ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERIA

ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO PARA APLICACIONES DE ROBOTICA MOVIL E IMPLEMENTACION EN UNA PLATAFORMA MOVIL.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN ELECTRONICA Y CONTROL

JACK LUIS ARMIJOS LLERENA

DIRECTOR: ING. NELSON SOTOMAYOR

Quito, Diciembre 2.000

DECLARACION

Yo, Jack Luis Armijos Llerena, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jack Luis Armijos Llerena

CERTIFICACION

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jack Luis Armijos Llerena, bajo mi supervisión.

Ing. Nelson Sotomayor
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que me ha permitido culminar esta importante meta.

Al Ing. Nelson Sotomayor quien ha prestado una invalorable colaboración y todo su apoyo en la elaboración del presente trabajo.

Finalmente, a todas las personas que generosamente aportaron al desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres, que con su apoyo y aliento me impulsaron a culminar la instrucción superior y a finalizar este trabajo.

A mis hermanos y demás familiares, quienes siempre me ofrecieron su ayuda desinteresada e incondicional.

CONTENIDO

Resumen iv
Presentación vi
Introducción vi
Hipótesis viii
Objetivos viii
Objetivos generales viii
Objetivos específicos ix

CAPITULO 1: FUNDAMENTOS BASICOS DE SENSORES DE ULTRASONIDO

1. 1 Ultrasonido 2
1. 2 Movimiento de onda 3
1. 3 Propagación del ultrasonido en medios isotrópicos 4
1. 4 Reflexión y refracción de los ultrasonidos 7
1. 5 Generación y detección de ultrasonido 10
1. 5. 1 Generadores y detectores mecánicos 10
1. 5. 2 Transductores piezoeléctricos 12
1. 5. 3 Otros transductores 16
1. 5. 3. 1 Magnetoestrictivos 16
1. 5. 3. 2 Electromagnéticos 16
1. 5. 3. 3 Electrostáticos 16
1. 6 Formas de presentación de transductores de ultrasonido 17
1. 7 Aplicaciones de los generadores y detectores de ultrasonido 20
1. 7. 1 Sonar 20

1. 7. 2 Método del impulso – eco en la diagnosis médica 21
1. 7. 3 Medidas de espesor y detección de fallas 22
1. 7. 4 Sistemas de guía para ciegos 22
1. 7. 5 Robótica móvil 23

CAPITULO 2: ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO PARA APLICACIONES DE ROBOTICA MOVIL

2. 1 Sensores basados en la medida del tiempo de vuelo (TOF) 26
2. 2 Medida por detección de fase 27
2. 3 Sensores basados en radares de frecuencia modulada (FM) 28
2. 4 Acondicionamiento de sensores de ultrasonido aplicado a sistemas de alarma 28
2. 5 Acondicionamiento de sensores de ultrasonido para medición de nivel de líquidos 30
2. 6 Acondicionamiento de sensores de ultrasonido para aplicaciones de robótica móvil 33
2. 7 Selección del acondicionamiento 36

CAPITULO 3: IMPLEMENTACION PRACTICA

3. 1 Sensores de ultrasonido 40
3. 2 Sistemas de control 46
3. 2. 1 Control de motores 47
3. 2. 2 Sistema microprocesado 49

3. 2. 3 Watch Dog Timer 53
3. 3 Programa de control 55
3. 4 Ensamblaje de la plataforma 63

CAPITULO 4: RESULTADOS

CAPITULO 5: CONCLUSIONES

5. 1 Conclusiones, recomendaciones 74
5. 2 Trabajo a futuro 75

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

RESUMEN

En este trabajo se analizan varios acondicionamientos de sensores de ultrasonido, los cuales fueron adaptados para ser utilizados en el campo de la Robótica Móvil, de éstos, se escoge la mejor alternativa y se realiza una implementación práctica, montando este acondicionamiento en una plataforma móvil de tracción diferencial, la cual realiza tareas de navegación simple, tales como: marcha adelante, marcha atrás, movimientos de izquierda y derecha; tiene además, la capacidad de buscar caminos alternativos para su movimiento cuando se encuentren obstáculos en su trayectoria.

En el primer capítulo se hace una breve descripción de los fundamentos de operación y características principales de los sensores de ultrasonido, formas de presentación y algunas aplicaciones prácticas que tienen estos transductores.

Tres alternativas de acondicionamiento de sensores de ultrasonido que se pueden utilizar en algunas aplicaciones y la forma en que se podrían adaptar a robótica móvil, se presentan en el segundo capítulo, en el cual además se realiza la selección de la mejor alternativa para aplicaciones de robótica móvil.

Una descripción detallada del acondicionamiento seleccionado, sistemas de control, programa de control y ensamblaje de la plataforma se encuentra en el tercer capitulo.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados del presente trabajo.

En el último capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajo a futuro.

También se incluye una sección con la bibliografía que ha servido como referencia para realizar este trabajo. Finalmente se incluyen anexos que describen en detalle los circuitos impresos realizados y otras informaciones de importancia con referencia a ciertos elementos electrónicos utilizados.

PRESENTACION

INTRODUCCION

Desde el principio de los tiempos, el hombre ha deseado crear vida artificial. Se ha empeñado en crear autómatas que realicen sus tareas repetitivas, tareas pesadas ó difíciles de realizar por un ser humano. Algunos autores, como J. J. C. Smart y Jasia Reichardt, consideran que el primer autómata en toda la historia fue Adán creado por Dios.

El origen del desarrollo de la robótica, se basa en el empeño por automatizar la mayoría de las operaciones en una fábrica, esto se remonta al siglo *XVII* en la industria textil, donde se diseñaron telares que se controlaban con tarjetas perforadas. Con el nacimiento de la Revolución Industrial, muchas fábricas tuvieron éxito y gran aceptación por la automatización de procesos repetitivos en la línea de ensamblaje. La automatización consiste, principalmente, en diseñar sistemas capaces de ejecutar tareas repetitivas hechas por los hombres y capaces de controlar operaciones sin la ayuda de un operador humano.

Los robots comenzaron a aparecer en este proceso de automatización industrial junto con las computadoras en los 40's. Estos robots computarizados, están equipados con pequeños microprocesadores capaces de procesar la información que les proveen sus sensores externos y sobre esa base cambiar o mantener una operación en ejecución, a esto se le llama retroalimentación y forma parte de la Cibernética. La retroalimentación es esencial en cualquier mecanismo de control

automático, ya que ayuda a controlar los factores externos que afectarían la operación normal del sistema.

Con el surgimiento de la computación, el campo de la Robótica evolucionó, se vio que usando esta herramienta los robots podrían realizar tareas complejas, inclusive ellos podrían aprender de su entorno y de esa manera mejorar su funcionamiento.

La robótica móvil ofrece grandes posibilidades para automatizar y optimizar procesos en la industria, dada la naturaleza de los procesos involucrados en robótica móvil, muchas operaciones de manufactura se podrían ver beneficiadas por el desarrollo de esta tecnología. Por ejemplo, el trabajo en una cadena de montaje de automóviles podría ser realizado por un grupo de robots móviles, los que podrían llevar las diferentes partes hasta la línea de montaje que podría estar constituida por otros autómatas encargados de: soldar, pintar, sellar, etc. En un desarrollo a futuro de la robótica móvil se podrían tener robots móviles de propósito general que se muevan libremente en diferentes ambientes como: fabricas, hospitales, hoteles, hogares, granjas, instalaciones militares, etc., en estos ambientes pueden cumplir diferentes misiones, como por ejemplo ser unos eficientes mensajeros, los encargados de la limpieza, pueden explorar ambientes hostiles o peligrosos para los seres humanos. Para alcanzar este grado de funcionamiento y confiabilidad, se debe lograr una conexión inteligente entre la percepción (sensado y entendimiento del ambiente) y acción (control del movimiento del robot en su ambiente de trabajo).

El campo de la robótica móvil no ha tenido el desarrollo suficiente en el país, considerando que en el futuro la industria deberá automatizar sus procesos, en estos procesos se pueden incluir robots móviles que realicen trabajos tediosos y repetitivos para el ser humano, y tomando en cuenta que los sistemas de este tipo tienen costos muy elevados, se ha pensado en desarrollar sistemas similares a costos más accesibles.

En la Facultad de Ingeniería Eléctrica se realizó un primer trabajo en este campo, el cual cumple con los objetivos y alcances planteados para ese trabajo, pero la forma en que se acondicionan los sensores de ultrasonido no es la mas óptima para este tipo de aplicaciones ya que depende mucho de la amplitud de la señal recibida. Por esta razón en el presente trabajo se muestran algunas formas de acondicionamiento de este tipo de sensores y la forma de adaptarlos a aplicaciones de robótica móvil, para luego sobre esa base seleccionar la mejor alternativa e implementarla en la plataforma móvil de tracción diferencial Pionero 1 [1].

HIPOTESIS

Los sensores de ultrasonido y sus correspondientes acondicionamientos se pueden utilizar como un sentido de visión para autómatas, mediante el desarrollo de técnicas electrónicas conocidas.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos que se han planteado para este trabajo son los siguientes:

- Acondicionar sensores de Ultrasonido para ser utilizados en aplicaciones de Robótica Móvil.

- Realizar una Aplicación Práctica del acondicionamiento mencionado en una Plataforma Móvil de tracción diferencial.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Acondicionar sensores de ultrasonido para que con ellos sea posible realizar una medición indirecta de la distancia entre la plataforma móvil y los objetos que se encuentren en su trayectoria y con dicha información realizar el control de la misma.

- Colocar el acondicionamiento anteriormente mencionado en una plataforma móvil de tracción diferencial y realizar el control de la misma para que efectúe tareas de navegación simple, tales como: marcha adelante, marcha atrás, movimientos de izquierda y derecha.

- Lograr que la plataforma móvil tenga el menor consumo de energía posible utilizando elementos electrónicos de bajo consumo.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS BASICOS DE SENSORES DE ULTRASONIDO

El sonido viaja en forma de ondas acústicas que golpean el aire, haciendo que se comprima y expanda millones de veces, las ondas se expanden debido a que el medio es elástico y los sonidos que se escuchan son en su mayoría una mezcla de dichas ondas. Por encima de la frontera de 20 kHz, el sonido se transforma en ultrasonido y llega a extenderse hasta altísimas frecuencias, las ondas ultrasónicas exhiben una característica que las hace extremadamente útiles, cuando viajan por un medio, cualquiera que sea, son reflejadas si existe una discontinuidad o alguna sustancia extraña en su trayectoria, estos ecos son recogidos, analizados y la causa descubierta.

A continuación se dan los fundamentos básicos de los ultrasonidos y de los sensores que utilizan las características que ellos poseen.

1. 1 ULTRASONIDO

Los ultrasonidos son simples vibraciones mecánicas de frecuencia superior a los 20 kHz, se producen en forma natural o artificial y no son perceptibles por el oído humano, el cual percibe frecuencias entre 10 kHz y 18 kHz aproximadamente. El estudio y aplicación de estas vibraciones recibe el nombre de Ultrasónica. Las aplicaciones de ultrasonido utilizan frecuencias altas, principalmente para estar fuera del espectro audible y de esta manera no molestar a los usuarios de las mismas, aunque la variación de la atenuación con la frecuencia puede influir también en la elección de la frecuencia que se use, actualmente cualquier límite superior a las frecuencias ultrasónicas se establece más por consideraciones prácticas que teóricas.

Los primeros trabajos sobre el límite superior de audición se llevaron a cabo con generadores ultrasónicos en forma de silbatos (silbatos de Galton) que se habían

desarrollado a partir de tubos de órgano y se utilizaban para producir notas acústicas agudas.

Los ultrasonidos se detectaban en un principio por medio de llamas sensibles, las que en ausencia de sonido lograban su punto máximo de brillo, en presencia del sonido la presión del gas se reducía y el brillo de las llamas bajaba de intensidad. El desarrollo de los modernos generadores y detectores ultrasónicos y toda la tecnología actual ultrasónica, proviene básicamente del aprovechamiento de la piezoelectricidad secundada por técnicas electrónicas modernas.

La piezoelectricidad fue descubierta por los hermanos Curie en 1880. Ellos descubrieron que al someter a ciertos materiales a esfuerzos mecánicos externos se crea en su interior un campo eléctrico, apareciendo cargas de signo opuesto en superficies opuestas. Al año siguiente Lippmann predijo el efecto inverso, consistente en la aparición de deformaciones mecánicas en ciertos materiales al someterlos a la acción de un campo eléctrico externo. La primera aplicación de la piezoelectricidad y su efecto inverso en la generación y detección de ultrasonidos, consistió en la detección de submarinos durante la primera guerra mundial.

1. 2 MOVIMIENTO DE ONDA

El desplazamiento de una onda es igual a la distancia respecto de su posición de equilibrio; es decir, es función tanto de la posición de equilibrio x como del tiempo t, de modo que se puede escribir $u(x,t)$. En una onda senoidal, todas las partículas que participan en el movimiento de la onda vibran con un movimiento armónico simple alrededor de la posición de equilibrio respectiva. La amplitud de la onda a es el valor máximo del desplazamiento y la longitud de onda λ es la distancia entre dos partículas consecutivas que se encuentran vibrando en fase. La expresión que da el desplazamiento de una partícula $u(x,t)$, en función de x puede escribirse:

(1.1) $u(x,t) = a * \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$

donde λ representa la longitud de onda. El período T requerido para completar un ciclo del movimiento de una partícula recibe el nombre de período de oscilación, que se relaciona con la frecuencia mediante la siguiente fórmula:

(1.2) $f = \frac{1}{T}$

La frecuencia angular w se define como:

(1.3) $w = 2\pi f$

La ecuación (1.1), en función de la frecuencia es:

(1.4) $u(x,t) = a * \text{sen}\left(2\pi f t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) = a * \text{sen}\, 2\pi\left[ft - \frac{x}{\lambda}\right]$

La velocidad de la onda está relacionada con λ y con f ya que, durante un período del movimiento de una partícula la onda avanzará una distancia igual a la longitud de onda, es decir, la velocidad de la onda v es:

(1.5) $v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$

1. 3 PROPAGACION DEL ULTRASONIDO EN MEDIOS ISOTROPICOS

Un medio isotrópico es aquel en el cual la magnitud de la velocidad ultrasónica permanece constante para todas las direcciones posibles de propagación.

Entre los medios isotrópicos se incluyen: gases, líquidos, sólidos no cristalinos y sólidos policristalinos.

Los tres módulos de elasticidad convencionales para un material isotrópico son: El módulo de Young *E*, el módulo de volumen *K* y el módulo de cizallamiento *G*. El módulo de Young se define en función del alargamiento de hilos largos y delgados como:

(1.6) $$esfuerzo = \frac{\text{tensión de alargamiento}}{\text{área de la sección perpendicular}} = \frac{F}{A}$$

y

(1.7) $$deformación = \frac{\text{incremento de longitud}}{\text{longitud original}} = \frac{\delta L}{L}$$

de manera que

(1.8) $$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} = \frac{F/A}{\delta L/L} = \frac{FL}{A\delta L}$$

El módulo de volumen concierne a la compresión de un material sometido a una presión hidrostática *p* (uniforme), donde:

(1.9) $$esfuerzo = \text{presión} = p$$

y

(1.10) $$deformación = \frac{\text{incremento de volumen}}{\text{volumen original}} = -\frac{\delta V}{V}$$

de manera que

(1.11) $$k = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} = \frac{p}{-\delta V/V} = -\frac{pV}{\delta V}$$

Finalmente el módulo de cortadura

(1.12) $$esfuerzo = \frac{\text{fuerza de cortadura}}{\text{área}} = \frac{F}{A}$$

y

(1.13) $$deformación = \text{ángulo de cizalla} = \theta$$

de forma que

(1.14) $$G = \frac{F/A}{\theta} = \frac{F}{A\theta}$$

En la figura 1.1 se ilustran los módulos mencionados:

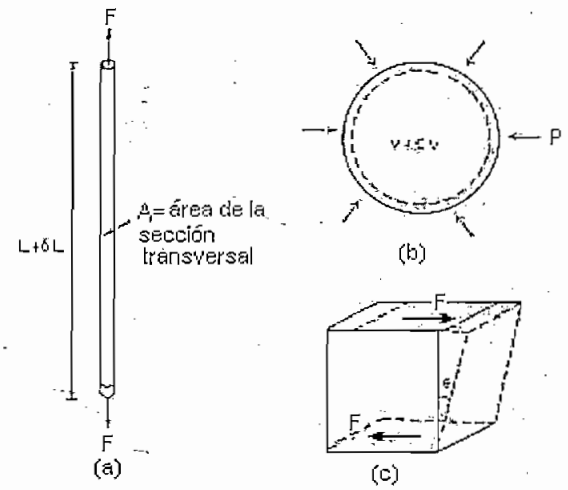


Figura 1.1: Tres módulos de elasticidad convencionales para un material isotrópico.

