencia máxima de 69.4 kHz, es decir, en frecuencias ultrasónicas el NPS sólo disminuye en 4 dB con respecto a los cálculos obtenidos teóricamente en la sección 2.4.3, correspondiente al diseño del subsistema de alarma.



Figura 4.13 Sonómetro modelo 33-2055 de RadioShack.

4.3 Medición del Nivel de Presión Sonora (NPS)

La medición del Nivel de Presión Sonora consistió en medir el NPS a diferentes distancias con respecto a las fuentes de sonido (*tweeters*), empleando para esto un sonómetro de Radio Shack mostrado en la figura 4.13, el cual posee las siguientes características [URL 20]:

- Fuente de alimentación: Batería alcalina de 9 Volts.
- Micrófono: Condensador eléctrico.
- Escalas: 50 dB a 126 dB.
- Exactitud: ± 2 dB a 114 dB de NPS.
- Referencia: 0 dB = 20 μ Pascales.
- Ponderación: A y C.
- Respuesta en frecuencia: 500 Hz y 10 kHz utilizando la ponderación A.
- Distorsión: Menor al 2% a 1 kHz.

Debido a las limitaciones con respecto a la respuesta en frecuencia del sonómetro, las mediciones se realizaron empleando un barrido de frecuencias entre 4.5 kHz y 7.5 kHz, utilizando la escala de ponderación A. Con ello fue posible comprobar la teoría investigada sobre el hecho de que el oído percibe los niveles de sonido de acuerdo a una escala logarítmica y no lineal con respecto al incremento de la potencia aplicada y con respecto a la caída del NPS en 6 dB al incrementar la distancia al cuadrado (tomando como referencia la fuente de sonido). En la figura 4.14 se muestra la disposición del sistema, de los *tweeters* y del sonómetro al realizar las mediciones.

Los resultados obtenidos de las mediciones se resumen de la siguiente manera:

- La tabla 4.1 muestra los resultados medidos con un sólo sistema de audio (un tweeter y un amplificador) con respecto al incremento de la distancia.
- La tabla 4.2 muestra los resultados medidos con respecto al incremento de sistemas de audio.
- La tabla 4.3 muestra los resultados medidos con 4 sistemas de audio incrementando la distancia con respecto a la fuente generadora de sonido.



Figura 4.14 Disposición del sistema de protección y del equipo de medición.

MEDICIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA			
NÚMERO DE SISTEMAS	DISTANCIA (metros)	NPS CALCULADO (dB)	NPS MEDIDO (dB(A))
1	1	131	125
1	2	125	119
1	4	119	113
1	8	113	107
1	11.45	109	104
1	16	107	101
1	50	97	91

Tabla 4.1 Resultados del NPS medido en un sistema de audio.

MEDICIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA			
NÚMERO DE SISTEMAS	DISTANCIA (metros)	NPS CALCULADO (dB)	NPS MEDIDO (dB(A))
1	11.45	109	104
2	11.45	112	107
3	11.45	113	108
4	11.45	115	110

Tabla 4.2 Resultados del NPS medido con respecto al incremento de sistemas de audio.

MEDICIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA			
NÚMERO DE SISTEMAS	DISTANCIA (metros)	NPS CALCULADO (dB)	NPS MEDIDO (dB(A))
4	1	137	131
4	2	131	125
4	8	119	113
4	11.45	115	110
4	16	113	107
4	50	106	95

Tabla 4.3 Resultados del NPS medido con 4 sistemas de audio.



Figura 4.15 Sensor ADEMCO modelo DT7450EU.

4.4 Ajuste de los sensores

Con el sensor ADEMCO modelo DT7450EU se obtuvieron buenos resultados durante las pruebas del subsistema de detección, esto se debe a que los sensores que utilizan la tecnología de microondas tienen la ventaja de traspasar diferentes materiales como son: madera, plástico, cartón y ladrillos [15]. Se puso a prueba en un espacio lleno de objetos de diferentes tamaños, comprobando que efectivamente las microondas sí traspasan estos materiales y detectan cualquier movimiento (por ejemplo de un ratón) dentro del área protegida cuando el sensor es ajustado a su máxima sensibilidad. En la figura 2.15 se muestra este sensor.

4.5 Verificación de la transmisión-recepción de la señal de aviso

La transmisión de la señal de aviso del subsistema de control al subsistema de registro y consulta de eventos se llevó a cabo sin ningún inconveniente. Empleando un cable de tipo telefónico con una longitud de 50 metros se pudo transmitir y recibir la señal sin ningún problema a velocidades de transmisión de 1200, 2400, 4800 y 9600 baudios.

4.6 Verificación del programa de Registro y Consulta de eventos

Las pruebas del programa de registro y consulta de eventos consistieron en generar eventos en diferentes momentos, esto se logró provocando movimientos en el subsistema de detección y alterando la hora y la fecha de la PC; posteriormente se realizaron consultas en diferentes intervalos de tiempo para verificar la información. En la figura 4.16 se muestra el reporte generado sobre la consulta de uno de los intervalos de tiempo experimentados.

4.7 Experimentos

Los experimentos de laboratorio que se realizaron para probar el sistema con respecto a la ahuyentación de animales, fueron aplicados únicamente con pájaros, ratones, perros y gatos, debido a su disponibilidad.

Como el sistema cubre un amplio rango de frecuencias y genera un alto NPS, provocó que estos animales sufrieran molestias auditivas, pues, efectivamente, de manera casi inmediata buscaron alejarse de la fuente generadora de ruido. Con respecto al nivel de presión sonora generado, se obtuvieron los mejores resultados al emplear el mayor número de amplificadores, como era de esperarse.

N	AÑO	MES	DIA	HORA
3	2000	AGOSTO	13	1:13:50
4	2000	NOVIEMBR	9	1:14:11
5	2001	FEBRERO	13	1:14:29
6	2001	MAYO	16	1:14:42
7	2001	SEPTIEMBF	1	1:15:0
8	2001	DICIEMBRE	12	1:15:22
9	2001	DICIEMBRE	29	1:15:33
10	2002	MARZO	5	1:15:50
11	2002	ABRIL	25	1:16:6
12	2002	JUNIO	21	1:16:18

Figura 4.16 Generación del reporte de una consulta de eventos.

4.8 Conclusiones

Una vez concluido el diseño y construcción del sistema desarrollado, se aprecia la importancia y los alcances de un sistema de este tipo para beneficio de cualquier aplicación relacionada con la ahuyentación de animales, ya que ofrece ventajas con respecto a otros dispositivos ahuyentadores gracias a que su diseño se basa en un microcontrolador, lo cual hace posible la modificación de las señales ultrasónicas que genera, convirtiéndolo en un sistema adaptable para la ahuyentación de distintas plagas.

El estudio de los factores físicos y fisiológicos que influyen en la propagación y percepción de las ondas sonoras fue determinante en el diseño del sistema. Esta investigación requirió un mayor tiempo que el planteado en el diagrama cronológico del desarrollo del proyecto, ya que fue difícil encontrar fuentes de información acerca de estos factores. Una vez realizada la investigación y comprendida la información disponible, la teoría se comprobó en forma práctica, obteniendo los resultados mostrados la sección 4.3 correspondiente a la medición del nivel de presión sonora NPS.

La caída e incremento del NPS se comprobó midiendo su valor de acuerdo a las variaciones de distancia y el número de sistemas de audio, considerando el área a proteger y las características de los elementos que integran el subsistema de alarma.

Con respecto a la aplicación de la teoría, se puede concluir que existen otros factores externos que influyen cuando se pone en práctica el sistema de protección, esta teoría sólo se cumple en un medio ambiente ideal, es decir, en un ambiente sin ruido, aire, lluvia y objetos que limiten la propagación de las ondas sonoras, de otra manera, al realizar las mediciones con el sonómetro, los niveles de NPS medidos no coinciden exactamente con el NPS calculado como se muestra en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Por otra parte, también fue posible comprobar durante la caracterización y prueba del sistema, que el oído humano es incapaz de percibir frecuencias superiores a los 19.8 kHz, llegando a la conclusión que el ruido ultrasónico es el método de ahuyentación más recomendable debido a la seguridad que ofrece al ser humano.