Se supondrá que el medio se comporta de forma lineal de manera que los módulos de elasticidad son constantes para cualquier material dado, es decir, se supone que los esfuerzos son lo suficientemente pequeños para que se cumpla la ley de Hooke, que dice: "En los cuerpos elásticos si las deformaciones son pequeñas, éstas son proporcionales a los esfuerzos que las producen", el límite de elasticidad, es aquel punto de la deformación a partir del cual deja de cumplirse la ley y depende del cuerpo de que se trate.

En un sólido estos tres módulos de elasticidad se consideran, generalmente, independientes, aunque se pueden relacionar por medio de la fórmula de Poisson, que es una generalización de la ecuación de Laplace que relaciona el potencial con la distribución espacial de cargas.

¿Cuál módulo en particular es relevante?, dependerá del sistema por el que se propagan las ondas. El módulo de Young se aplica solamente a sólidos. Si se aplica una fuerza constante a un líquido, éste fluirá de manera que elimine el consiguiente esfuerzo; en los líquidos, el parámetro relevante es la viscosidad, que se relaciona con la velocidad de desaparición del esfuerzo de cizalla. Sin embargo el esfuerzo en un fluido no desaparece instantáneamente después de la aplicación de la fuerza y, por ello, el módulo de cizalla se aplica a los líquidos de igual manera que a los sólidos. Si se aplica a un líquido o a un gas, un esfuerzo de cizalla que oscila rápidamente, se producirá el correspondiente esfuerzo de cizalla oscilante. Es posible, por tanto, la producción de ondas transversales (cizalla) ultrasónicas en un líquido o incluso en un gas, aunque tales ondas serán fuertemente atenuadas. El módulo de volumen K tiene importancia en gases líquidos y sólidos.

1. 4 REFLEXION Y REFRACCION DE LOS ULTRASONIDOS

Las leyes de la reflexión y refracción del rayo en óptica son:

Para la reflexión del rayo en una superficie plana:

1) El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano.

2) El ángulo de incidencia, *i*, es igual al ángulo de reflexión, *r*.

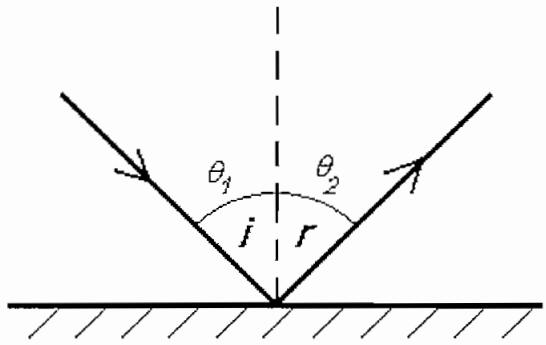


Figura 1.2: reflexión del rayo en una superficie plana.

Para la refracción en el plano de separación entre dos medios:

1) El rayo incidente, el rayo refractado y la normal se encuentran en un mismo plano.

2) Ley de Snell: $n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2$

Donde θ_1 es el ángulo de incidencia, θ_2 el ángulo de refracción y n_1, n_2 reciben los nombres de índices de refracción de los dos medios. De acuerdo con la teoría de ondas:

$n_1 = c/c_1$ y $n_2 = c/c_2$ donde c_1 y c_2 son las velocidades de la luz en los medios y c es la velocidad de la luz en el vacío. Rayo significa línea normal a los frentes de onda y así, para el sonido o ultrasonido, puede reemplazarse la palabra rayo por la frase: "dirección de propagación" o "vector de onda *k*".

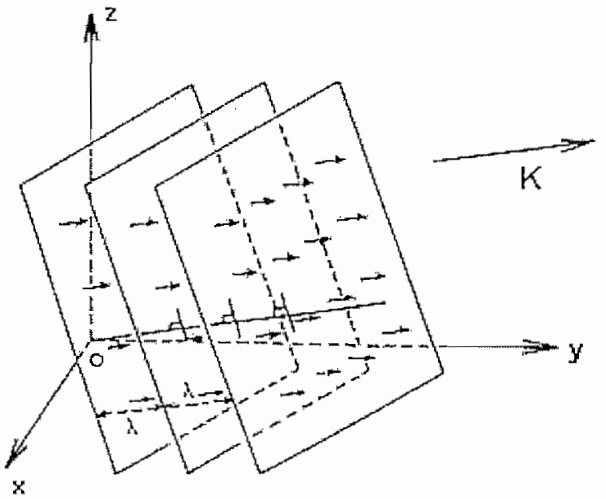


Figura 1.3: Dirección de propagación o vector de onda *k*.

La validez de las leyes de la reflexión y refracción para el sonido audible fue establecida en 1877 por Lord Rayleigh en su famoso libro "La teoría del sonido", en el cual se describen varios experimentos que indican la naturaleza ondulatoria de los ultrasonidos, utilizando generadores mecánicos (silbatos) que producen frecuencias superiores a 30 kHz y llamas sensibles como detectores.

Los numerosos experimentos que demuestran las leyes de la reflexión y refracción de los ultrasonidos y el resto de sus propiedades de onda, se actualizaron reemplazando los generadores mecánicos y los detectores de llama sensible por transductores piezoeléctricos o magnetoestrictivos y su circuitería electrónica asociada.

1. 5 GENERACION Y DETECCION DE ULTRASONIDO

En esta sección se examinarán los diferentes generadores y detectores de ultrasonido.

1. 5. 1 GENERADORES Y DETECTORES MECANICOS

Los primeros trabajos con ultrasonido fueron desarrollados en el siglo diecinueve, éstos empleaban generadores mecánicos que eran desarrollados de silbatos, sirenas o diapasones.

En 1883, por ejemplo, Galton describió el uso de un silbato utilizado para generar ultrasonido fabricado en un tubo de latón con un diámetro interno menor de una décima de pulgada y con un tapón móvil en un extremo para variar la longitud efectiva del silbato, un desarrollo de los silbatos de Galton, debido a Edelmann en 1900, se ilustra en la figura 1.4, éstos pueden generar ultrasonido de frecuencia superior a los 30 kHz.

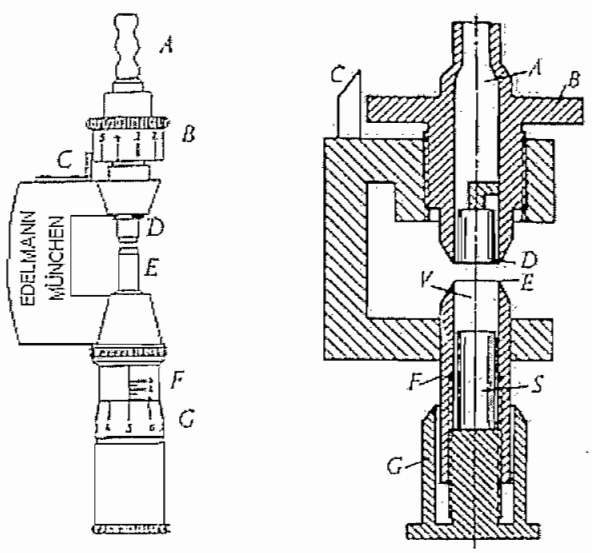


Figura 1.4: Desarrollo del silbato de Galton debido a Edelmann en 1900.

Las sirenas (figura 1.5) utilizan un chorro de aire que se interrumpe cada vez que la parte negra del disco, situada entre agujeros adyacentes, pasa en frente de la tobera, de manera que la frecuencia que se genera viene dada por:

(1.15) $V = N\,n$

donde: N es el número de agujeros del disco y;
n es el número de vueltas del disco por segundo.

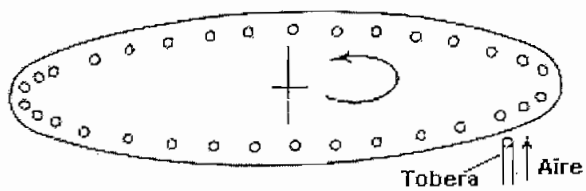


Figura 1.5: Fundamento de la sirena.

Otra forma es emplear un segundo disco estacionario en lugar de la tobera con la misma configuración de agujeros que el disco giratorio, la figura 1.6 ilustra una sirena diseñada para proporcionar una energía ultrasónica elevada, el estator y el rotor tienen 100 agujeros cada uno y el rotor puede girar a 340 revoluciones por segundo, dando una frecuencia límite superior de 34 kHz.

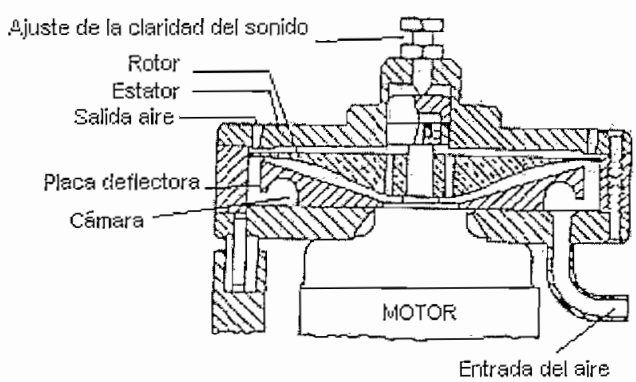


Figura 1.6: Sirena ultrasónica.

La llama sensible fue durante mucho tiempo todo lo que la ciencia ofrecía para la detección de los ultrasonidos o para reemplazar al oído como detector del sonido de frecuencia audible. Una descripción del fenómeno básico de las llamas sensibles. la proporciona Lord Rayleigh, a partir de una observación del profesor Leconte [2] que notó que la llama de un quemador corriente temblaba en respuesta a determinadas notas de un violonchelo. El uso de llamas sensibles como detectores de ultrasonido, podía dar solamente información cualitativa sobre la frecuencia o intensidad del ultrasonido, por lo que su uso es obsoleto. En el transcurso de los años se han inventado detectores mecánicos de ultrasonidos, algunos de los cuales pueden utilizarse actualmente con algún propósito específico, pero su uso no es generalizado, mayor información sobre estos últimos se puede encontrar en [2].

1. 5. 2 TRANSDUCTORES PIEZOELECTRICOS

Debido a que es imposible el desarrollo de osciladores mecánicos que funcionen a frecuencias extremadamente altas, fue necesario encontrar un medio alternativo de generación de ultrasonido. La forma más común de conseguir esto actualmente consiste en la generación de oscilaciones eléctricas de la frecuencia requerida y su posterior conversión en oscilaciones mecánicas.

El empleo de oscilaciones eléctricas, que es necesario para la generación de ultrasonido de muy alta frecuencia, es también conveniente en la práctica para la generación de ultrasonido de frecuencias menores. Igualmente es difícil la detección de ultrasonido sin tener en cuenta la medida de intensidades ultrasónicas si se intenta hacerlo mecánicamente, es por eso, que las técnicas actuales convierten las oscilaciones mecánicas, nuevamente, en oscilaciones eléctricas. Los componentes activos que interconvierten las oscilaciones eléctricas y ultrasónicas reciben el nombre de transductores. La manera más utilizada de llevar a cabo las conversiones electromecánicas para la generación y detección del ultrasonido, consiste en el empleo de la propiedad conocida como piezoelectricidad.

La piezoelectricidad es una propiedad que presentan algunos cristales no conductores de cargarse de electricidad al ser sometidos a una presión unilateral.

Si a la rodaja de un cristal eléctricamente aislante, se le comprime aplicando fuerzas en sus superficies, debido a estas fuerzas el cristal se deformará ligeramente y, si la simetría de la estructura interna del cristal cumple determinadas condiciones, pueden aparecer cargas eléctricas sobre el cristal (figura 1.7), positivas en una superficie y negativas en la opuesta, por lo que en el interior del cristal se crea un campo de potencial electrostático. Si se eliminan las fuerzas externas, las cargas desaparecen. Un cristal que muestre este fenómeno recibe el nombre de piezoeléctrico.

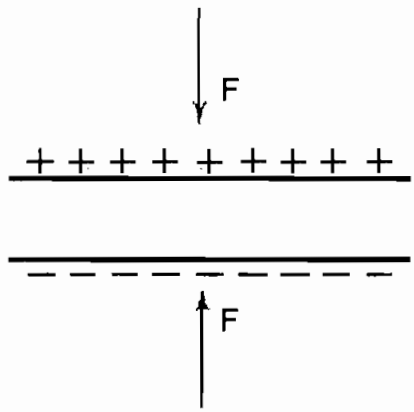


Figura 1.7: Propiedad piezoeléctrica.

La existencia de la propiedad piezoeléctrica depende de la disposición interna de los átomos en el cristal. Hay muchos cristales que, al ser sometidos a una tensión (figura 1.7), experimentan distorsiones en las que las cargas positivas y negativas tratan de disponerse a si mismas, a causa de la simetría del cristal, de manera que, no aparece ningún momento dipolar en el elemento.

El comportamiento piezoeléctrico de un material dado, depende tanto de la simetría interna del cristal, como de la orientación de la rodaja elegida del cristal con respecto a sus ejes cristalográficos, es decir, la aparición de cargas en

determinadas caras del cristal, dependiendo de la cara en la que se haya aplicado la tensión.

La importancia de los efectos piezoeléctrico y su inverso, reside en su relación con los ultrasonidos que proporcionan un medio de conversión de las oscilaciones eléctricas en oscilaciones mecánicas y viceversa, mediante el empleo de transductores piezoeléctricos. Si los electrodos se fijan a las superficies de una lámina rectangular de cuarzo "cortada según x", es decir, que sus superficies mayores sean normales en el eje x, los electrodos pueden adherirse sobre las caras del transductor, si se aplica a estos electrodos un voltaje oscilante de frecuencia *f*, se producen oscilaciones mecánicas de amplitud bastante pequeña. Estas oscilaciones tendrán componentes según las direcciones *x* e *y* pero no según la dirección *z*.

Transcurrió mucho tiempo antes de que el hombre se diera plena cuenta de que la conversión electromecánica mas eficaz, se lograba si la frecuencia de las oscilaciones eléctricas era igual a una de las frecuencias de resonancia mecánicas naturales de la muestra (fig. 1.8).

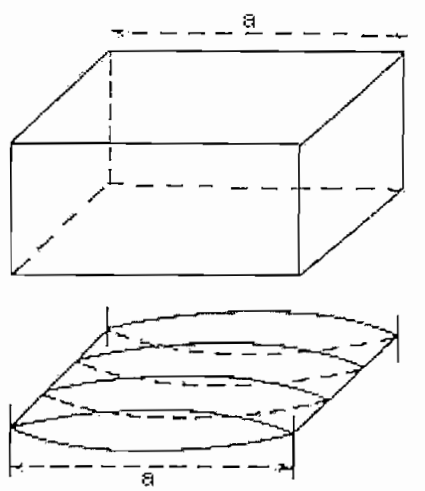


Figura 1.8: Condición de resonancia fundamental para una dimensión lineal de un bloque de cuarzo sujeto por sus extremos.

Mediante una elección adecuada de la frecuencia de trabajo y de la orientación de la lámina con relación a los ejes cristalográficos del cuarzo, es posible la generación de ondas ultrasónicas longitudinales (casi puras), es decir, que se propagan en la misma dirección que las compresiones y rarefacciones ó transversales (casi puras) con una polarización dada.

Es importante mencionar que en la utilización de un transductor piezoeléctrico, o cualquier otro transductor, como generador ultrasónico, generalmente no se emplea un generador de frecuencia variable (o generador de señales) independiente, con su salida aplicada al transductor. El transductor es, en realidad, parte del mismo circuito oscilador, siendo la frecuencia de resonancia elegida para el cristal la que estabiliza la frecuencia de las oscilaciones eléctricas. En la figura 1.9 se ilustra un circuito de esta clase empleado por Pierce en 1925 [2]. Este circuito funciona como transmisor y receptor de ultrasonido. Para trabajar con una frecuencia constante, la frecuencia de operación debe elegirse entre una de las frecuencias naturales del cristal, por debajo de 10 MHz.

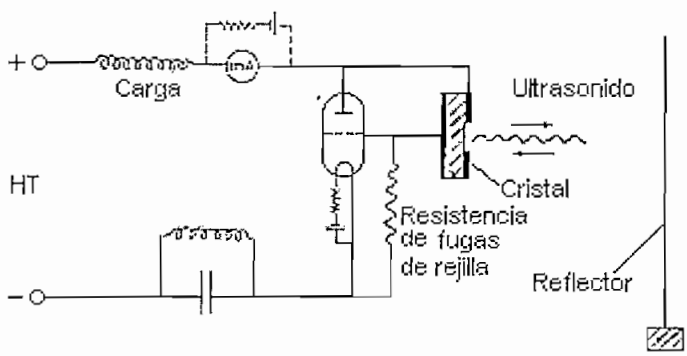


Figura 1.9: Uno de los circuitos empleados por Pierce en 1925.

Cuando este circuito funciona como receptor de ultrasonido, el voltaje desarrollado entre el par de electrodos de las superficies opuestas del transductor piezoeléctrico se amplifica y procesa en un sistema electrónico para grabar o visualizar la señal de manera conveniente.

1. 5. 3 OTROS TRANSDUCTORES

Hay otros tipos de transductores que pueden tener ventajas en ciertas aplicaciones, entre ellos se incluyen los magnetoestrictivos, electromagnéticos y electrostáticos.

1. 5. 3. 1 Magnetoestrictivos

La magnetostricción tiene lugar en los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos y, consiste en que al variar la magnetización de un material de este tipo se desarrolla la correspondiente deformación mecánica. Los transductores magnetoestrictivos se usan principalmente en generadores para aplicaciones de alta potencia para frecuencias bajas. El inverso del efecto magnetoestrictivo, es decir, la aplicación de una deformación mecánica que resulta en un cambio de magnetización de un material ferromagnético o ferrimagnético, puede utilizarse en transductores empleados como detectores.

1. 5. 3. 2 Electromagnéticos

Los transductores electromagnéticos son, en realidad, desarrollo técnico de los altavoces convencionales que se emplean en frecuencias de audio. Pueden emplearse a frecuencias ultrasónicas relativamente bajas para generar alta potencia a frecuencias muy elevadas, para realizar medidas de fricción interna [2].

1. 5. 3. 3 Electrostáticos

En este tipo de transductores una onda de vibraciones mecánicas de frecuencia *f*, incide sobre la placa de un condensador que sea capaz de oscilar, la capacidad variará según estas oscilaciones a la frecuencia *f* y estas oscilaciones pueden detectarse y amplificarse mediante un circuito electrónico adecuado. Es decir, se tendrá el principio del "micrófono de condensador".

Si entre las placas de un condensador de placas paralelas, se aplica una diferencia de potencial electrostático *Vo*, aparecen cargas positivas y negativas sobre las placas y surge una fuerza de atracción entre ellas. Si se superpone a este voltaje constante un voltaje alterno de amplitud inferior a *Vo*, la fuerza de atracción tendrá una modulación sinusoidal de frecuencia *f*. Si una de las placas está débilmente "sujeta" se moverá hacia adelante y atrás a esta frecuencia y generará oscilaciones mecánicas en el medio circundante. La fuerza entre las placas viene dada por:

(1.16) $$F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 A V^2}{2d^2}$$

donde *A* es el área de cada placa, *d* la separación entre placas y *V* la diferencia de potencial existente entre ellas, de aquí se obtiene que *F* es proporcional a la permitividad relativa ε_r del material existente entre las placas. Consecuentemente, cuanto mayor sea el valor de ε_r para una amplitud dada de las oscilaciones del voltaje aplicado, mayor será la amplitud de la onda ultrasónica generada. Un transductor electrostático puede emplearse también como detector de ultrasonido.

1. 6 FORMAS DE PRESENTACION DE TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO

Los sensores de ultrasonido pueden tener incorporado en un solo módulo, el emisor y el receptor, como es el caso de los sensores desarrollados por Polaroid [3] figura 1. 10, estos sensores tienen incluido el circuito de acondicionamiento.

Polaroid desarrolló estos módulos para el enfoque automático de sus cámaras fotográficas, funcionan determinando la distancia al objetivo y miden el tiempo transcurrido entre la transmisión de la onda ultrasónica y la detección del eco. Estos módulos han sido utilizados ampliamente en aplicaciones de robótica móvil,

lo cual se puede comprobar pues, son citados en muchas obras de carácter científico sobre este tema.

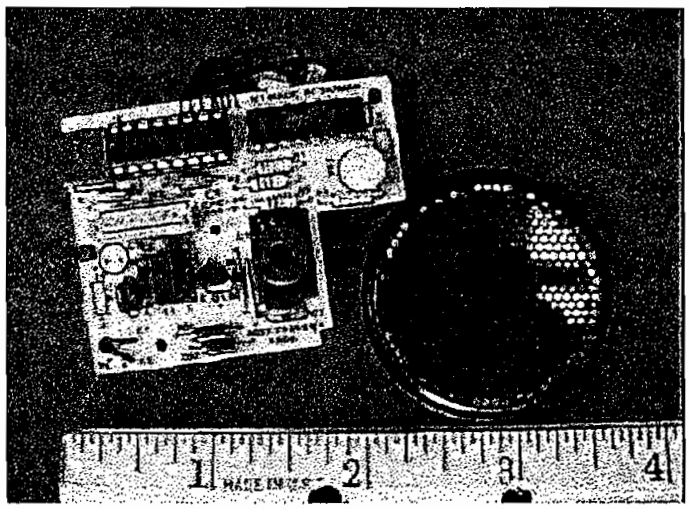


Figura 1.10: Sensores de ultrasonido desarrollados por Polaroid.

El costo de este tipo de sensores es de aproximadamente 100 dólares por dos módulos completos. Se puede ajustar la distancia a la que ocurre la detección de obstáculos y el ángulo de dispersión de la onda ultrasónica es de 30°.
En la figura 1.11 se ilustra un robot móvil que utiliza este tipo de transductores:

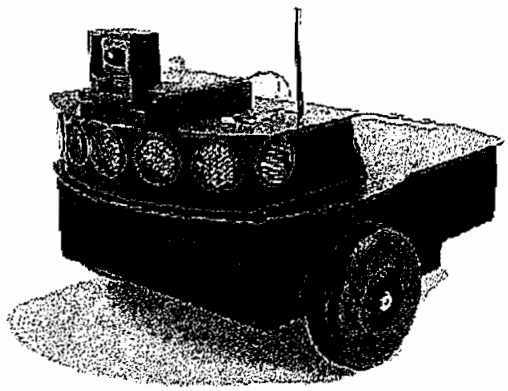


Figura 1.11: Robot móvil que utiliza sensores de ultrasonido desarrollados por Polaroid.

Otra alternativa es aquella en que se tiene el emisor y el receptor separados, y se puede acondicionar la señal y adaptarlos a la aplicación que desee. Esta opción es mas económica que la anterior y su adecuado funcionamiento depende del acondicionamiento que se realice en base a los datos característicos de los sensores (figura 1.12.).

Figura 1.12: Sensores de ultrasonido par transmisor – receptor.

Debido a su costo accesible y a que permiten realizar el acondicionamiento más conveniente a la aplicación, estos sensores han sido utilizados en la plataforma móvil Pionero 1 [1].

Las características principales de estos transductores provistas por su fabricante son:

Frecuencia:	40kHz ± 1.0kHz
Capacitancia:	2000 pf ± 20%

Transmisor:

Ancho de banda:	5.0 kHz/100dB
Nivel de presión:	112dB/40 ± 1kHz (0dB+0.0002 μbar)/10V SN/30cm/min.

Receptor:

Ancho de banda:	5.0kHz @ -75dB
Sensibilidad min.:	67dB/40 kHz ± 1.0kHz (0dB vs. 1V μbar) R = 3.9kΩ

1. 7 APLICACIONES DE LOS GENERADORES Y DETECTORES DE ULTRASONIDO

A continuación se hace un breve análisis de los principales campos en los que las técnicas de ultrasonido ofrecen excelentes resultados.

1. 7. 1 SONAR

También conocido como sistema electrónico impulso – eco, es un método muy eficaz para detectar obstáculos sumergidos en el mar, por medio del eco ultrasónico. Su principio de funcionamiento consiste en: por medio de un generador ultrasónico, se emite una señal que se propaga verticalmente hacia abajo y es reflejada por el fondo marino o el objeto que se interponga, luego regresa al receptor, de esta forma puede determinarse la distancia de ida y vuelta, registrando el tiempo que se tarda la señal en ir y regresar. Para esta aplicación, la frecuencia ultrasónica es baja, ya que es más importante el alcance que la resolución.

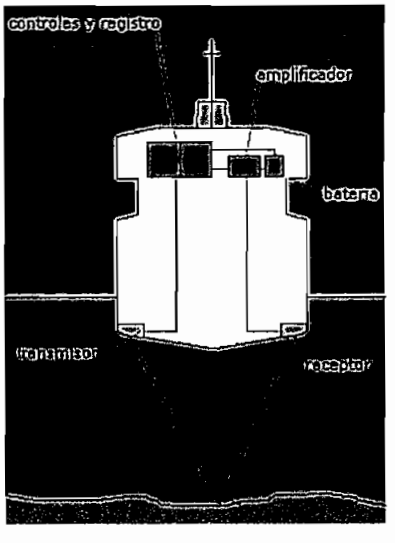


Figura 1.13: Sondeo de profundidad por impulso – eco

Los sistemas electrónicos de impulso eco pueden usarse en la búsqueda de naufragios o de bancos de peces y en las industrias de gas y petróleo situadas fuera de la orilla, para la inspección de instalaciones y monitoreo de buzos, también han sido muy utilizados para tareas como la determinación de la profundidad máxima de lagos o ríos (figura 1.13).

1. 7. 2 METODO DEL IMPULSO – ECO EN LA DIAGNOSIS MEDICA

Las diferencias entre las impedancias acústicas en los lados opuestos en muchas superficies del cuerpo humano, permiten que exista una reflexión del ultrasonido bastante importante entre ellas. El ultrasonido es útil en el examen de partes del cuerpo en las que el uso de la técnica de rayos X sería inadecuada o indeseable, como por ejemplo, en el caso de las mujeres embarazadas.

En la siguiente figura 1.14. se muestra el eco de un feto en el vientre de su madre, por medio de este tipo de exámenes se puede verificar el estado de salud del feto.

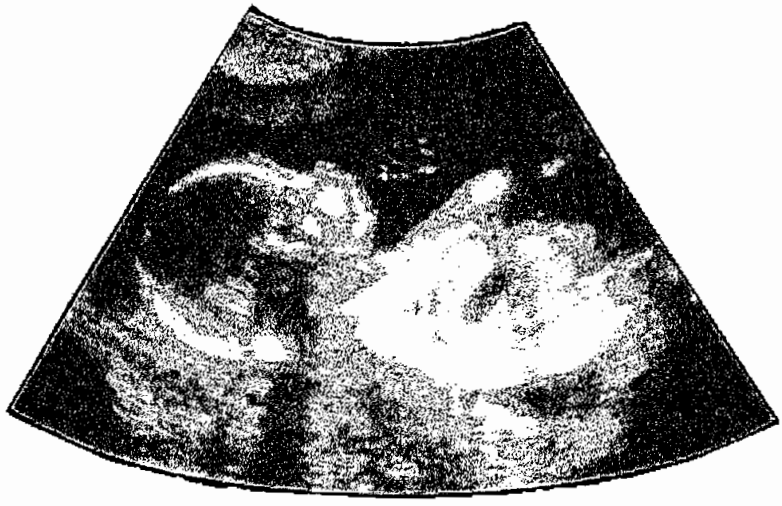


Figura 1.14: Utilización de ultrasonido en la diagnosis médica.

1. 7. 3 MEDIDAS DE ESPESOR Y DETECCION DE FALLAS

Se puede utilizar el ultrasonido para detectar burbujas de aire dentro de los metales, este tipo de fallas de fabricación no pueden ser detectadas por ningún otro método. La utilización de frecuencias elevadas es determinante, ya que con esta característica se asegura una buena resolución. Un solo transductor adecuadamente montado sobre una sonda actúa como generador y detector, luego por medio de un osciloscopio se puede observar el gráfico tanto del impulso emitido como del proveniente del fondo de la muestra, lo que determinará que el metal no tiene fallas. Otra aplicación que se refiere a superficies inaccesibles es la determinación de la capa subcutánea de grasa en la ganadería. La separación entre la grasa y el músculo refleja el ultrasonido lo que permite la medida del grosor de la grasa.

1. 7. 4 SISTEMAS DE GUIA PARA CIEGOS

Este método de ayuda para las personas ciegas, podría tener mucho éxito si se convierte la información recibida de los ecos ultrasónicos en algún tipo de señal que pueda percibirse mediante otro sentido distinto a la vista, la solución mas común es la producción de sonido audible a partir de los ecos ultrasónicos.

Un sistema de guía para ciegos, que se ha probado en niños pequeños, consiste en indicar la distancia a la que se encuentran obstáculos por medio de diferentes tonos de sonido audible, es decir, un tono bajo significa cerca y un tono alto significa lejos. También se pueden indicar otras características de los obstáculos como por ejemplo: volumen, textura, posición (izquierda, derecha); ésto se puede lograr afinando otras características del sonido audible que recibe la persona, es decir: amplitud, claridad, diferencia de tiempo en la llegada de cada señal al oído, etc. Este sistema experimental se muestra en la figura 1.15:

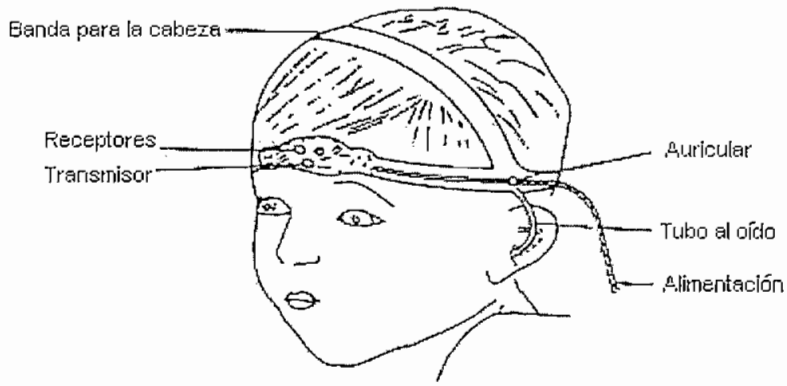


Figura 1.15: Sistema de guía para ciegos.

1. 7. 5 ROBOTICA MOVIL

Tradicionalmente se asocia a los robots con aplicaciones como: la manufactura, la exploración espacial o la oceanográfica; sin embargo, el reto actual es hacer que los robots se integren a la vida común y que realicen actividades propias de los seres humanos, como por ejemplo, robots que conduzcan autos, que ayuden a mantener limpios los hogares y oficinas, que hagan trabajos de recolección de cosechas en el campo, entre otras. Estas aplicaciones demandan que los robots tengan un alto grado de autonomía, que se puede alcanzar cuando éstos cuenten con sistemas que les permitan obtener información del medio en el que se encuentran.

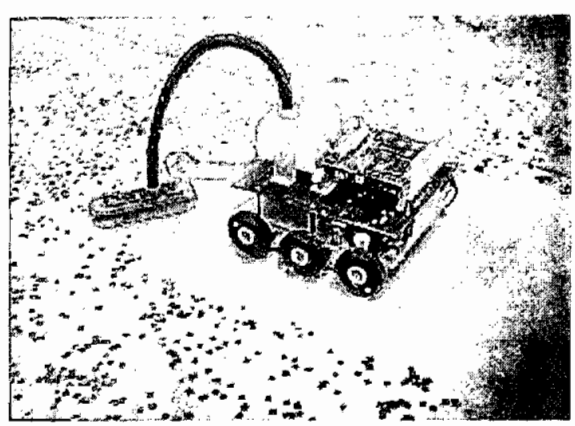


Figura 1.16: Robot móvil que realiza tareas comunes.