La eficiencia del sistema como se puede observar no se basa únicamente en la generación de señales ultrasónicas adecuadas para la ahuyentación, también se relaciona directamente con la generación del nivel de presión sonora que producen los amplificadores de potencia

conjuntamente con los *tweeters* del subsistema de alarma, siendo el NPS un factor determinante para obtener del sistema una respuesta de ahuyentación casi inmediata. Por lo tanto, al instalar este sistema de protección es necesario dimensionar correctamente el área que se desea proteger y realizar los cálculos necesarios para determinar el número de sistemas de audio ultrasónico que deberán emplearse en cada aplicación.

Otro aspecto importante en el diseño de este sistema fue el análisis y experimentación con distintos modelos de amplificadores, ya que no todos los amplificadores comerciales cumplen con las características ultrasónicas requeridas. Una correcta elección del amplificador se refleja en la eficiencia del sistema. El amplificador integrado de audio TDA2006 es uno de los pocos dispositivos amplificadores que cubren un amplio rango de frecuencias, pudiendo amplificar señales de hasta 70 kHz de manera adecuada, como se pudo comprobar durante su caracterización.

De igual manera que los amplificadores, la correcta elección de los *tweeters* es de vital importancia, esto se debe a que un *tweeter* de mala calidad requiere de mayor potencia para obtener un determinado NPS. Por el contrario, uno con alta sensibilidad requiere de menor potencia para generar el mismo NPS.

Con respecto al subsistema de registro y consulta de eventos, fue importante la elección de la norma de comunicación serial a usar en la transmisión de la señal de aviso entre el subsistema de control y este subsistema, la elección de la norma RS-422 diferencial supera considerablemente la distancia de transmisión de 400 metros, dejando abierta la opción de utilizar esta transmisión en aplicaciones que requieran de una distancia menor a los 12,000 metros con una velocidad de transmisión de 9600 bits por segundo.

Por otra parte, el subsistema de detección puede excluirse en aplicaciones que requieran la generación continua de la señal de alarma o sus sensores pueden sustituirse por algún otro método de detección, ya que los bornes de conexión contenidos en la tarjeta principal del sistema están conectados a un circuito lógico combinatorio, permitiendo generar una interrupción en el microcontrolador cuando se detecta en los bornes cualquier señal TTL en el estado lógico correspondiente a dicha interrupción.

En este documento se trataron en temas separados la implementación de cada subsistema, realizando el análisis que cada uno requería en su diseño y desarrollo, reforzando el diseño con bases sobre conocimientos de estudios científicos. El subsistema de alarma es el que más requirió de conocimientos sobre acústica, psicoacústica y fisiología del oído, sin éstos, sería casi imposible demostrar los resultados que se obtuvieron al finalizar el desarrollo del sistema, llegando a la conclusión que en el prototipo del sistema de protección ultrasónico de potencia, el subsistema de alarma únicamente puede ser modificado, si en algún momento dado se contara con elementos de mejores características.

Para finalizar, se concluye también que el sistema desarrollado supera considerablemente las características que ofrecen algunos dispositivos mostrados en la tabla del estado del arte, ya que según generan un NPS superior a los 100 dB con pequeñas fuentes de alimentación, siendo imposible generar un NPS tan elevado con estas fuentes, ya que la potencia depende directamente del voltaje y la corriente que le proporciona la fuente, por esta razón, en el sistema desarrollado cada amplificador cuenta con una fuente de alimentación independiente de $\pm 12V/1.5A$ y se emplea un transformador que proporciona una corriente de hasta 10 A con un voltaje RMS de 24 Volts.

4.9 Perspectivas

Con base en el desarrollo de este sistema de protección ultrasónico de potencia pueden plantearse algunos trabajos a futuro, como los siguientes:

- La creación de repelentes acústicos aplicados al campo agrícola con base en un estudio más detallado sobre las plagas que afectan los cultivos. Por ejemplo, algunas especies de pájaros destrozan los cultivos afectando hasta en un 30% la cosecha anual. Una solución a este problema es adecuar el sistema electrónico desarrollado para que genere y reproduzca repetidamente los gritos de alerta que producen las diferentes especies de pájaros cuando se encuentran en peligro, creando con ello falsas alarmas hasta lograr que estos animales abandonen los cultivos. Debido a sus características este sistema de protección ultrasónico de potencia puede adaptarse para ahuyentar cualquier tipo de plagas, empleándolo con características sónicas o ultrasónicas dependiendo de la aplicación. Un repelente acústico diseñado para cubrir áreas demasiado grandes empleando gritos de alerta, tiene mayores ventajas con respecto a los demás medios repelentes, debido a que los animales no se acostumbran a estos gritos ni les son indiferentes, ya que la reacción de huir se fija en su sistema nervioso simplemente como instinto de supervivencia.
- Con respecto a las características de este sistema, se puede diseñar e implementar con dispositivos electrónicos discretos un amplificador de alta potencia con características ultrasónicas para adaptarlo al sistema y reducir el número de amplificadores.
- Diseñar bocinas especiales para aplicaciones ultrasónicas, que cubran un amplio rango de altas frecuencias, que soporten altas potencias y sobre todo que posean una alta sensibilidad para diseñar sistemas ultrasónicos más compactos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Landis & Gyr.: Manual de transformadores de Potencia. Editorial Landis & Gyr, Suiza, 1998.
- [2] IEM.: Manual de transformadores de Potencia Tipo Subestación. IEM . México, 2001.
- [3] Fomento Agropecuario.: Manipulación y Almacenamiento de granos alimenticios en zonas tropicales y subtropicales. Fomento agropecuario, 2000.
- [4] Morózov, V.: Bioacustica Recreativa. Editorial Mir, Moscú, 1987.
- [5] Núñez, A.: Informática y Electrónica Musical. Segunda edición revisada, 1993.
- [6] Guerrier y Uziel A.: Fisiología Neurosensorial en O.R.L.. Editorial Masson, Barcelona, 1985.
- [7] Beade, A. y Merino, M.: Fundamentos físicos de la música. Instituto de Ciencias de la Educación Universidad de Valladolid, Valladolid, 1998.
- [8] Kuttruff, H.: Room Acoustics Applied Science publishers LTD. Inglaterra, 1979.
- [9] Libro especializado en la música, Editorial Iberia, año de publicación 1989.
- [10] Edison, C.: Curso Básico de Microcontroladores PIC. Compañía Editorial Tecnológica CEKIT, Pereira Colombia, 1997.
- [11] Microchip Technology Inc.: PIC16F87X Data Book. Microchip Technology Inc., USA, 2001.
- [12] Mendez, A. y Amarilla, B.: Acústica Arquitectónica. Editorial UMSA, 1996.
- [13] Diccionario Oxford de la música, Editorial Edhasa, año de publicación 1984.
- [14] Egan, D.: Architectural acoustics. Editorial MacGraw-Hill Inc., 1988.
- [15] Marcombo, S. A. de Boixareu Editores.: Sistemas de Seguridad Electrónicos. Editorial Orbis, Barcelona, 1986.
- [16] Herrera García I.: Diseño de una página web sobre Conceptos Generales de Audio y Acústica. Universidad Politécnica de Madrid, Depto. De Ingeniería Audiovisual y de Comunicaciones, Madrid España, Noviembre 2002.
- [17] Strauss, E.: Equipos de Audio Modernos. Editorial Televisa S. A de C.V., 2000.
- [18] Wells, J.: Servicio y Reparación de Sistemas de Audio. Editorial Limusa S.A de C.V., México, 1994.
- [19] National Semiconductor Corporation.: Linear Databook 1. National Semiconductor Corporation, USA, 1988.
- [20] Vallejo, H.: Electrónica Aplicada. Editorial Televisa S.A. de C.V., 2000.
- [21] Edison, C.: Curso Avanzado de Microcontroladores PIC. Compañía Editorial Tecnológica CEKIT, Pereira Colombia, 1998.
- [22] Wakerly, J.: Principio y Diseño de Sistemas Digitales. Editorial MacGraw-Hill, Segunda Edición, 1988.
- [23] Texas Instruments Incorporated.: Data Sheet MC3487 Quadruple differential driver. Texas Instruments Incorporated, USA, 1995.
- [24] Texas Instruments Incorporated.: Data Sheet MC3486 Quadruple differential line receiver with 3-state output. Texas Instruments Incorporated, USA, 1995.