La utilización de los sistemas de ultrasonido en el campo de la robótica móvil, ha tenido una gran aceptación en los últimos tiempos. Por medio de sensores de ultrasonido, se puede emprender en tareas de navegación, ya que los sensores, estarían proporcionando al robot el "sentido de la vista" por medio del cual podría desplazarse esquivando obstáculos y cumplir con las tareas encomendadas.

Los sensores de ultrasonido emiten una señal que rebota con los obstáculos cercanos al robot y le indican que debe realizar una acción evasiva para evitar la colisión. Los sensores deberían ser montados alrededor del robot, en todas las posiciones periféricas, con el objeto de no dejar puntos que puedan ser susceptibles a una colisión.

En el siguiente capítulo se analizarán algunas de las formas de acondicionar los sensores de ultrasonido para aplicaciones de robótica móvil.

CAPITULO 2

ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO PARA APLICACIONES DE ROBOTICA MOVIL

Para las aplicaciones de mapeo y medición de distancias en robótica móvil, se pueden utilizar básicamente los siguientes métodos:

- Sensores basados en la medida del tiempo de vuelo (TOF).
- Medida por detección de fase.
- Sensores basados en radares de frecuencia modulada (FM).

2. 1 SENSORES BASADOS EN LA MEDIDA DEL TIEMPO DE VUELO (TOF)

Los métodos de tiempo de vuelo son los mas económicos y fáciles de implementar. Utilizando la física elemental se puede determinar la distancia, multiplicando la velocidad de la onda por el tiempo requerido para que se realice el viaje "redondo" (ida y regreso). La medida de tiempo obtenida representa dos veces la distancia de separación entre el sistema de ultrasonido y el obstáculo, por lo que se debe reducir a la mitad el resultado que representa doble distancia al objetivo.

En muchos casos se tiene el sistema de emisor y receptor coaxialmente cercanos, por lo que se debe tener en cuenta la posibilidad de enfrentar problemas que pueden dar resultados erróneos. Las fuentes de errores más probables que se enfrentan en este método son:

- Variaciones en la velocidad de propagación, especialmente en el caso de sistemas acústicos.

- Incertidumbres en la detección del tiempo exacto de llegada del pulso reflejado.

- Interacción de la onda incidente con la superficie objetivo, lo que puede causar que la onda no rebote correctamente (sea absorbida por la superficie) o cambie su dirección y no sea detectada por los receptores.

2. 2 MEDIDA POR DETECCION DE FASE

El método de detección de fase requiere de una transmisión continua de onda, en contraposición con las salidas cortas de pulsos usadas en la técnica de medida del tiempo de vuelo. Un rayo láser de amplitud modulada, RF, o energía acústica se dirige hacia el objetivo, una pequeña porción de esta onda es reflejada por la superficie del objeto y regresa al detector siguiendo una trayectoria directa. La energía que retorna se compara con una referencia generada simultáneamente que ha sido tomada de la señal original, el cambio de fase existente entre la onda transmitida y la receptada se podrá detectar con certeza cuando la onda haya efectuado el viaje redondo. Para sistemas de alta frecuencia, RF o rayo láser la detección se hace comparando la referencia y la señal receptada con una frecuencia intermedia (mientras se preserve el cambio de fase relativo) para permitir que el detector funcione adecuadamente a frecuencias menores. Este proceso se ilustra en la figura 2.1.:

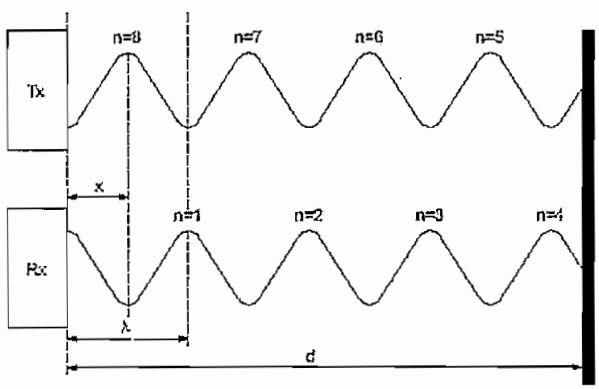


Figura 2.1: Medida por detección de fase.

2. 3 SENSORES BASADOS EN RADARES DE FRECUENCIA MODULADA (FM)

Una alternativa similar a la medida por detección de fase, es la utilización de un radar de frecuencia modulada. Esta técnica comprende la transmisión continua de una onda electromagnética modulada por una señal periódica triangular que se ajusta a la portadora de frecuencia sobre y bajo la frecuencia utilizada. El transmisor emite una señal que varia en frecuencia como una función lineal del tiempo. La señal recibida es comparada con una señal de referencia tomada directamente del transmisor. La curva de frecuencia recibida se desplazará a lo largo del eje del tiempo con respecto a la curva de frecuencia de referencia en una cantidad igual al tiempo requerido por la onda en propagarse, llegar a su objetivo y regresar. En este caso podría detectarse un desplazamiento vertical de la forma de onda recibida a lo largo del eje de la frecuencia a causa del efecto Doppler, que dice: "Cuando una fuente sonora de frecuencia *f*, o un observador o ambos están en movimiento con respecto al aire, la frecuencia recibida por el observador es diferente de *f* ". El lector interesado encontrará mayor información del tema en [3].

En el resto del capítulo, se analizarán tres alternativas para realizar el acondicionamiento de los sensores de ultrasonido y la forma de aplicarlos en el campo de la robótica móvil.

2. 4 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO APLICADO A SISTEMAS DE ALARMA

Esta forma de acondicionamiento utiliza un emisor - receptor de ultrasonido que al detectar una perturbación del medio, utiliza alta frecuencia para generar una señal codificada la cual da la indicación de alarma al usuario. Se trata de un método indirecto de medida de distancia, pues, el sistema entra en funcionamiento una vez que encuentra al objeto dentro de un determinado rango el cual puede ser ajustado

dependiendo de las necesidades. En la figura 2.2 se muestran los esquemas del emisor y receptor de ultrasonido utilizados en este acondicionamiento.

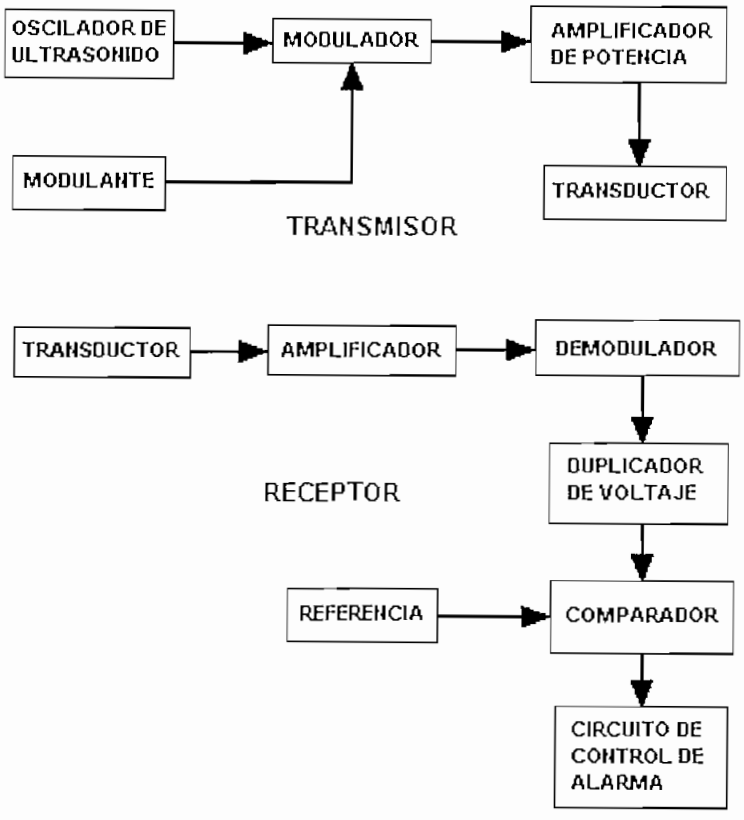


Figura 2.2: Diagrama de bloques de una alarma basada en sensores de ultrasonido.

En el transmisor ultrasónico, protege al ultrasonido modulándolo en amplitud con una señal senoidal pasándose la señal modulada a través de un amplificador de potencia que alimenta al transductor. El receptor consta de un amplificador de portadora, de un detector de modulante y, en base a ésta, se obtiene un voltaje DC proporcional a dicha señal, el cual se compara con un voltaje de referencia. Si el nivel del voltaje DC sube o baja respecto al de referencia, se acciona el transmisor

codificado. El transmisor y el receptor usan el mismo transductor, es decir, elemento que convierte la señal eléctrica en ondas ultrasónicas y viceversa.

Esta forma de acondicionamiento se la podría adaptar a un robot móvil, de tal forma que la señal de alarma del mismo, indique al robot la presencia de obstáculos en su ambiente de trabajo y con esa información evadir los obstáculos.

2. 5 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO PARA MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS

El proceso es controlado por un computador que envía un dato hacia un circuito electrónico encargado de las comunicaciones entre los sensores y el PC. El circuito electrónico genera una señal que activa al emisor ultrasónico y empieza a realizar el conteo del tiempo que se demora la señal en ir y regresar. Al llegar al receptor, se detiene el conteo de tiempo y el circuito envía el dato del tiempo registrado al PC.
El proceso de muestra en la figura 2.3.

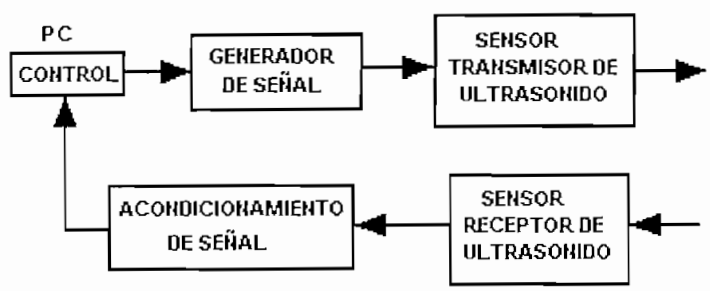


Figura 2.3: Diagrama de bloques de un acondicionamiento de sensores de ultrasonido para medición de líquidos.

El generador de la señal de ultrasonido se podría implementar en base del siguiente circuito:

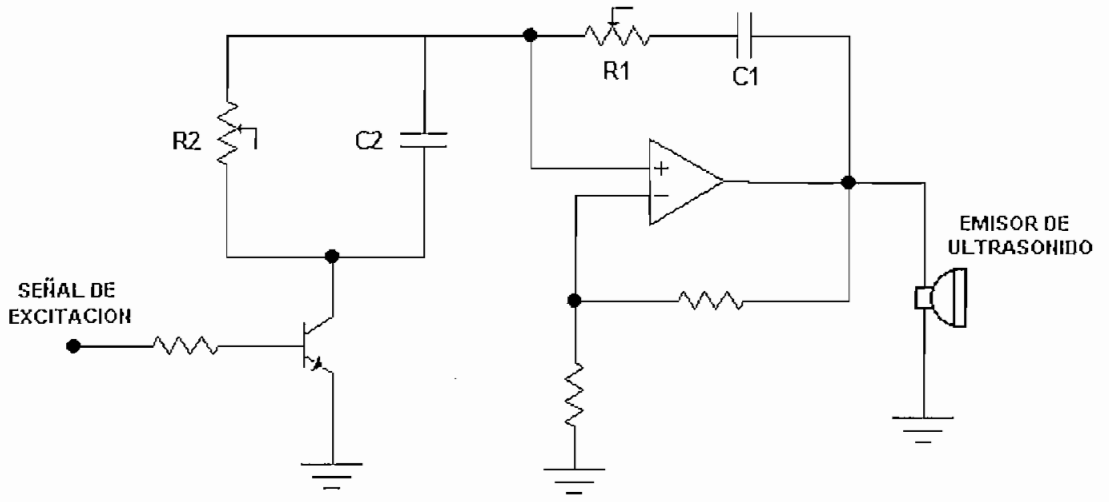


Figura 2.4: Oscilador puente de Wien.

Este circuito (oscilador puente de Wien) genera señales senoidales de una determinada frecuencia que es determinada en base a las características de los sensores.

La frecuencia a la que oscila el circuito mencionado, depende de los valores de: R1, R2, C1 y C2, y su valor esta dado por la ecuación 2.1:

(2.1) $$fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{(R_1 * R_2 * C_1 * C_2)}}$$

El receptor de ultrasonido debe recibir la señal de rebote (eco) desde la superficie del líquido. Esta señal debe ser senoidal de la misma frecuencia de la transmitida pero de una amplitud menor, por lo que será necesario su amplificación hasta un valor aceptable. Esta señal será rectificada y filtrada para compararla con un voltaje de referencia, es decir, se tienen cuatro etapas en el receptor de ultrasonido:

Acoplamiento, amplificación (en dos etapas), rectificación y comparador. El circuito se muestra en la figura 2.5.

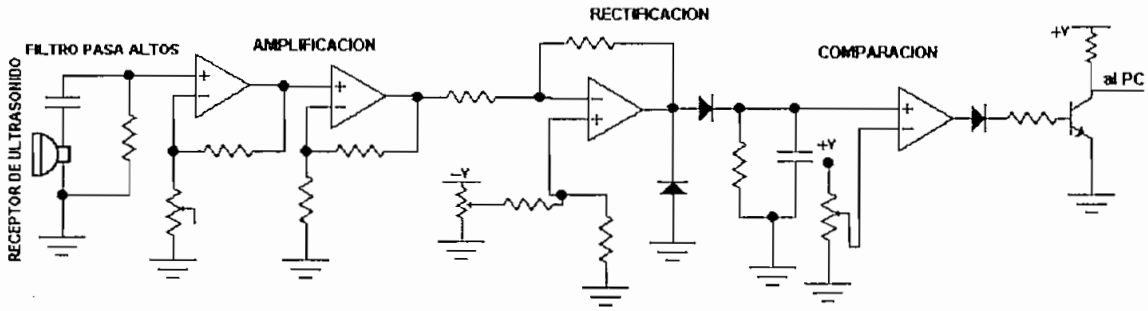


Figura 2.5: Circuito receptor de ultrasonido.

Esta alternativa se podría adaptar a un robot móvil colocando un transmisor – receptor de radio frecuencia en el PC y en el robot móvil, de tal manera que todas las señales recibidas por el acondicionamiento del robot sean transmitidas al PC y en él se realice el control respectivo ó colocar un PC sobre el robot móvil, como por ejemplo, lo realizado en el robot *Andros V* [3] desarrollado en la Universidad de Michigan, que se muestra en la siguiente figura:

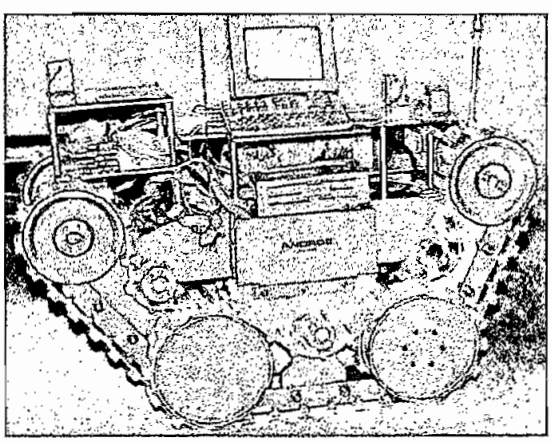


Figura 2.6: Robot Andros V.

2. 6 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO PARA APLICACIONES DE ROBOTICA MOVIL

Para describir este tipo de acondicionamiento se mencionan dos formas distintas de realizar el transmisor de ultrasonido.

En el primer caso, el generador de ultrasonido consta de un oscilador implementado como lo muestra la figura 2.7, éste consta de un cristal oscilador de una frecuencia elevada y por medio del circuito divisor de frecuencia, se obtiene la señal requerida por el emisor de ultrasonido, que en este caso es 40 kHz ± 1%.

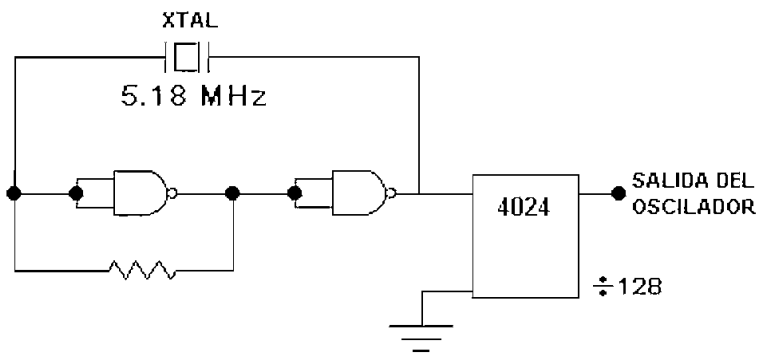


Figura 2.7: Oscilador de 40,469 kHz.

Este acondicionamiento ha sido utilizado en un trabajo anterior sobre robótica móvil, consiste de un circuito electrónico basado en microprocesador, el cual, sobre la base de la información recibida por los sensores de ultrasonido que están calibrados a una cierta potencia, con el fin de que cuando se detecte un objeto a determinada distancia, comande a los motores del robot, con el fin de evitar colisiones con los obstáculos encontrados en su entorno.

El oscilador anterior se amplifica como lo muestra la figura 2.8, con el objeto de asegurar que el voltaje del oscilador se encuentre entre 0 y 5 Voltios.

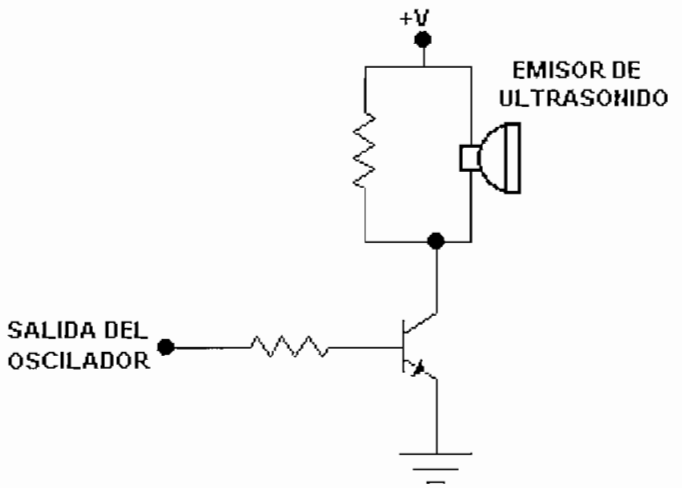


Figura 2.8: Amplificador del oscilador de 40 kHz.

El receptor de ultrasonido consta de dos etapas de amplificación, luego se acondiciona la señal recibida para hacerla compatible con la lógica TTL, para tener 1 lógico si los sensores detectan y, 0 lógico si no lo hacen, como se puede ver en la figura 2.9:

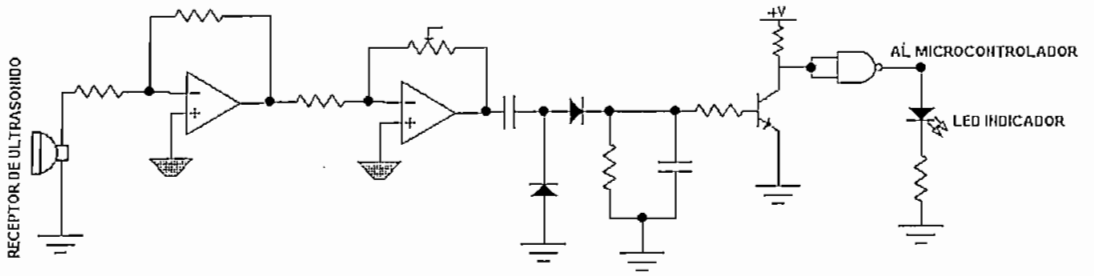


Figura 2.9: Receptor de ultrasonido.

En el segundo caso, la generación de la señal de ultrasonido puede ser realizada por medio de un microcontrolador, lo cual, presenta el beneficio de que puede generarse fácilmente una señal con la frecuencia requerida por el sistema de sensores, esto es particularmente útil cuando los transductores de ultrasonido tienen una frecuencia de operación limitada, como es el caso de los sensores utilizados en la implementación práctica del robot móvil, cuya frecuencia de operación es de 40 kHz ± 1%.

En caso de requerirlo, se puede amplificar la señal entregada por el microcontrolador para que alimente al transmisor de ultrasonido que emite la señal.

El diagrama de bloques del sistema se muestra en la figura 2.10:

Figura 2.10: Diagrama de bloques del transmisor.

El receptor sería similar a los mencionados en las opciones anteriores (ver figuras 2.5 y 2.9), su diagrama de bloques constitutivo se muestra en la figura 2.11.

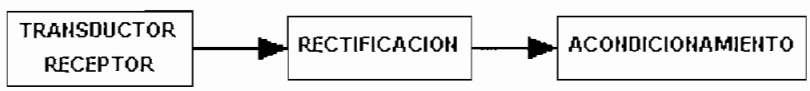


Figura 2.11: Diagrama de bloques del receptor.

2. 7 SELECCION DEL ACONDICIONAMIENTO:

Para seleccionar el acondicionamiento más adecuado para la aplicación práctica que se ha desarrollado en este trabajo se considera lo siguiente:

- La autonomía del robot móvil, por lo que será necesario utilizar la menor cantidad de componentes y, que los utilizados tengan bajo consumo de energía.

- Debido a que la plataforma móvil en la cual se implementará el sistema de acondicionamiento cuenta con sensores de ultrasonido, cuya frecuencia de operación es de 40 kHz ± 1%, será necesario que el oscilador a utilizarse sea lo más estable posible, es decir, que no sufra ninguna variación (o que su variación sea mínima) debido a perturbaciones tales como la temperatura.

- Finalmente, analizando el acondicionamiento de los sensores de ultrasonido realizado en la plataforma móvil desarrollada anteriormente [1], en el cual al realizarse la detección de obstáculos únicamente en función de la amplitud de la señal de ultrasonido recibida se tenía el problema de recalibrar los receptores cuando las baterías estaban bajas, se debe tratar que el funcionamiento no sea tan dependiente del nivel de carga de las baterías.

Por lo expuesto anteriormente, se considera que la mejor alternativa de acondicionamiento sería una adaptación de la segunda opción mencionada en el numeral 2.6, ya que tiene la menor cantidad de elementos, el oscilador es estable y se puede acondicionar al receptor de tal forma que se pueda realizar una medición indirecta de distancias entre el robot móvil y los obstáculos, haciendo de esta manera, que el receptor sea independiente de la amplitud de la onda recibida.

En el siguiente capítulo se analizará con mayor detenimiento el acondicionamiento seleccionado y los sistemas de control para la plataforma móvil Pionero 1.

CAPITULO 3

IMPLEMENTACION PRACTICA

En este capítulo se describe con más detenimiento el acondicionamiento seleccionado en el capítulo anterior, así como los diferentes sistemas de control utilizados para que la plataforma móvil de tracción diferencial Pionero 1 [1], realice tareas de navegación simple, tales como: marcha adelante, marcha atrás, movimientos a izquierda y derecha.

Las partes utilizadas disponibles en la plataforma móvil son las siguientes:

- Dos motores DC de 6V con caja de reducción.
- Dos varillas de transmisión.
- Chasis con cuatro ruedas.
- Dos baterías recargables de 6V y 7.2V respectivamente.
- Tarjeta para control de motores.
- Cuatro pares de sensores de ultrasonido (transmisor – receptor).

El trabajo desarrollado consiste básicamente, en aumentar la autonomía de la plataforma móvil, a través de dos tareas específicas:

1. Aumentar la capacidad de "visión" del prototipo, incrementando dos pares de sensores adicionales para trabajar con los pares de sensores ya existentes, un par se ha instalado en la en la parte frontal y otro, como un sensor detector de espacios vacíos en el piso.

2. Disminuir el consumo de energía del sistema, utilizando para la implementación dispositivos electrónicos de bajo consumo.

3. 1 SENSORES DE ULTRASONIDO

Se ha considerado que para lograr una mejora en la autonomía de la plataforma móvil, los sensores de ultrasonido ya disponibles deben permanecer en la ubicación original. Los pares adicionales de sensores, se han ubicado en: la parte frontal y central, proporcionando un mejor rango de ubicación de obstáculos en la dirección de marcha adelante y, el otro par, se ha colocado delante de las dos ruedas delanteras, con dirección hacia la superficie donde se mueve el robot, a una distancia de 5 cm aproximadamente, con lo cual se tiene un detector que permite evitar orificios en la superficie.

La distribución de los sensores en el robot móvil es la que se muestra en la figura 3.1.

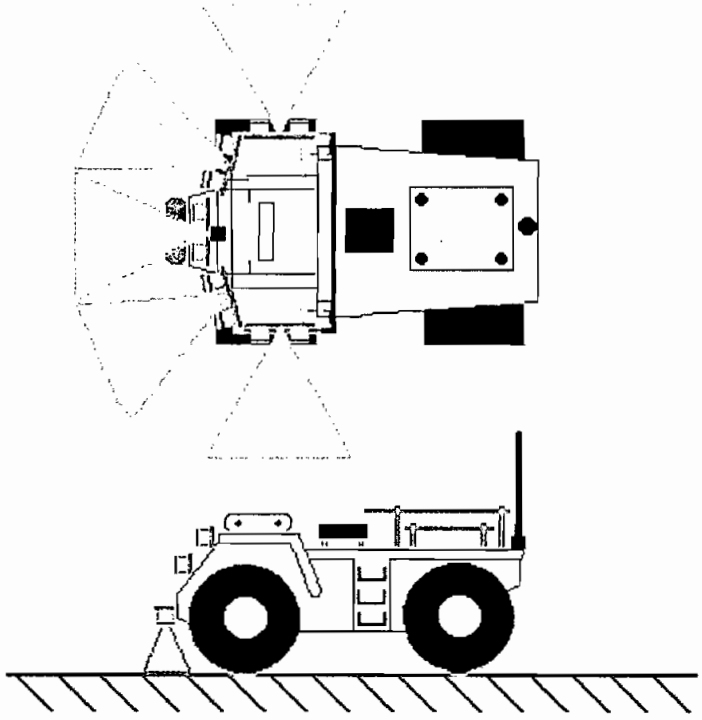


Figura 3. 1: Ubicación de los sensores de ultrasonido en la plataforma móvil Pionero 1.

Los sensores de ultrasonido utilizados, son los distribuidos por Jameco, la información técnica que se dispone acerca de estos sensores se puede encontrar en el Anexo E.

El acondicionamiento de los sensores de ultrasonido, consiste en generar la señal osciladora para los transmisores de ultrasonido y el conveniente procesamiento de las señales captadas por los receptores.

En cuanto a los transmisores, la señal requerida para su funcionamiento es de 40 kHz ±1%, ya que la señal debe tener la frecuencia mencionada, se ha determinado que la forma mas conveniente de generarla es por medio de un microcontrolador; en este caso, se ha seleccionado el microcontrolador PIC 16F877, el cual realiza la función de circuito principal de control de todo el robot móvil, de éste microcontrolador se aprovechan las dos salidas de PWM que posee de la siguiente manera: con la primera salida se genera la señal de forma continua la que alimenta el transmisor que detecta la presencia de una grada u orificios en el suelo que el robot debe evadir, con la segunda salida de PWM se alimenta a los transmisores de los sensores frontales y laterales, esta señal se la genera en forma de un tren de pulsos y un tiempo en bajo, es decir, se tiene un tiempo en el cual se generan los pulsos y un tiempo en el cual no se tiene señal. Este tiempo ha sido calibrado conociendo los datos de distancia a la cual el robot debe reaccionar, que para este caso es 20 cm, conocido el dato de que la velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 340 m/s, se puede determinar el tiempo mencionado por medio de la relación: $t = 2d / v$.

Las señales procedentes del microcontrolador necesitan amplificación, la que se realiza utilizando el siguiente circuito:

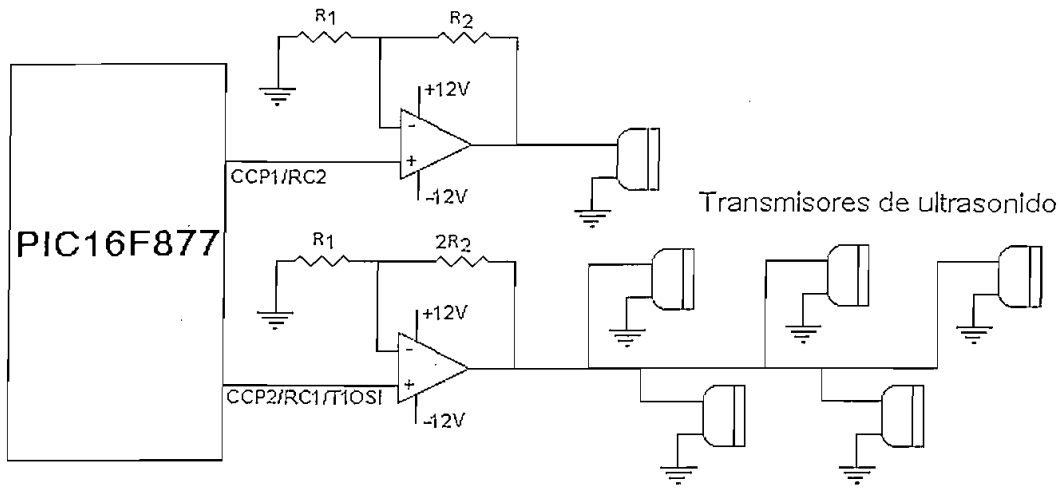


Figura 3. 2: Amplificador del oscilador de ultrasonido.

Los receptores de ultrasonido han sido diseñados de modo que ingresen un dato al microcontrolador como 0 lógico, para indicar que no existen obstáculos y 1 lógico, para indicar la presencia de obstáculos y, con esa información realizar el control de la plataforma para evitar colisiones.

Los acondicionadores de los receptores de ultrasonido, han sido desarrollados en varias etapas:

Amplificación y filtrado:

Ya que la señal obtenida en los receptores es del orden de los 10mV, se la debe amplificar con una ganancia tal que permita obtener una señal de suficiente amplitud para luego ser procesada. La señal obtenida está contaminada por ruido por lo que es necesario implementar un filtro pasa banda entre 37 y 43 kHz, ya que los sensores trabajan a 40 kHz ±1%.

La figura 3. 3 muestra el filtro pasa banda usando dos etapas, la primera es un filtro pasa altas y la segunda un filtro pasa bajas; por lo tanto, la operación combinada se convierte en la respuesta pasa banda deseada.

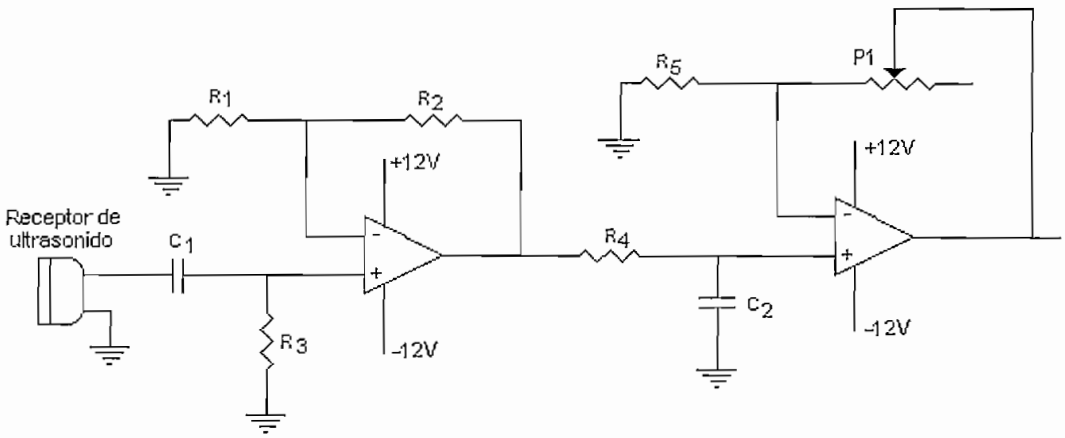


Figura 3. 3: Filtro pasa banda amplificador.