- [25] Texas Instruments Incorporated.: Data Sheet MAX232N. Texas Instruments Incorporated, USA, 1995.
- [26] Folguera, J.: Alarmas. Editorial Televisa S.A. de C.V., 2001.
- [27] Ademco.: Data Sheet QUEST 2000 DT-7450EU Advanced Image Processing Motion detector. Ademco, 1995.
- [28] Rodríguez, A. y Álvarez, E.: Electroacústica Tomo II. Impreso en el Departamento de Publicaciones de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de la Comunicación, 1983.
- [29] Ruiz, F.: Manual de Baffles y Altavoces. Editorial Ceac, 1997.
- [30] SGS-Thomson Microelectronics.: Data Sheet TDA2006. SGS-Thomson Microelectronics, USA, 1995.
- [31] Fairchild Semiconductor.: MC78XX / LM78XX / MC78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage regulator. Fairchild Semiconductor, USA, 2002.

URL's

- [URL 1] Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Medio Ambiente, México D.F., c2000.(DE, 25 de abril, 2003: [http:// www.shcp.gob.mx/docs/cp96/medamb.html](http://www.shcp.gob.mx/docs/cp96/medamb.html)).
- [URL 2] Universidad de California. Control de Plagas, Universidad de California, c2000.(DE, 25 de abril, 2003:<http://www.ssa.gob.mx/unidades/dirgsa/downloads/proynormas/proy%20NOM48%20al%2014>).
- [URL 3] Sonic technology. PestChaser Electronic Rodent Repellers, Grass Valley California, c2000.(DE, 13 de abril,2003: <http://www.safetycentral.com/pechasfreqa.html>).
- [URL 4] Fandiño Blas. El oído, Aves de Santa Fe Argentina, c2000. (DE, 13 de abril, 2003: <http://www.claseaves.8m.com/aves/paginas/Oido.htm>).
- [URL 5] Psicoacústica, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: <http://www3.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/PSICOACUSTICA/Psicoacustica.html>)
- [URL 6] El sistema auditivo humano, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: <http://www.fuac.edu.co/autonoma/pregrado/ingenieria/ingelec/proyectosgrado/compresvideo/audicion.htm>
- [URL 7] Radarcán. Los ultrasonidos, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: <http://www.radarcán.com/frame.html>).
- [URL 8] Arrakis Servicios y Comunicaciones. Acústica Básica, Grupo BT Ignite España, c2003.(DE, 25 de abril, 2003: <http://www.arrakis.es/~avf/acústica/acústica.htm>)
- [URL 9] Federico Miyara. Niveles Sonoros, Noise Groups Comité Científico Interdisciplinario de Ecología y Ruido, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: <http://www.arrakis.es/~avf/acústica/acústica.htm>).
- [URL 10] Doncel, Diego. Altavoces, Segovia España, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: <http://olmo.pntic.mec.es/jmarti50/doncel/altavoces.htm>).
- [URL 11] Baikovicus, Jimmy. Los riesgos del sonido: El ruido nuestro de cada día, Revista Paula Montevideo Uruguay, c1997.(DE, 25 de abril, 2003: http://www.ateka.com/ateka/notas/los_riesgos_del_sonido.html)
- [URL 12] Doctor Proaudio. Fletcher-Munson: contornos de igual sonoridad/equal loudness contours, Doctor Proaudio, c2001.(DE, 25 de abril, 2003: http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/ref_fletcher.htm).
- [URL 13] Wilful Electronics. Todo sobre Acústica, Argentina, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/biblio/niveles.htm>).
- [URL 14] Martínez Martínez, Evelio. Telecomunicaciones, Universidad Autonoma de Baja California, Ensenada B. C., c2002.(DE, 25 de abril, 2003: <http://www.eveliux.com/fundatel/interfaz.html>).
- [URL 15] Tripod. Normas de interconexión en serie, Tripod, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: <http://isc.tripod.com.mx/ndis.htm>).
- [URL 16] Electrónica Steren S.A de C.V. Catálogo 2002, México, c2003.(DE, 10 de junio, 2003: <http://www.steren.com.mx/sterenoticias/PDF/22-39.pdf>).
- [URL 17] Características del sonido, c2000.(DE, 25 de abril, 2003: http://www3.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/sonido/caracteristicas_del_sonido.html

- [URL 18] Doncel, Diego. Sonido Acústica, Segovia España, c2001.(DE, 25 de abril, 2003: <http://olmo.pntic.mec.es/~jmarti50/doncel/acustica.htm>).
- [URL 19] Sinplagas.Eradicadores Ultrasónicos de Pestes, Sinplagas, Argentina, c2003. (DE, 10 de junio, 2003: http://www.sinplagas.com.ar/informacion_tecnica.htm).
- [URL 20] RadioShack Corporation, Sound Level Meter 330-2055 Specification, USA, c2003.(DE, 10 de junio, 2003: <http://www.radioshack.com/searchdocs.asp?Find=33-2055&SRC=2&sformtype=support>).

ANEXOS

ANEXO A. Manual de usuario del programa de registro y consulta de eventos

Instalación y configuración

La instalación del programa de registro y consulta de eventos requiere de una PC IBM o compatible con las siguientes características:

- Procesador 486 o superior.
- 16 MB de memoria RAM como mínimo.
- 3.26 MB disponibles en disco duro.
- Sistema operativo Windows 95 o superior.
- Monitor VGA a color.

El programa consta de 35 archivos y dos carpetas llamadas RES y DEBUG contenidas en un CD, éstos deben copiarse al disco duro de la PC; una vez copiados, dentro de la carpeta DEBUG se encuentra el programa de aplicación, el cual para funcionar correctamente requiere la ejecución de los archivos mscomct2.ocx y msflxgrd.ocx desde la siguiente ruta: c:\windows\system\regsvr32.

La PC, la tarjeta de recepción de la señal de aviso y el programa de registro y consulta de eventos deben estar funcionando todo el tiempo, por ello deben instalarse de manera correcta para evitar un mal funcionamiento del subsistema, ya que no es posible registrar los eventos cuando alguno de ellos funcione incorrectamente o no funcione.

Guía de usuario

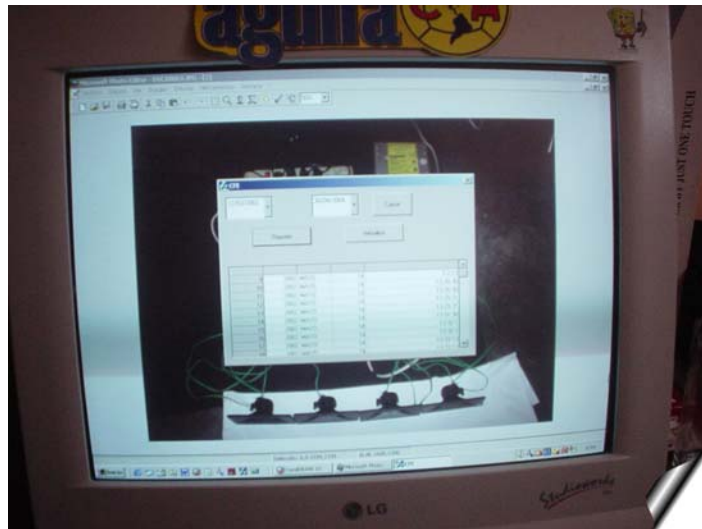
Una que se han ejecutado los archivos mscomct2.ocx y msflxgrd.ocx, el programa de consulta y registro de eventos podrá ejecutarse simplemente dando dos clicks con el ratón sobre el ícono del programa de aplicación. Al principio aparecerá en la pantalla una interfaz como la que se muestra en la figura A.1.

Al ejecutar el programa por primera vez debe configurarse el puerto serial de la PC con los mismos parámetros que el transmisor, tanto en velocidad, paridad, número de bits de datos y bits de paro.