Los valores de las frecuencias de corte del circuito de filtro pasa banda son:

(3. 1) $$f_{OL} = \frac{1}{2\pi R_3 C_1}$$

(3. 2) $$f_{OH} = \frac{1}{2\pi R_4 C_2}$$

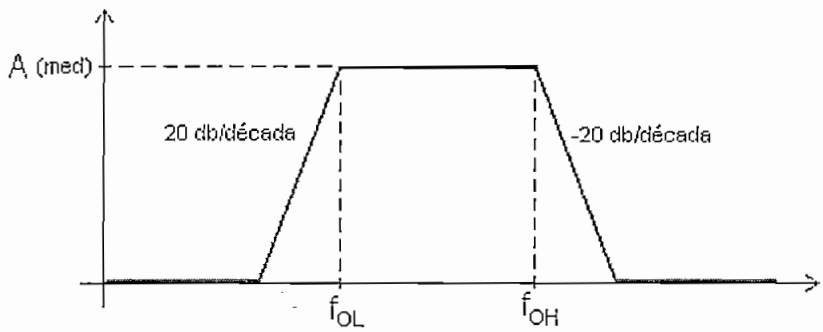


Figura 3. 4: Filtro activo pasa banda.

La ganancia de cada etapa amplificadora del circuito mencionado, está determinada por las siguientes relaciones:

(3. 3) $$A_1 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

(3. 4) $$A_2 = 1 + \frac{P_1}{R_5}$$

Doblador de tensión:

A la señal amplificada se la rectifica por medio de un circuito doblador de tensión implementado utilizando diodos rectificadores. La red RC en paralelo introduce un retardo para estabilizar la señal DC obtenida, este circuito se muestra en la figura 3. 5:

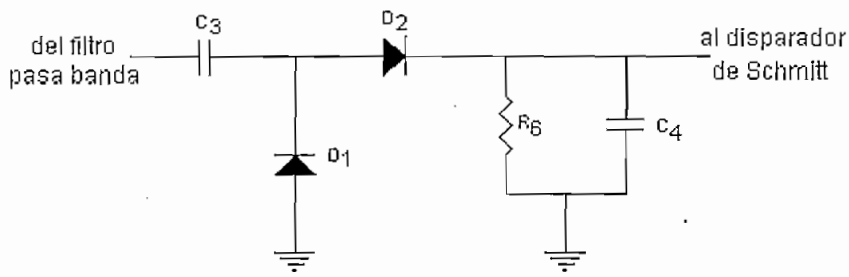


Figura 3. 5: Circuito doblador de tensión.

Disparador de Schmitt:

La señal DC obtenida en la etapa anterior, se compara con una señal de referencia dada por un diodo zener, este comparador se ha efectuado en base a un disparador de Schmitt que forma una ventana de histéresis que determinará el tiempo que la señal resultante permanecerá estable, ver figura 3.6.

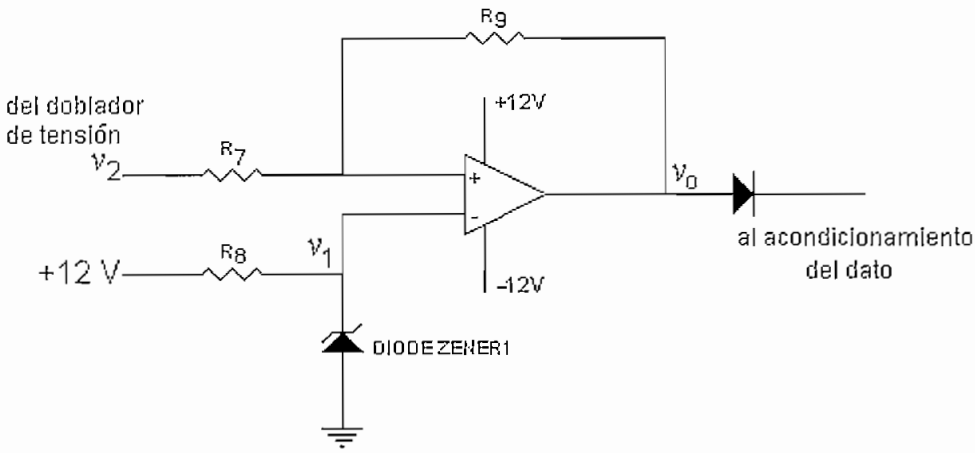


Figura 3. 6: Disparador de Schmitt con ventana de histéresis.

Para calcular los parámetros del circuito disparador se considera lo siguiente:

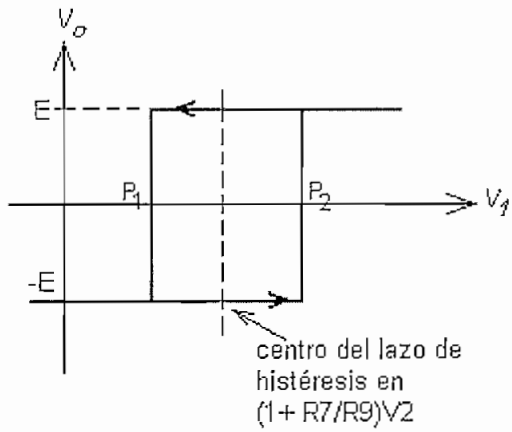


Figura 3. 7: Disparador de Schmitt.

Los puntos en que la conmutación se lleva a cabo son determinados por:

(3. 5) $$P_1 = -\frac{R_7}{R_9}E + \left(1 + \frac{R_7}{R_9}\right)V_2$$

(3. 6) $$P_2 = \frac{R_7}{R_9}E + \left(1 + \frac{R_7}{R_9}\right)V_2$$

Ganancia de corriente y acondicionamiento del dato.

Para ingresar el dato al microcontrolador se ha implementado el circuito de la siguiente figura 3.8, con el cual se consigue tener niveles lógicos TTL.

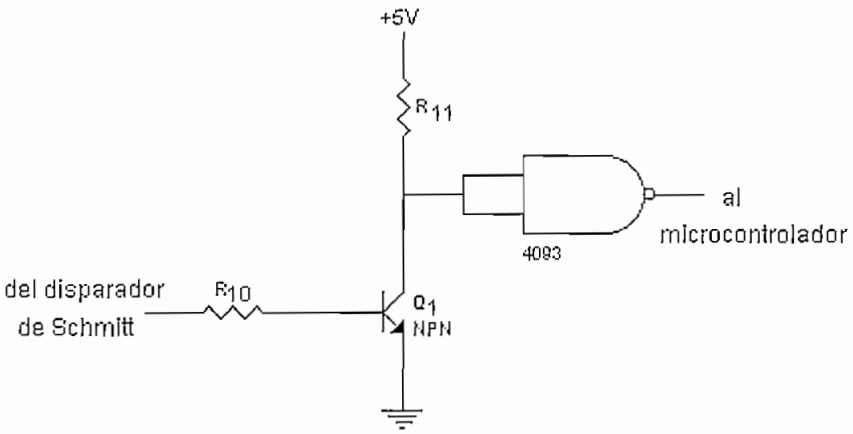


Figura 3. 8: Ganancia de corriente y acondicionamiento del dato.

3. 2 SISTEMAS DE CONTROL

En la siguiente sección se describen los sistemas de control que gobiernan el robot móvil, es decir el control de los motores y el control integral realizado por medio del microcontrolador.

3. 2. 1 CONTROL DE MOTORES

En la plataforma móvil se cuenta con una tarjeta para control de los motores con la cual se puede realizar el control de velocidad e inversión de giro de los motores de DC. Para el control de velocidad se utilizó la configuración de conversor DC / DC mostrada en la figura 3.9.

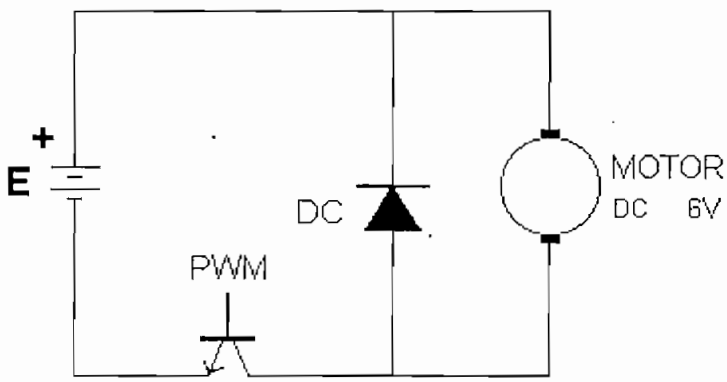


Figura 3. 9: Conversor DC / DC reductor.

Esta tarjeta es controlada por tres señales provenientes del microcontrolador, las cuales son: señal PWM, señal de control de sentido de giro del motor derecho y señal de control de sentido de giro del motor izquierdo.

Las señales de control anteriormente mencionadas salen por los pines RC0, RD0 y RD1 del microcontrolador a través del conector JP2 de la tarjeta #1, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. 1: Señales de control de inversión de giro de motores.

FUNCION	PIN
Señal PWM	RC0
Sentido de giro (motor 1)	RD0
Sentido de giro (motor 2)	RD1
Referencia (tierra)	GND

La tarjeta tiene una configuración de diodos de recuperación rápida ya que el cambio de sentido de giro del motor se realiza con circulación de corriente, con esta configuración se dá un camino alternativo a la corriente durante la conmutación. El circuito de control se muestra en la figura 3.10.

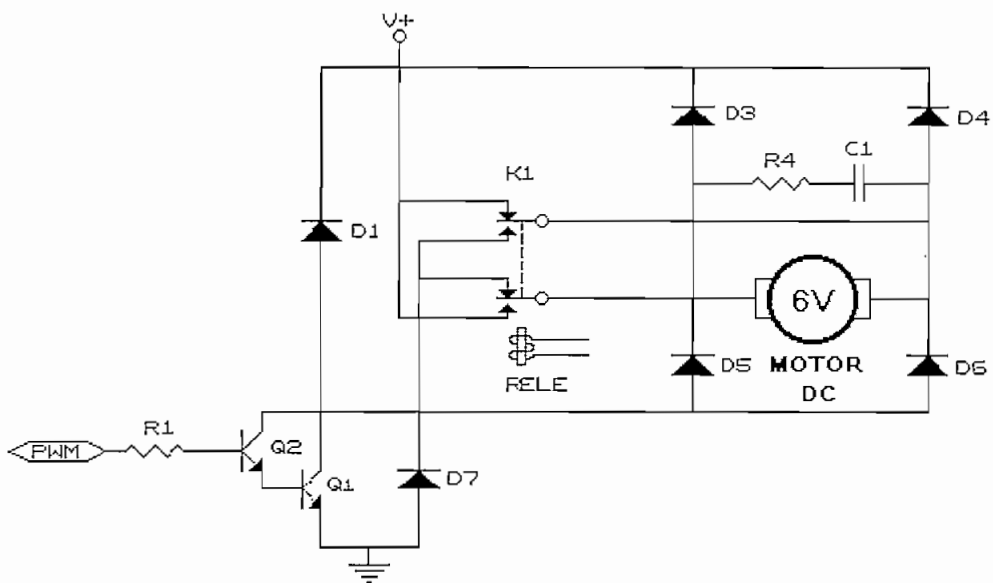


Figura 3. 10: Control de velocidad e inversión de giro de motores DC.

La bobina de los relés se excita con 24 voltios, por lo que se utilizó opto acopladores para cambiar el nivel de referencia de las bobinas como lo muestra la figura 3.11.

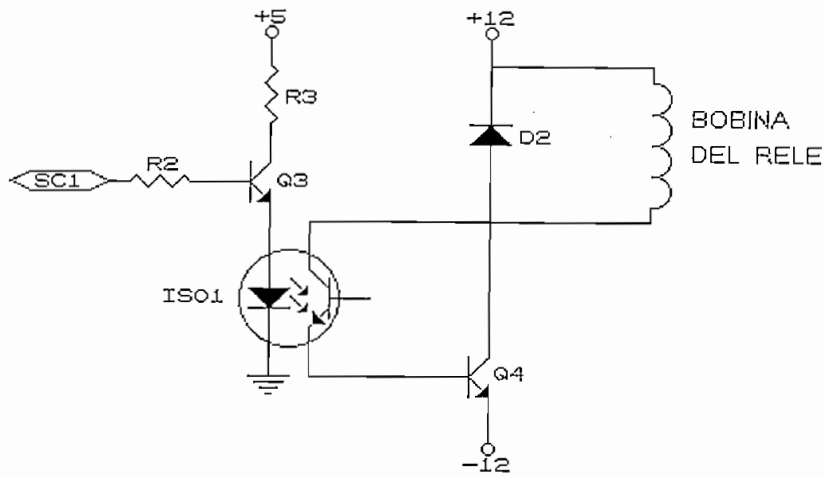


Figura 3. 11: Circuito de control para inversión de giro de los motores DC.

3. 2. 2 SISTEMA MICROPROCESADO

El sistema microprocesado está basado en el microcontrolador PIC 16F877. Las características más importantes del mencionado microcontrolador son :

Memoria de programa tipo FLASH, lo que representa gran facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje ya que no se requiere de borrado con luz ultravioleta como las versiones EPROM sino, permite reprogramarlo nuevamente sin ser borrado con anterioridad. Este microcontrolador utiliza un cristal oscilador de 20 MHz.

Totalmente compatible con los modelos PIC 16CXX, los que se caracterizan principalmente por poseer memoria "EEPROM" en lugar de memoria Flash, pero su manejo es similar.

El microcontrolador PIC 16F877 se basa en la Arquitectura Harvard, en la cual el programa y los datos se pueden trabajar desde memorias separadas, lo que posibilita que las instrucciones y los datos posean

longitudes diferentes. Esta misma estructura es la que permite la superposición de los ciclos de búsqueda y ejecución de las instrucciones, lo cual se ve reflejado en una mayor velocidad de procesamiento.

MEMORIA DE PROGRAMA

Es una memoria tipo Flash de 8 K de longitud con palabra de 14 bits, ya que tiene un contador de programa de 13 bits, puede direccionar 8K x 14 words.

VECTOR DE RESET

Cuando ocurre un reset o se enciende el microcontrolador, el contador de programa se pone en ceros (0000h). Por esta razón, en la primera dirección del programa se debe escribir todo lo relacionado con la iniciación del mismo.

VECTOR DE INTERRUPCION

Cuando el microcontrolador recibe una señal de interrupción, el contador de programa apunta a la dirección 0004h de la memoria de programa, por eso, allí se debe escribir toda la programación necesaria para atender dicha interrupción.

REGISTROS (Memoria RAM)

La memoria de datos se encuentra particionada en múltiples bancos que contienen registros de propósito general que se pueden usar para guardar los datos temporales de la tarea que se esta ejecutando y registros de función especial que cumplen un propósito especial en el control del microcontrolador.

Los registros están organizados como cuatro bancos (páginas) de 92 posiciones de 8 bits cada una (92 x 8); todas las posiciones se pueden acceder directa o indirectamente (estas últimas a través del registro FSR). Para seleccionar que página de registro se trabaja en un momento determinado se utilizan los bits RP0 y RP1 del registro STATUS.

También se debe mencionar otras características que posee el microcontrolador como: 256B EEPROM, RS232, conversor A/D de 10 bits, 2 salidas PWM, 3 timers, Watchdog timer interno.

Microchip ofrece gratuitamente en su página web el programa para desarrollo de proyectos que utilizan todos los microcontroladores PIC fabricados por ellos, este programa se llama MPLAB. En este caso se ha utilizado la versión 5.0, la cual permite editar y simular los programas que se descargarán luego en los microcontroladores. Este programa se ejecuta bajo el entorno Windows, lo que lo hace muy amigable y sencillo de utilizar. El programa ofrece también una muy completa ayuda para programar y utilizar el programa adecuadamente.

Para descargar el programa en el microcontrolador se puede elegir entre muchas opciones que se ofrecen en el mercado, aunque los programadores que ofrece la empresa Microchip son los mas confiables y adecuados.