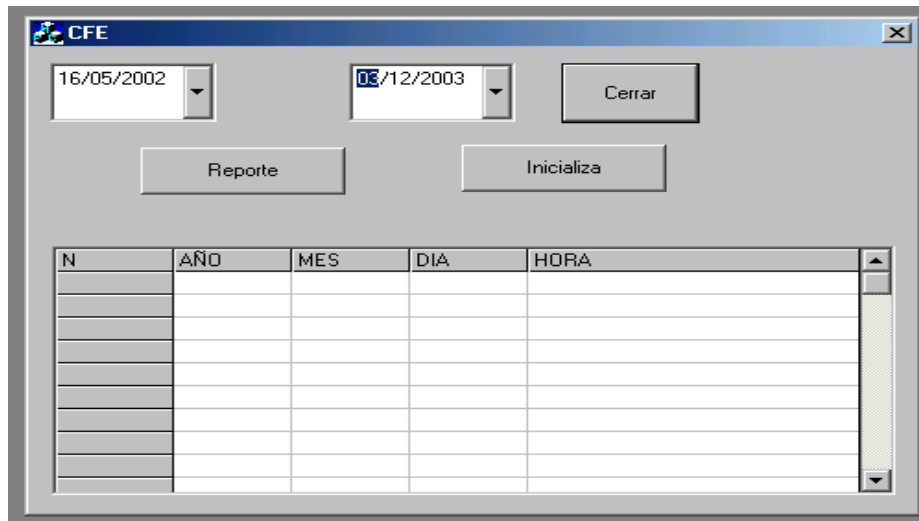
El puerto serie se configura a través del programa dando un click izquierdo con el ratón sobre el botón “Inicializa” mostrado en la figura A.1; con el teclado puede inicializarse seleccionando este botón con la tecla del tabulador y después presionando la tecla Enter. Una vez inicializado el puerto serial, la PC puede recibir cualquier señal de aviso enviada por el subsistema de control.

Cuando la PC recibe una señal de aviso por primera vez, el programa genera un archivo de tipo texto llamado eventos.txt donde se registra este primer evento incluyendo datos como el año, el mes, el día y la hora en que ocurrió dicho evento. Posteriormente, cada señal de aviso recibido por la PC se registrará en este mismo archivo como la ocurrencia de un evento.

Por cada registro de un evento, el archivo evento.txt aumentará su tamaño de memoria, pero es imposible que el archivo aumente demasiado porque al año normalmente ocurren entre



a)



b)

Figura A.1 Interfaz del programa de registro y consulta de eventos: a) Vista en pantalla; b) Vista detallada.

10 y 15 eventos¹⁴. En CFE el historial debe archivar anualmente de manera impresa, por lo tanto, al finalizar el año debe imprimirse este archivo y después eliminarlo si así se desea. En caso de eliminar el archivo, el programa creará uno nuevo cuando se reciba nuevamente una señal de aviso, donde de igual manera se registrarán los eventos posteriores del próximo año. En caso contrario, se puede seguir guardando la nueva información en el mismo archivo y tener disponible en la PC el historial de todos los eventos ocurridos.

Para realizar una consulta de eventos de un intervalo de tiempo, debe seleccionarse la fecha inicial y la fecha final para determinar la información correspondiente. La fecha inicial se selecciona en el calendario mostrado en la figura A.2 que aparece al dar un click sobre la barra de desplazamiento de la ventana izquierda que muestra la fecha.

¹⁴ Información obtenida del archivo de registro de eventos inusuales dentro de las subestaciones eléctricas de CFE de Santa María Xochitlapilco Huajuapán de León Oaxaca.

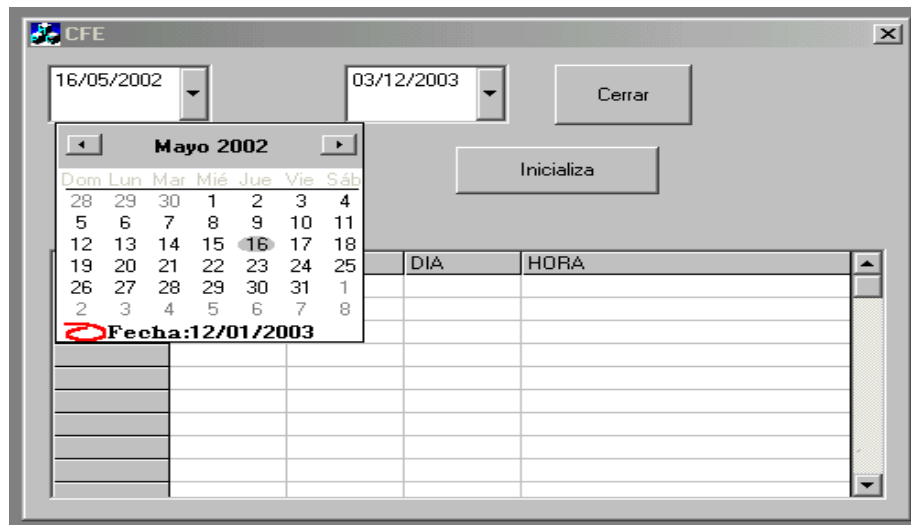


Figura A.2 Calendario de fecha inicial.

En este calendario puede seleccionarse la fecha deseada auxiliándose con los dos botones de desplazamiento indicados con las flechas rojas, estos botones permiten buscar el calendario con el mes y el año deseado desplazándose a la izquierda o a la derecha. Una vez encontrado el calendario correspondiente sólo debe darse un click en el día y la fecha se pondrá automáticamente.

Inmediatamente después debe introducirse la fecha final, ésta se selecciona en el calendario mostrado en la figura A.3 que aparece dando un click en la barra de desplazamiento de la ventana derecha.

Este calendario también contiene barras de desplazamiento, las cuales están señaladas en la figura A.3 con flechas rojas, a través de ellas se busca nuevamente el calendario con el mes y año deseados. Con sólo seleccionar el día, la fecha final se pondrá de manera inmediata.

Por último, sólo debe dar un click sobre el botón “Reporte” para observar la información correspondiente. Esta información será desplegada en una ventana como se muestra en la figura A.4. Cuando la información es demasiada puede observarla completamente auxiliándose de la barra de desplazamiento.

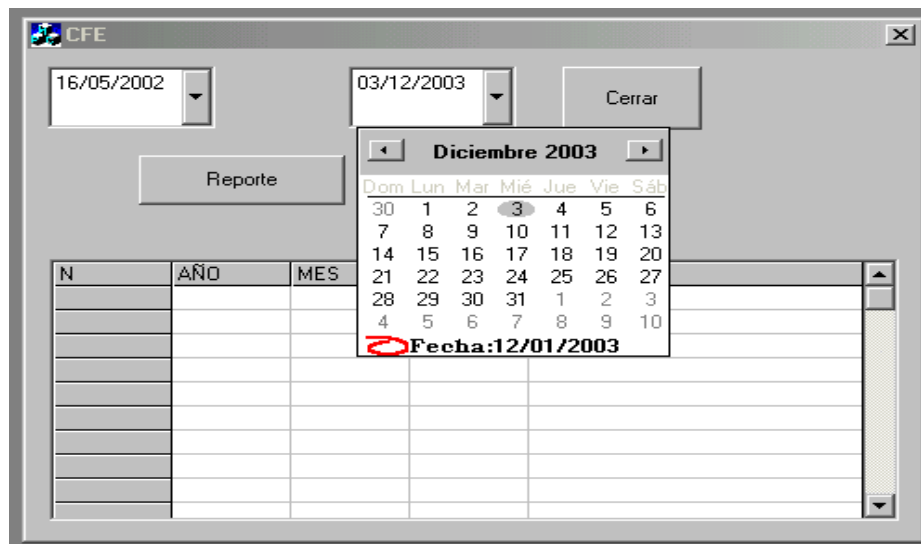


Figura A.3 Calendario de fecha final.

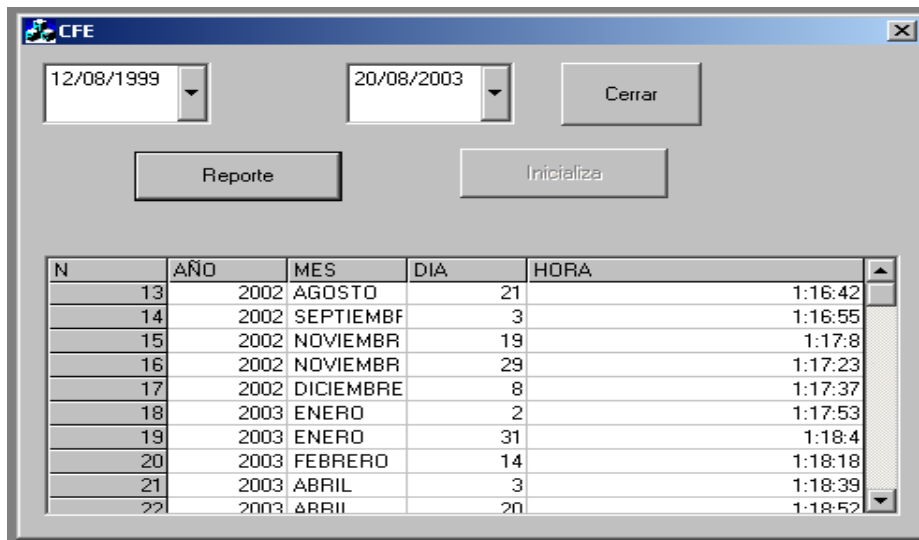


Figura A.4 Ventana de historial de eventos.