En síntesis, la mayoría de programadores realizan las siguientes funciones:

- Programar al PIC desde el archivo.
- Lee del PIC hacia el archivo.
- Verifica al PIC desde el archivo.
- Borra el contenido del PIC.

- Inicializa el puerto paralelo.
- Testeo del programador en modo interactivo.
- Muestra la ayuda en línea.

En la implementación del programa de control se utilizan tres puertos del microcontrolador:

- El primero para generar las señales de 40 kHz y las señales de alimentación para los motores, los que pueden operar a dos velocidades, velocidad normal cuando avanzan hacia el frente y velocidad menor cuando curve o dé marcha atrás.

- El segundo puerto se encarga de leer las señales que capten los receptores de los sensores.

- Y el tercer puerto se encarga de controlar el sentido de giro de los motores por medio de dos relés, según la siguiente tabla:

Tabla 3. 2: Inversión de giro de motores

SENTIDO DE GIRO	RELE #1	RELE #2
Adelante	1	1
Izquierda	0	1
Derecha	1	0
Atrás	0	0

También se utilizan los tres timers que posee el microcontrolador para las siguientes tareas:

- **Timer 0:** Generación de señales de PWM de dos velocidades que alimentan los motores.

- **Timer 1:** Mide el tiempo desde que se envía el tren de pulsos, hasta que el siguiente tren de pulsos es enviado, realizando de esta manera, una medición indirecta de la distancia en base al tiempo de vuelo.

- **Timer 2:** Es utilizado por el microcontrolador para la configuración de la frecuencia de las salidas PWM disponibles en el microcontrolador.

3. 2. 3 WATCH DOG TIMER (WDT)

La función del circuito de vigilancia, más conocido como Watch Dog Timer (WDT), es reinicializar el programa implementado en el microcontrolador, cuando éste, por cualquier circunstancia interna o externa, deja de responder adecuadamente.

El microcontrolador PIC 167F877, tiene un WATCH DOG TIMER interno, el cual utiliza el Timer 1 para su configuración, pero ya que en este trabajo se utilizaron los tres timers disponibles, fue necesario realizarlo externamente. El circuito implementado informa al usuario el estado de reinicialización a través de un indicador luminoso colocado en la tarjeta del microcontrolador.

Para este circuito se tomó como referencia un monoestable multivibrador [7] con el CI LM555, en el cual se utiliza la señal PWM generada por el microcontrolador como señal de control para el WDT. El circuito implementado y su diseño se muestran a continuación:

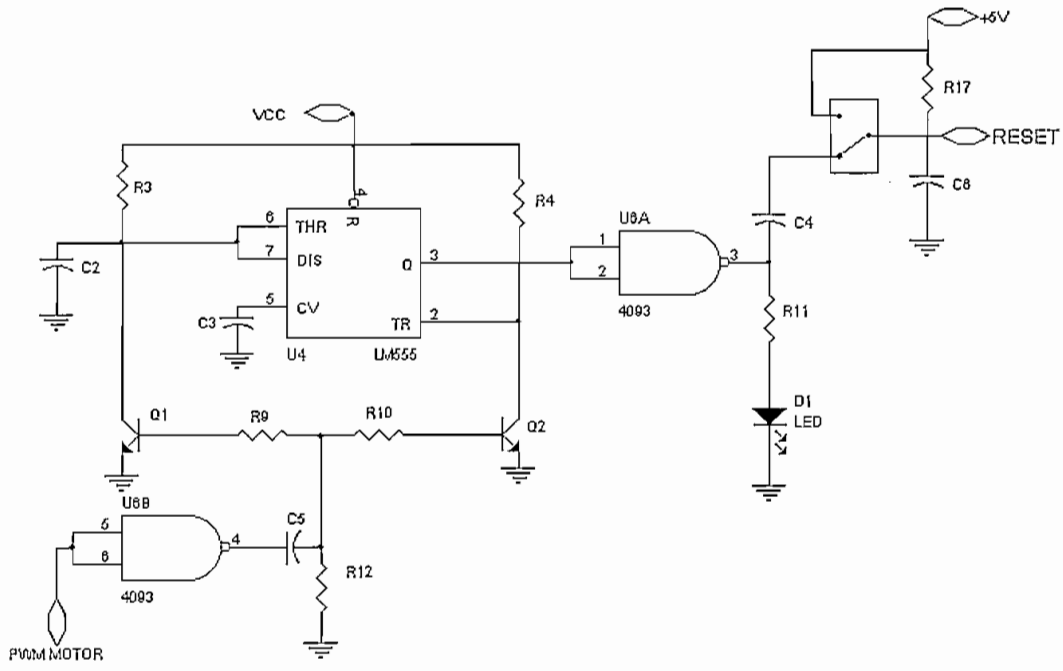


Figura 3.12: Circuito Watch Dog Timer.

Para el diseño, se ha determinado una frecuencia del PWM de 2 KHz, por lo tanto el período es T_{PWM} = 0.5 ms. Es necesario dar un tiempo mayor al circuito WDT para que genere el RESET, entonces se asume que:

T_{WDT} = 0.8ms. Se conoce que para el LM555, el período es:
T = 1.1 RC

Entonces: R = T / 1.1 C
Sea C = 2.2 μF, entonces

$$R = 0.8ms / 1.1*2.2\mu F = 330.6\ \Omega$$

Por lo que se coloca una resistencia de 330 Ω

El usuario puede hacer que el circuito de vigilancia esté conectado al reset del microcontrolador, a través de JP5, o que se utilice el circuito de reset normal del microcontrolador.

3. 3 PROGRAMA DE CONTROL

Este programa fue desarrollado por medio del software MPLAB 5.0, este programa está implementado en lenguaje ensamblador para los microcontroladores PIC de la familia 16F8XX. El programa tiene como objetivo fundamental el impedir que la plataforma colisione con objetos que se puedan encontrar en su camino, para ello se utilizará, la arquitectura mostrada en la figura 3.13, en la cual, se observa que el microcontrolador comanda a los motores de acuerdo a la información que recibe de los sensores de ultrasonido.

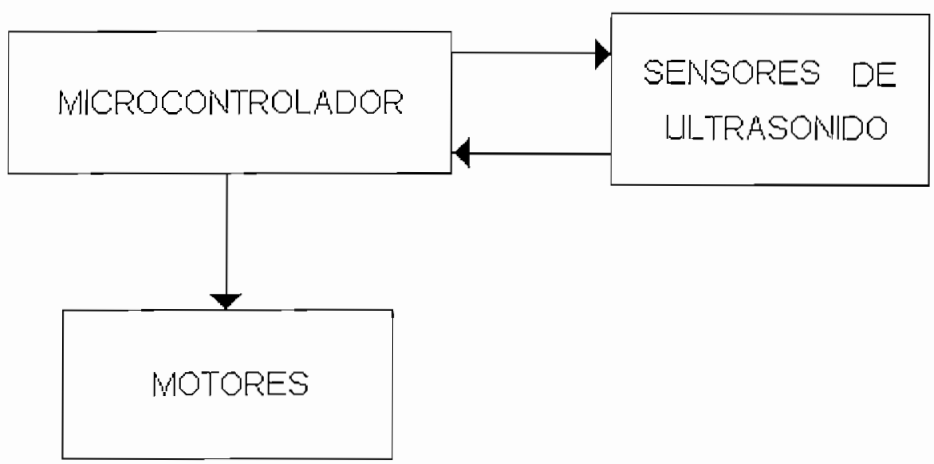


Figura 3. 13: Arquitectura del programa.

El programa inicia habilitando los puertos y definiendo los parámetros de funcionamiento del microcontrolador. Luego se genera una señal de 40

kHz por medio de una de las salidas PWM que posee el microcontrolador para alimentar el sensor detector de orificios en la superficie del suelo el cual estará funcionando durante toda la operación del robot y será leído como 1 lógico cuando no haya orificios (lo que dará la indicación de avanzar hacia adelante) , y 0 lógico cuando se encuentre una grada u orificio y se ordene una acción evasiva.

Luego se genera un tren de pulsos de 40 kHz y su tiempo en bajo que alimenta a los demás sensores.

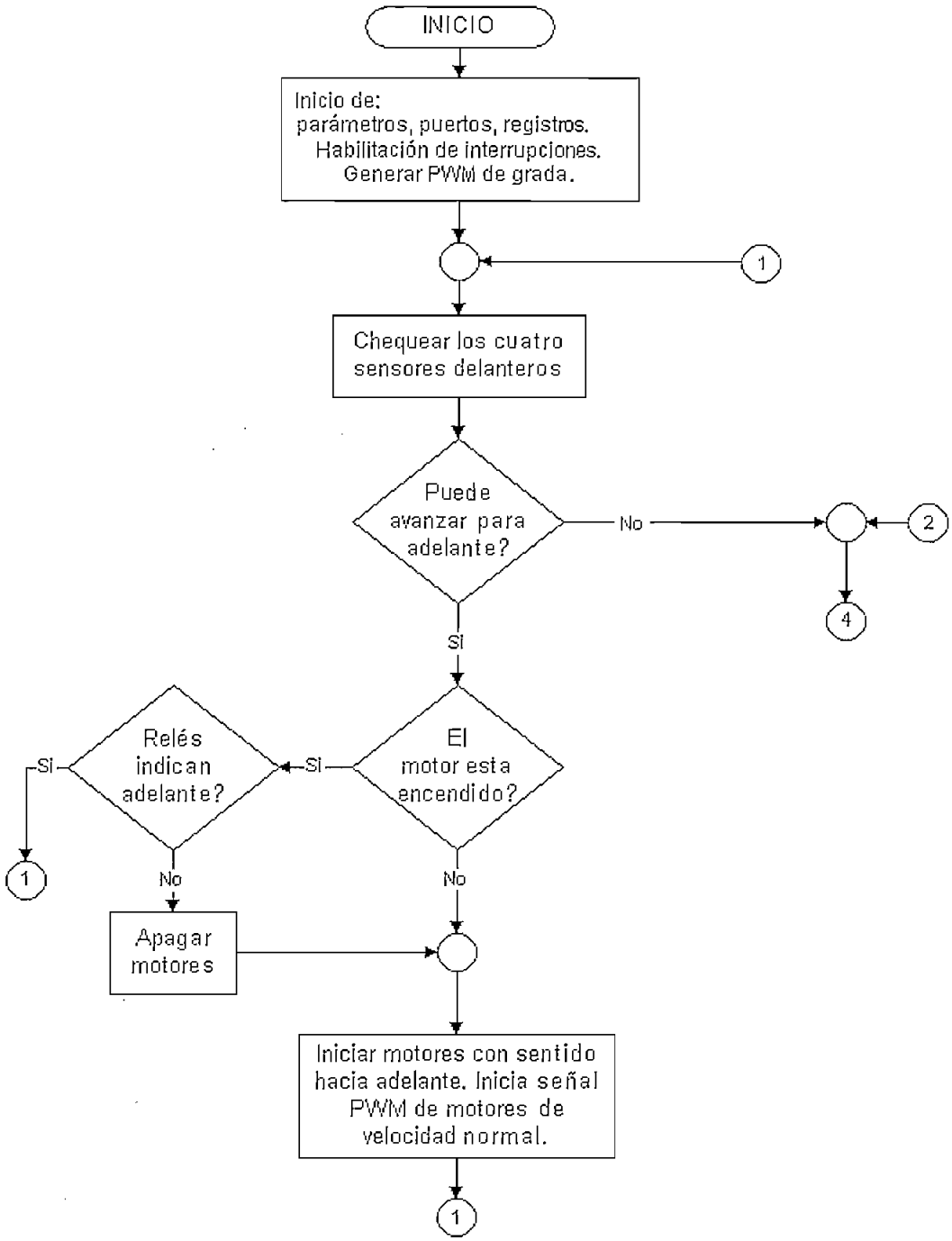
Para cumplir con el objetivo del programa, constantemente se revisan los sensores delanteros para determinar la presencia de obstáculos en la trayectoria. En caso de existir obstáculos, se revisa el sensor derecho, si no existe obstáculo el robot curva a la derecha, caso contrario revisa el sensor izquierdo y el robot procede de la misma manera. El robot se mantendrá curvando hasta que pueda avanzar hacia adelante.

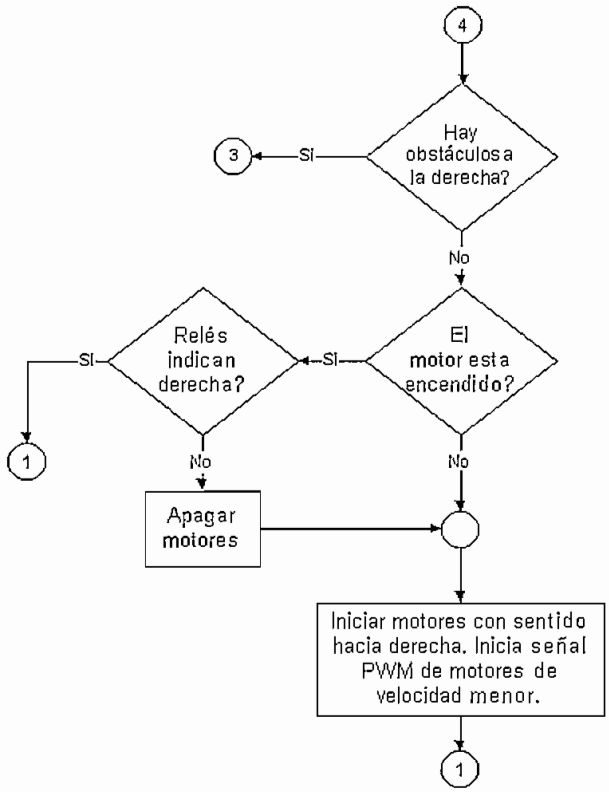
Cuando no sea posible curvar ni a derecha ni a izquierda, dá marcha atrás y revisa constantemente los sensores laterales para ver si puede curvar, este caso se daría cuando el robot entre en un callejón sin salida en el que no tenga espacio para curvar.

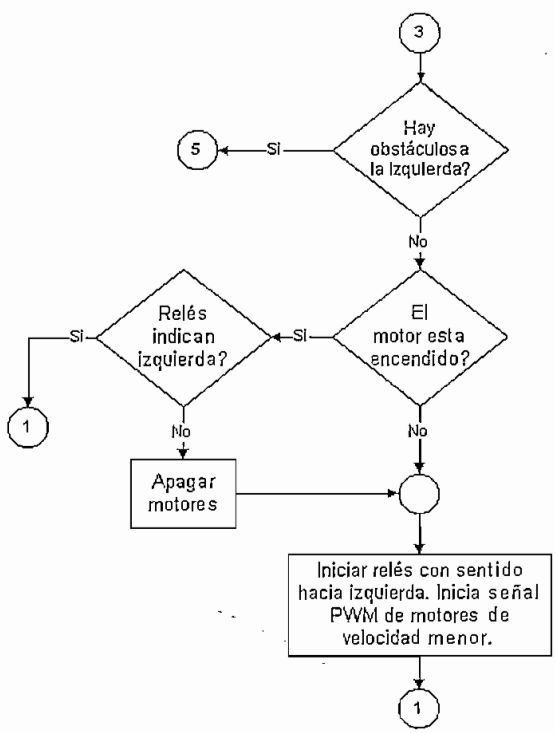
Adicionalmente existe una subrutina que genera una señal PWM de 2kHz la cual es utilizada para control de velocidad de los motores de DC.