Por último, si decide abandonar esta interfaz debe dar un click izquierdo sobre el botón “cerrar”. Cabe mencionar que al cerrar el programa no se podrán registrar más eventos.

ANEXO B. Prototipo del manual de instalación del sistema de protección ultrasónico de potencia

GENERALIDADES

Definición

El sistema de protección ultrasónico de potencia, es un sistema con la capacidad de repeler distintas clases de animales a través de la emisión de ruido ultrasónico. Está integrado por cuatro subsistemas que efectúan las siguientes funciones: el control de las funciones del sistema completo, la generación de barridos complejos de frecuencias, la detección de intrusos en el área protegida, el registro de los eventos ocurridos y la consulta de dichos eventos.

Características

- Sistema de control basado en microcontrolador.
- Generación de tres barridos complejos de frecuencias ultrasónicas.
- Sistema de detección PIR/Microondas con un área de cobertura de 1000m³.
- Sistema de comunicación RS-422 diferencial entre el subsistema de control y la central con una velocidad de transmisión de 9600 baudios.
- Interfaz con el usuario constituido por un programa de registro y consulta de eventos.

Conexiones

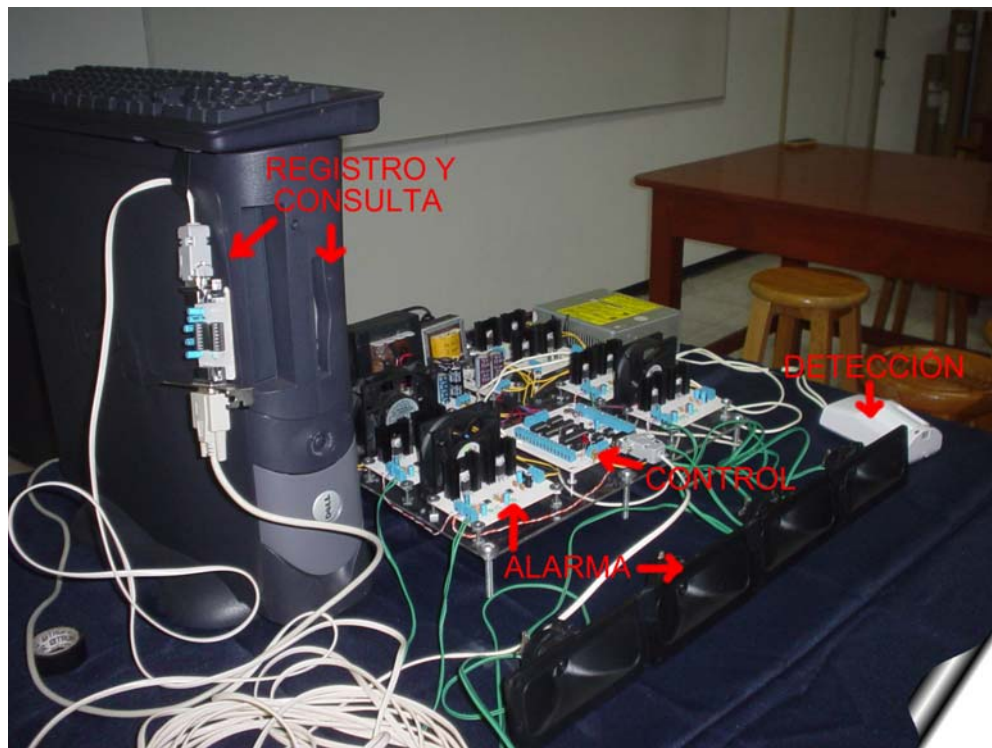
En este sistema de protección existen básicamente cuatro módulos: el subsistema de control, el subsistema de alarma, el subsistema de detección y el subsistema de registro y consulta de eventos.

La interconexión de los sensores del subsistema de detección a los conectores de la tarjeta del subsistema de control se realiza con conexiones en paralelo utilizando alambre trenzado para eliminar las interferencias por ruido eléctrico. Como los relevadores de los sensores son normalmente cerrados, cuando ocurre una anomalía en el área protegida se abren los contactos y el subsistema de control actúa en consecuencia.

La interconexión del subsistema de alarma al subsistema de control puede llevarse a cabo de varias formas. La forma más sencilla se realiza con alambre trenzado, pero requiere que los alambres estén asegurados contra todos los posibles daños que puedan afectarles en el exterior mediante tubos de acero o colocándolos de tal forma que se protejan de la lluvia y del sol. Una forma más segura de conexión es incorporar en el mismo tubo de acero un bucle cerrado, es decir, dos alambres conectados de tal manera que puedan determinarse fallas en las conexiones y por consecuencia detectar cuándo el subsistema de alarma no está funcionando.

La interconexión entre el subsistema de control y la PC puede llevarse a cabo mediante alambre telefónico o par trenzado. Los alambres deben ser protegidos con tubo de acero para brindar mayor seguridad a la transmisión.

En la figura B.1 se ilustra la interconexión de los módulos del sistema.



a)



b)

Figura B.1 Interconexión de los módulos del sistema: a) Conexiones; b) Sistema completo.

Instalación de los módulos

La protección que ofrece un sistema de seguridad depende de la forma en que éste se instala y de la fiabilidad de sus componentes; si estos se conectan con alambres fácilmente accesibles para los intrusos y las interconexiones se realizan con empalmes de alambres descubiertos, el nivel de seguridad será bajo. Por este motivo la instalación de cada módulo del sistema ahuyentador debe realizarse utilizando gabinetes metálicos y tubos de acero.

La unidad de control debe colocarse adecuadamente dentro de un gabinete metálico con las dimensiones y características que se muestran en la figura B.2. Como se puede observar, en un gabinete con estas dimensiones puede alojarse la tarjeta del subsistema de control y las fuentes de alimentación para todo el sistema.

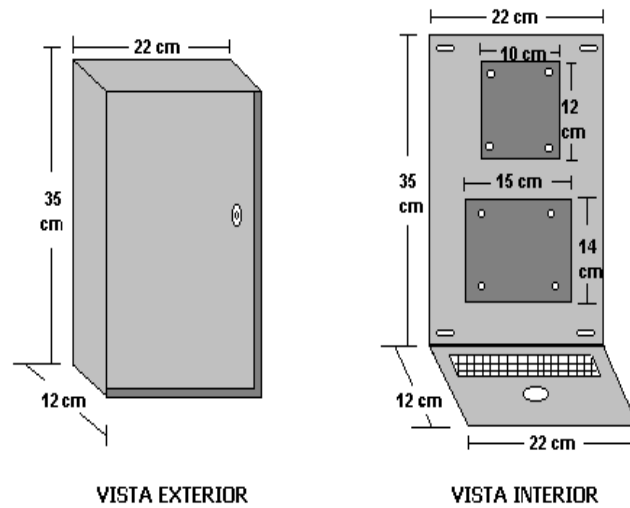


Figura B.2 Gabinete metálico de la unidad de control.

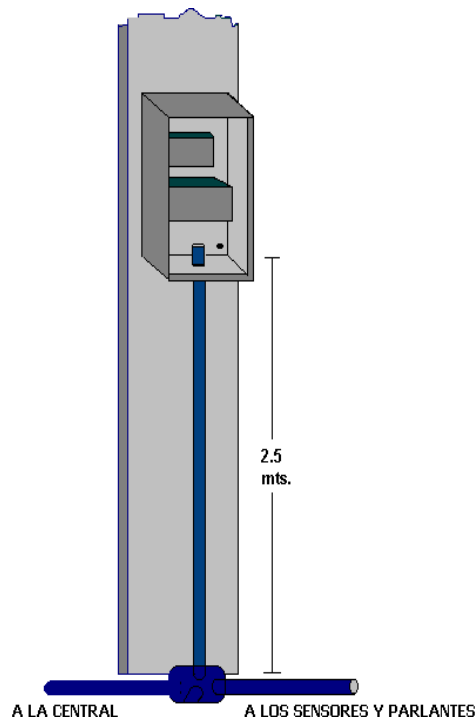


Figura B.3 Instalación del gabinete en los lingotes de acero.

En la figura B.2 se puede observar también que el gabinete posee en la parte inferior una rejilla de ventilación para que junto con el ventilador mantengan el circuito y las fuentes de alimentación a una temperatura adecuada. La instalación del gabinete del subsistema de control debe colocarse en uno de los lingotes de acero de la subestación eléctrica, alejado de los cables de alta tensión como se muestra en la figura B.3.

La instalación de los sensores debe realizarse alojando cada uno de ellos en un gabinete metálico pequeño para protegerlo de la lluvia y del sol. El gabinete debe contener una base giratoria que permita movimientos verticales y horizontales para posicionar los sensores.

En la figura B.4 se ilustra el prototipo del gabinete que debe ser usado en la instalación; estos gabinetes deben fijarse a los lingotes de acero como se ilustra en la figura B.5. Una vez instalados, deben posicionarse sobre el área a proteger. Por último, deben ajustarse en su máxima sensibilidad.

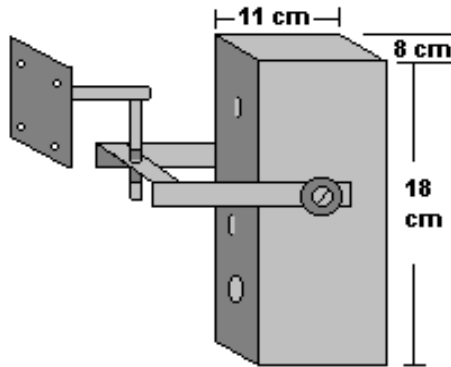


Figura B.4 Gabinete metálico con base móvil.

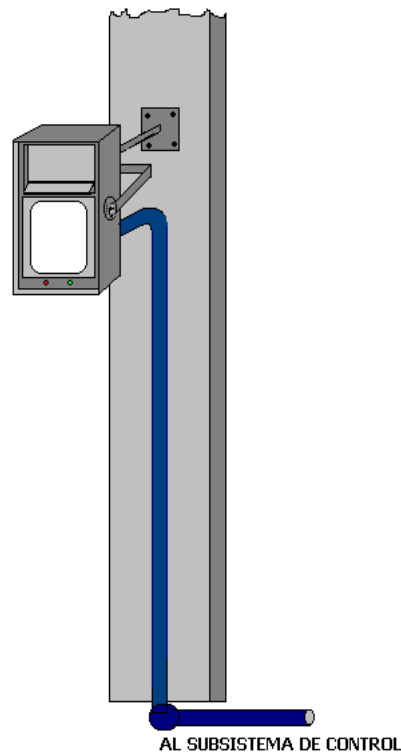


Figura B.5 Instalación de los sensores en los lingotes de acero.

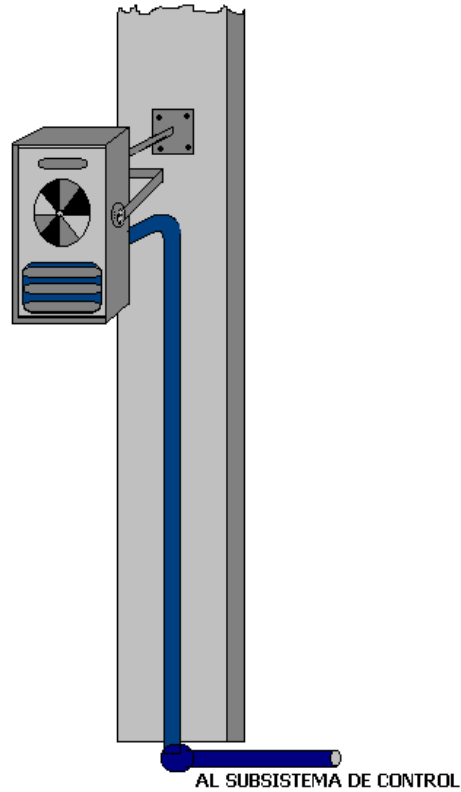


Figura B.6 Instalación de los amplificadores y bocinas en los lingotes de acero.

Los amplificadores y las bocinas también deben instalarse en gabinetes como el mostrado en la figura B.4. En la figura B.6 se ilustra la forma en que deben fijarse las bocinas sobre los lingotes de acero.

La PC del subsistema de registro y consulta de eventos debe ubicarse en un lugar completamente seguro dentro de las instalaciones de una central para garantizar una mayor seguridad. La tarjeta receptora de la señal RS-422 proveniente del subsistema de control debe instalarse correctamente dentro del gabinete de la PC. La fuente de alimentación de la PC se utiliza para alimentar el circuito receptor de la tarjeta. La instalación del programa se describe en el anexo A.

ANEXO C. Esquemáticos del sistema

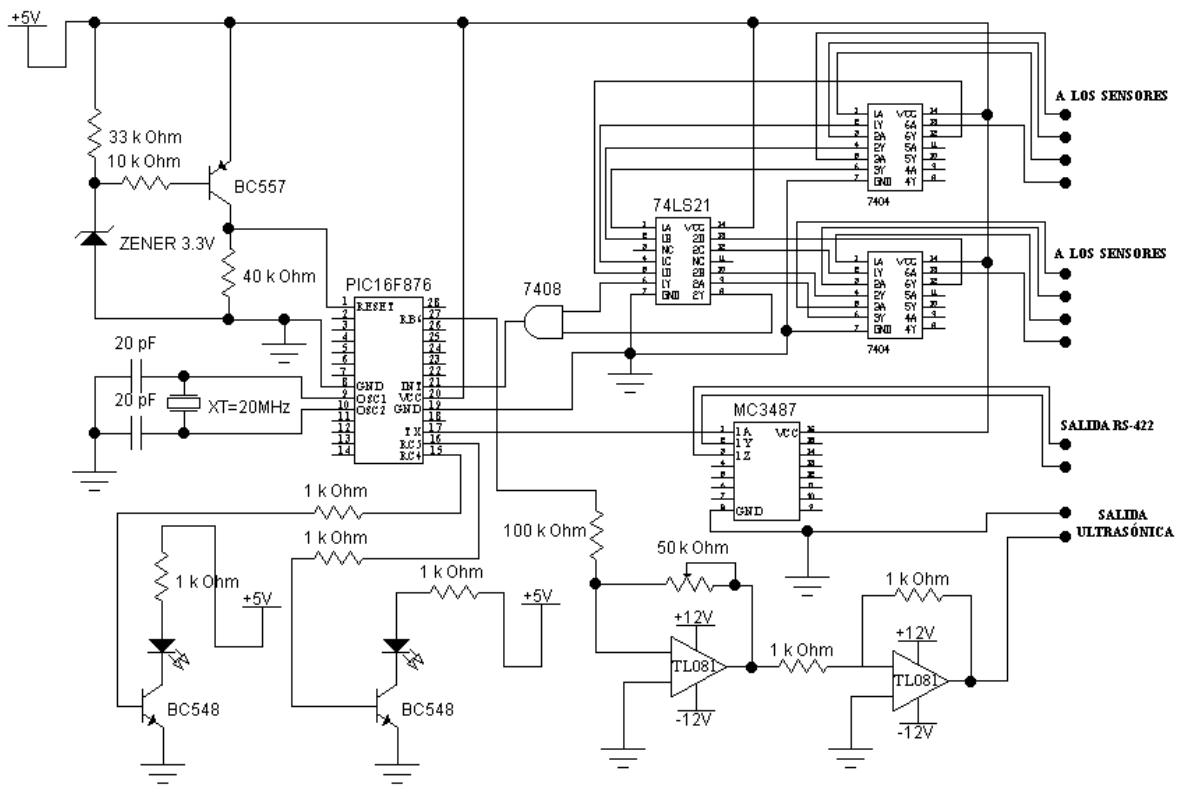


Figura C.1 Circuito del subsistema de control.

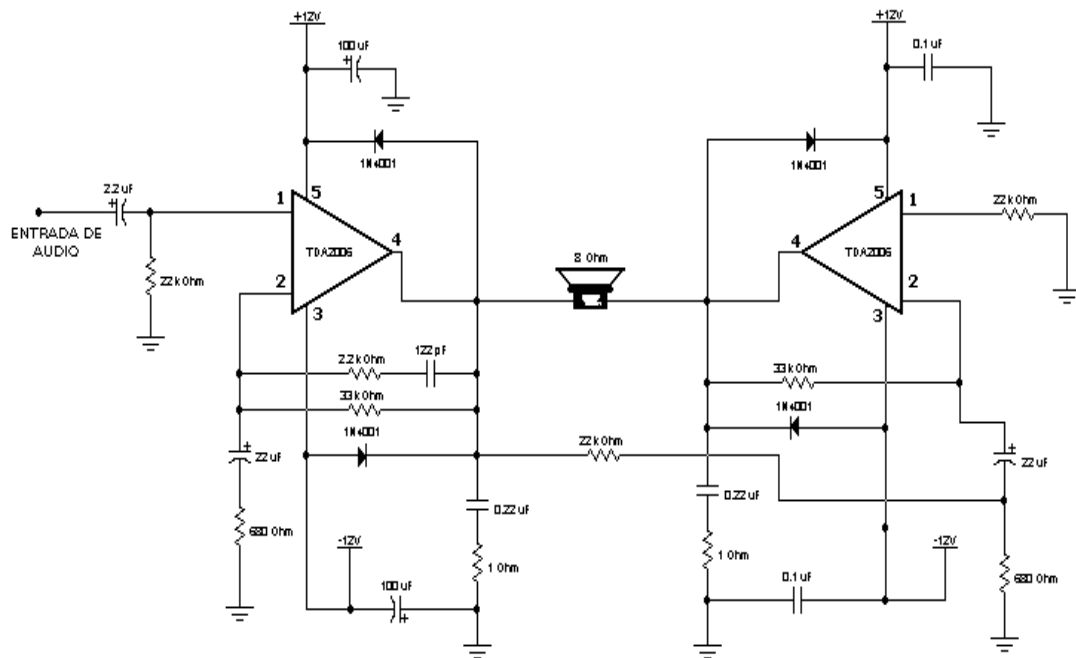


Figura C.2 Circuito amplificador con TDA2066 en modo puente.

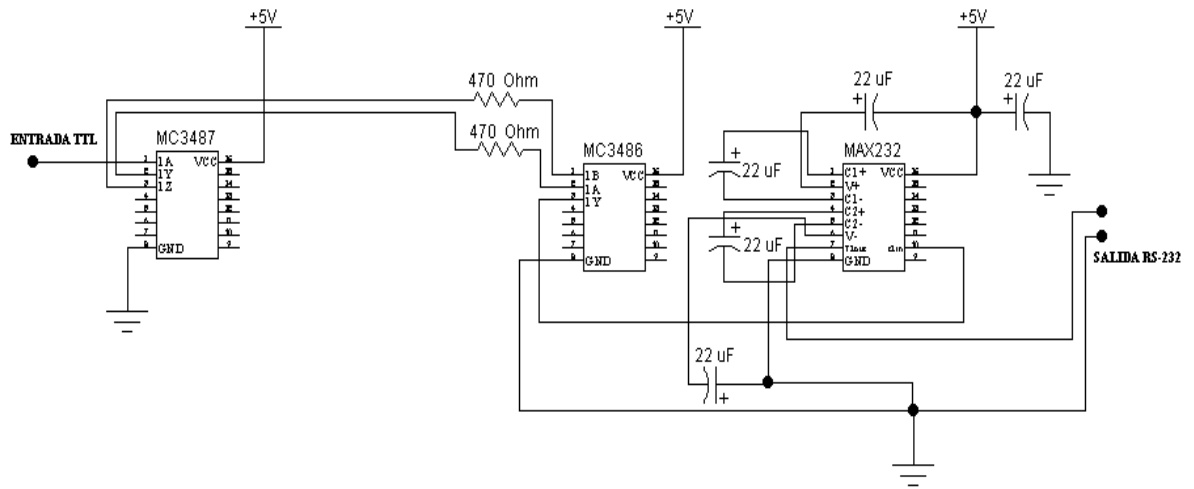


Figura C.3 Circuito transmisor-receptor RS-422 diferencial.

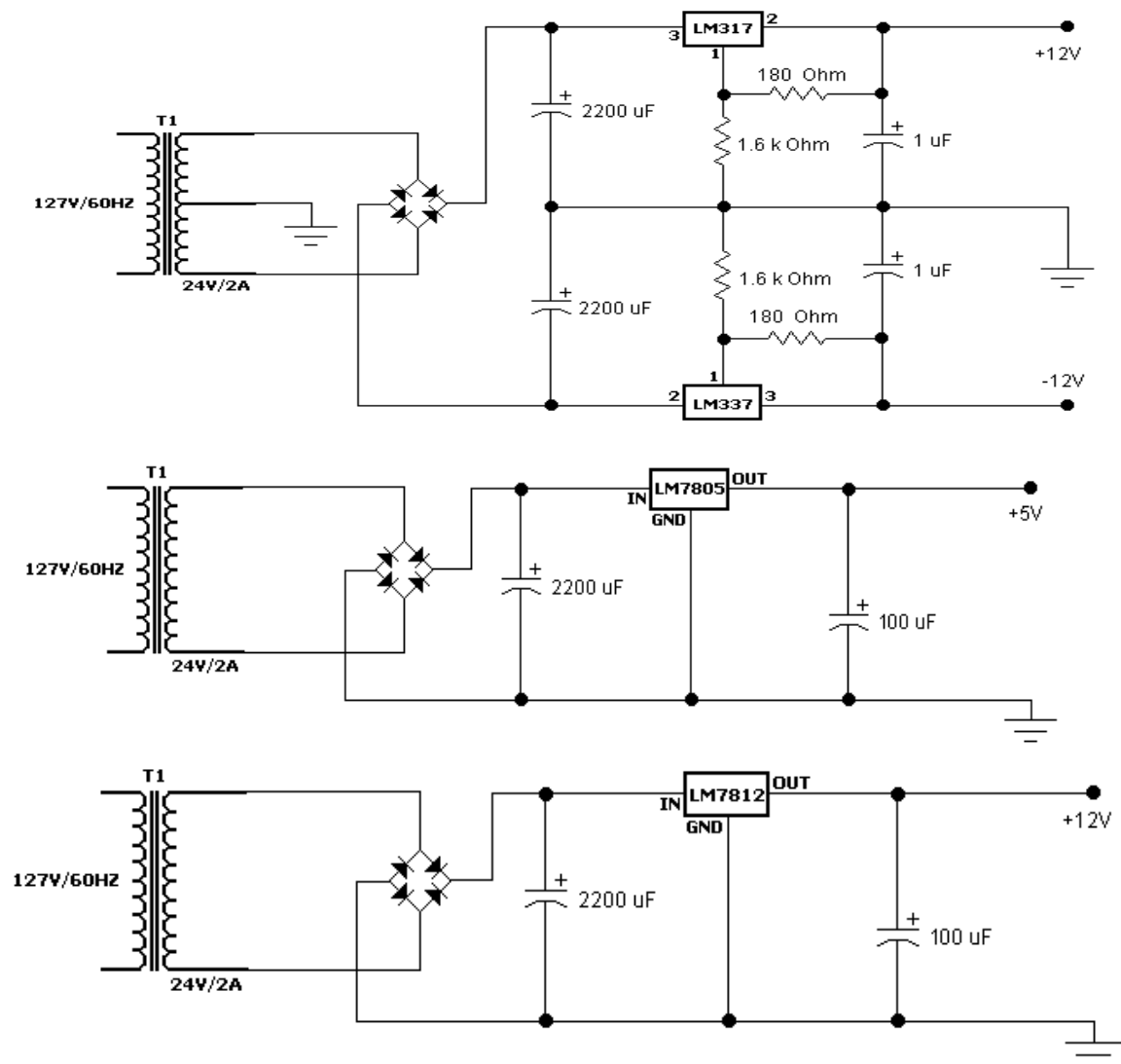


Figura C.4 Circuitos de las fuentes de alimentación del sistema.

ANEXO D. Diseño de circuitos impresos

En este anexo se ilustran los diseños de los circuitos impresos (negativos) con los que se implementaron las placas de los diferentes módulos del sistema de protección ultrasónico de potencia.

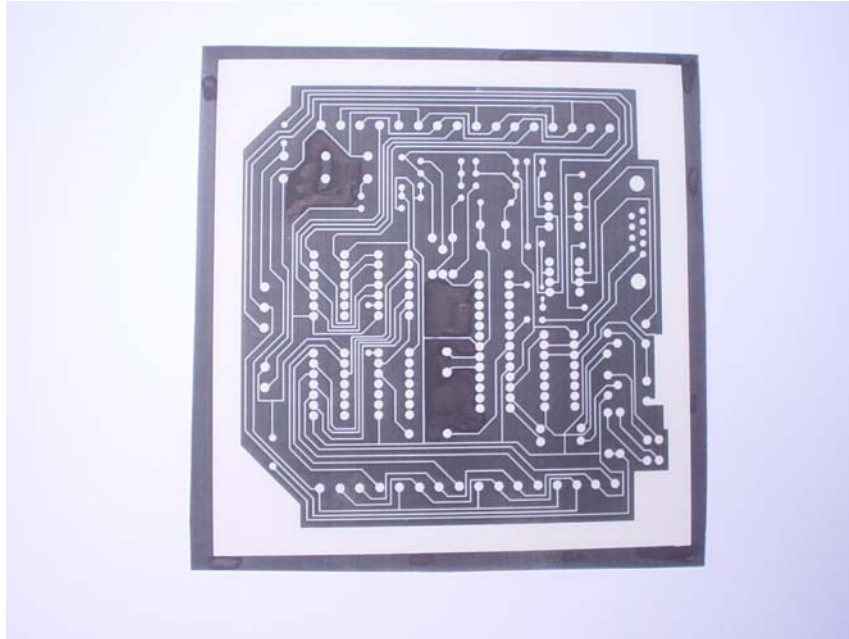


Figura D.1 Circuito impreso de la tarjeta del subsistema de control.

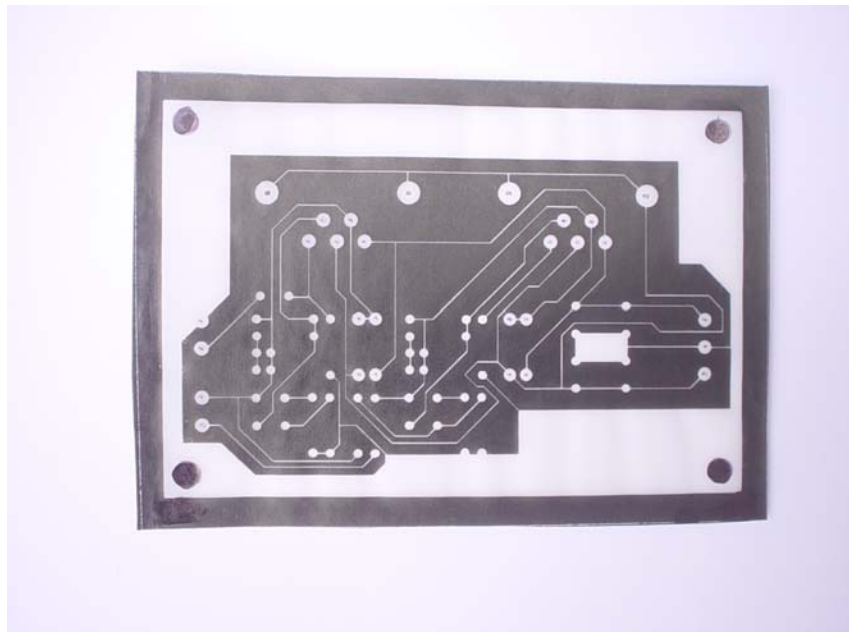


Figura D.2 Circuito impreso de los amplificadores de audio con TDA2006 en modo puente.

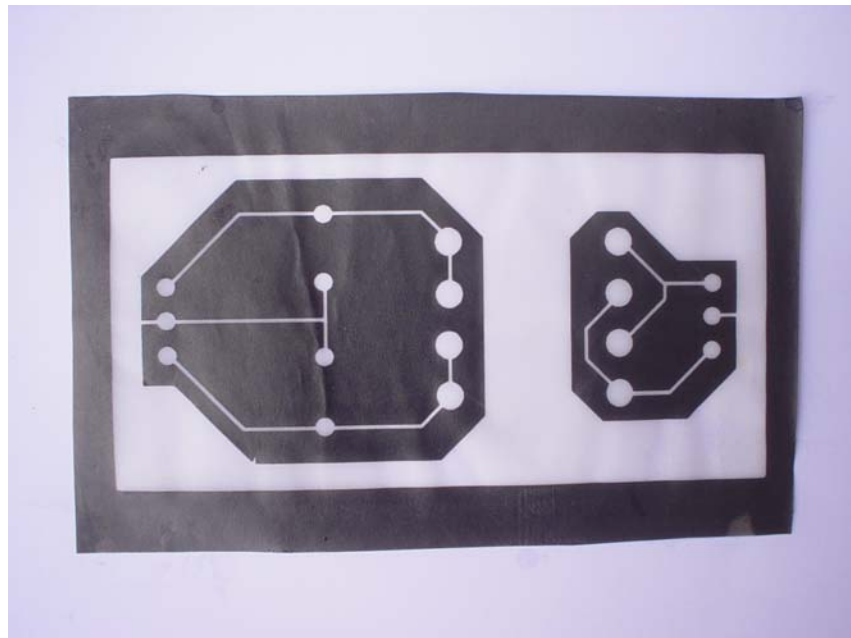


Figura D.3 Circuito impreso de los rectificadores de onda completa.

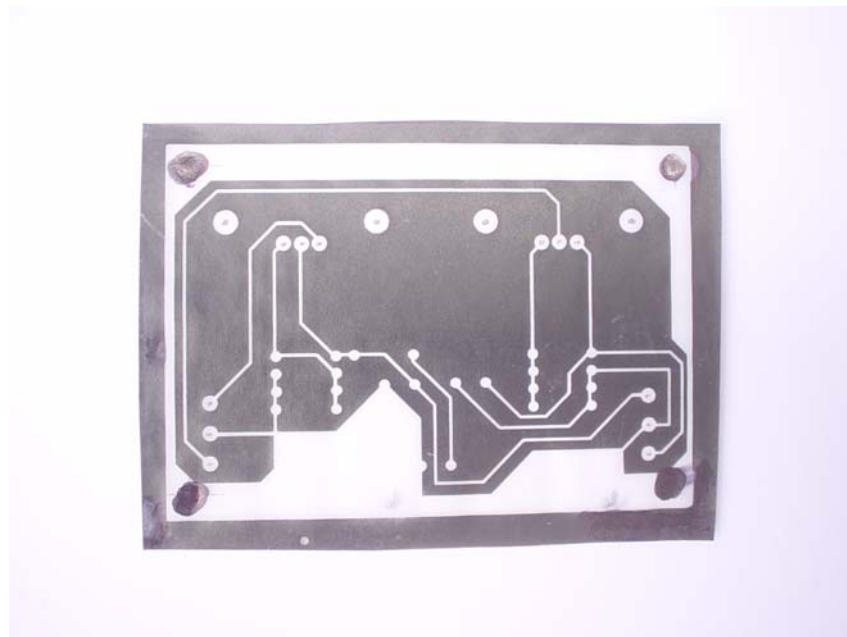


Figura D.4 Circuito impreso para las fuentes de voltaje bipolar de $\pm 12\text{V}/1.5\text{A}$.

ANEXO E. Tabla comparativa de microcontroladores

En este proyecto, las características del microcontrolador utilizado están en función del diseño del subsistema de control. Para determinar cual es el más adecuado para esta aplicación, se realizó una comparación entre distintos microcontroladores, la cual se muestra en la tabla E.1.

MICROCONTROLADORES				
FAMILIA	NOMBRE	FRECUENCIA MÁXIMA DE OPERACIÓN	MEMORIA DE PROGRAMA	COMUNICACIÓN SERIAL
Intel	MC8031	24 MHz	No	UART
Intel	MC8751	24 MHz	4 K	UART
Atmel	AT90S2313	20 MHz	2 K	UART
Atmel	AT90S8535	8 MHz	8 K	UART, SPI
Atmel	AT90S1200	16 MHz	1 K	SPI
Microchip	PIC16C84	4 MHz	1 K	No
Microchip	PIC16F84	4 MHz	1 K (Flash)	No
Microchip	PIC16F876	20 MHz	8 K (Flash)	USART, MSSP

Tabla E.1 Tabla comparativa de microcontroladores.