Los flujogramas del programa principal y las subrutinas utilizadas en la elaboración de este programa se muestran en las siguientes figuras:

Programa principal:




4
Hay obstáculos a la derecha?
SI
3
No
El motor esta encendido?
SI
Relés indican derecha?
SI
1
No
No
Apagar motores
Iniciar motores con sentido hacia derecha. Inicia señal PWM de motores de velocidad menor.
1


3
Hay obstáculos a la izquierda?
SI
5
No
El motor esta encendido?
SI
Relés indican izquierda?
SI
1
No
No
Apagar motores
Iniciar relés con sentido hacia izquierda. Inicia señal PWM de motores de velocidad menor.
1

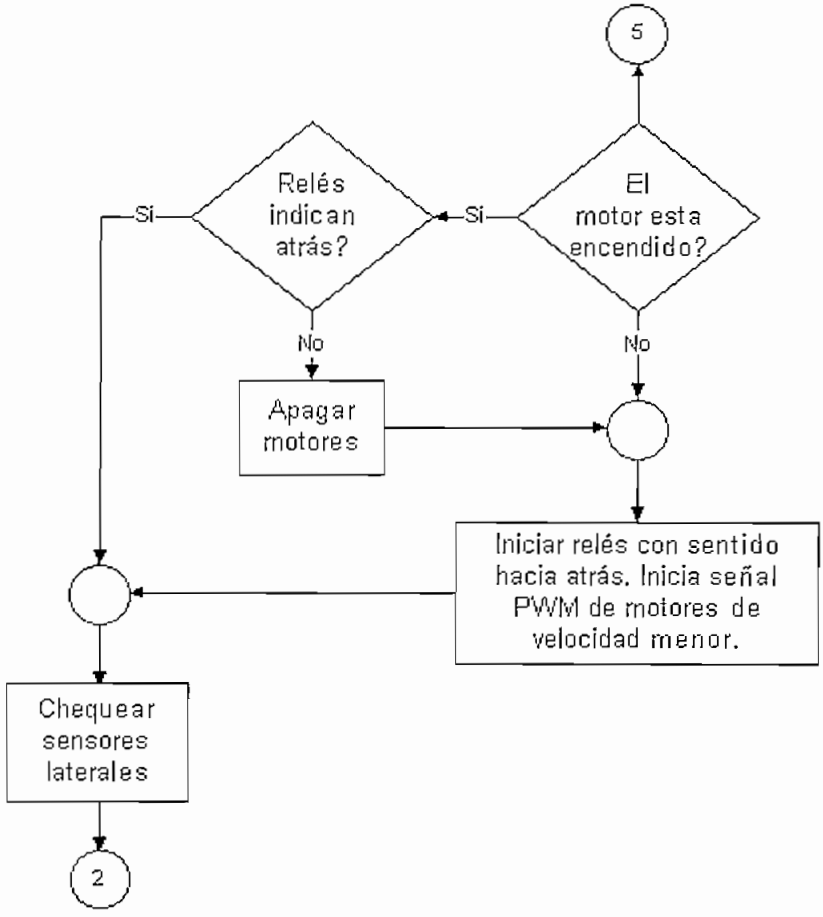


Figura 3. 14: Diagrama de flujo del programa principal.

Subrutina que genera el tren de pulsos de 40kHz:

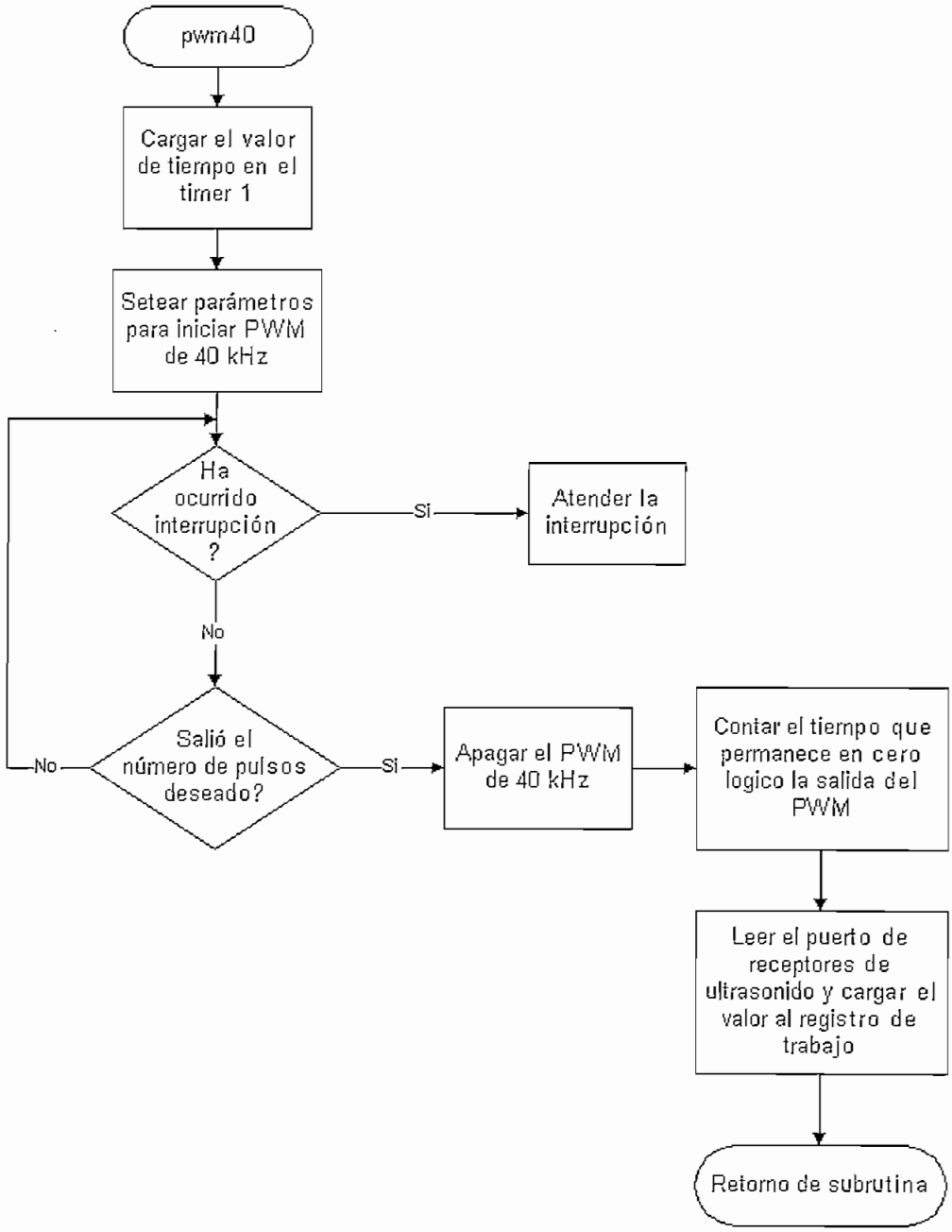


Figura 3. 15: Diagrama de flujo de la subrutina que genera el tren de pulsos de 40kHz.

Subrutina que genera el PWM de motores:

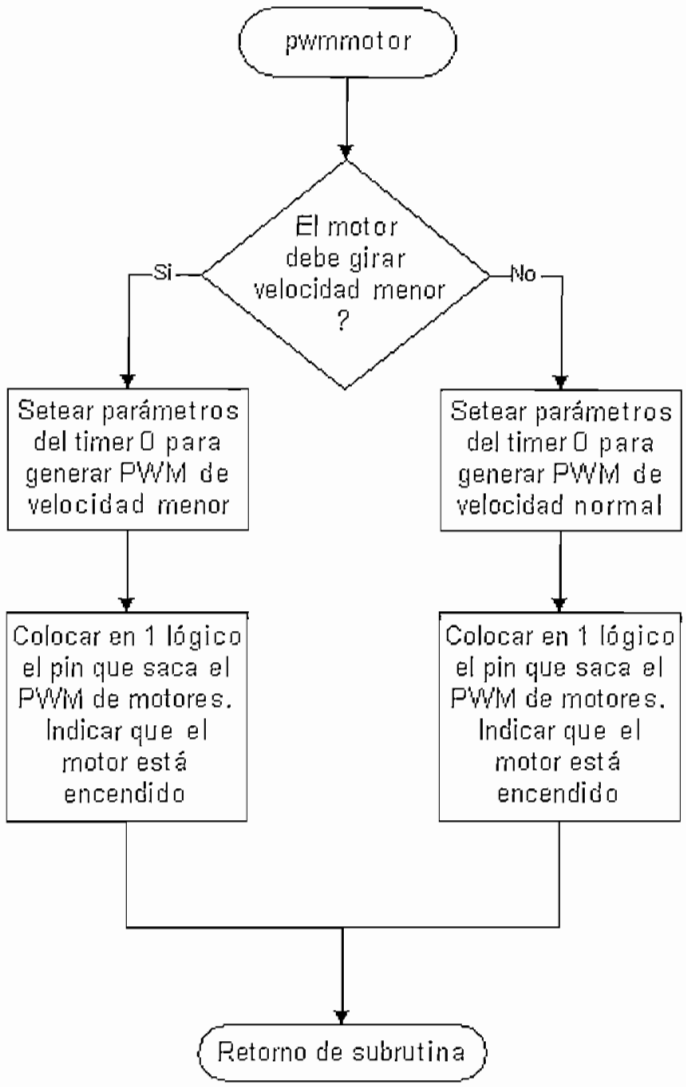


Figura 3. 16: Diagrama de flujo de la subrutina PWM de motores.

Subrutina de interrupción:

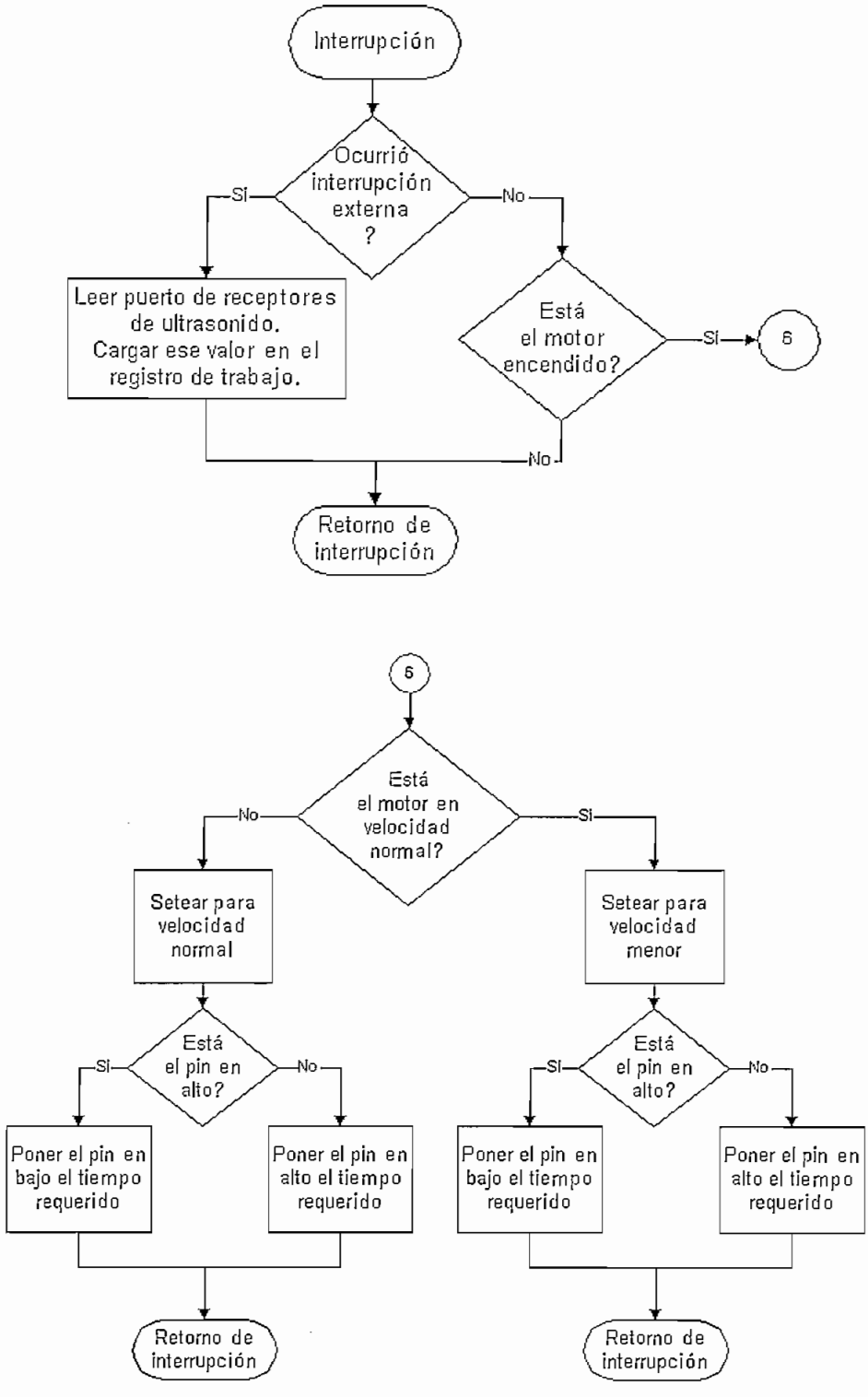


Figura 3. 17: Diagrama de flujo de la subrutina de interrupción.

3. 4 ENSAMBLAJE DE LA PLATAFORMA

Considerando que ya se tenía una gran parte de la plataforma móvil Pionero 1 funcionando adecuadamente, se ha procedido a realizar una revisión y mantenimiento general de las partes que han sido utilizadas, así como, el montaje de las nuevas tarjetas diseñadas y los sensores adicionales.

Se han elaborado dos circuitos impresos. En uno se ha colocado el nuevo acondicionamiento para los sensores de ultrasonido, mientras que en el otro circuito impreso se ha colocado el sistema microprocesado. La descripción detallada de cada uno de estos circuitos impresos se puede encontrar en los Anexos B y C.

Se ha comprobado el adecuado funcionamiento de los motores DC, su tarjeta de control, así como de los pares de sensores de ultrasonido disponibles. Finalmente, se procedió a incorporar los nuevos circuitos de control y se realizó la calibración de todo el sistema en conjunto, hasta obtener un funcionamiento adecuado.

Para comprender mejor como está ensamblada la plataforma móvil, se sugiere revisar el Anexo A, en el que se muestran los planos de montaje.

En la tabla 3.3 se detalla el costo (en dólares) que tendrían los elementos necesarios para construir un robot móvil de las características descritas. Los precios de los elementos se tomaron del catálogo de Jameco. En este resumen de precios se toma también en cuenta el precio que tiene actualmente el juguete del cual se adaptó el chasis del robot móvil, así como de los circuitos impresos adicionales.

Tabla 3. 2: Lista de elementos y precios.

DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Total Tarjeta PIC16F877			**36.47**
Tarjeta impresa doble lado	1	10	10
Microcontrolador PIC16F877	1	17	17
Cristal 20 MHz	1	1.2	1.2
Zócalos 8 pines	1	0.3	0.3
Zócalos 14 pines	4	0.4	1.6
Zócalos 40 pines	1	1	1
Resistencias ¼ W	17	0.04	0.68
Transistores NPN	2	0.07	0.14
Condensadores electrolíticos	2	0.13	0.26
Condensadores cerámicos	4	0.1	0.4
Pulsadores	1	0.2	0.2
Leds	1	0.2	0.2
Conectores de fuente	2	0.22	0.44
Conectores de 3 contactos	2	0.1	0.2
Headers 20 pines	2	0.5	1
CI TL084	1	0.8	0.8
CI LM555	1	0.25	0.25
CI 4093	1	0.4	0.4
CI 4075	1	0.4	0.4

Total Tarjeta Sensores de Ultrasonido			**77**
Tarjeta impresa doble lado	1	17	17
Resistencias ¼ W	66	0.04	2.64
Potenciómetros 50KΩ	6	1	6

Condensadores electrolíticos	6	0.13	0.78
Condensadores cerámicos	18	0.1	1.8
Diodos 1N4148	19	0.06	1.14
Transistores NPN	7	0.07	0.49
Leds	4	0.02	0.08
CI TL084	5	0.8	4
CI 4093	2	0.4	0.8
CI 4075	1	0.4	0.4
Headers 20 pines	1	0.5	0.5
Sensores de Ultrasonido	6	6	36
Conectores 2 contactos	12	0.1	1.2
Conectores 3 contactos	2	0.1	0.2
Zócalos 14 pines	8	0.4	3.2
Cable apantallado (1m)	3	0.19	0.57
Cables conectores	2	0.1	0.2

Total Plataforma Móvil			**140.84**
Plataforma Móvil	1	55	55
Placa de acrílico	1	1	1
Switches 3 posiciones	2	1.25	2.5
Microswitches	4	0.4	1.6
Batería 6 V	1	30	30
Batería 7,2 V	1	50	50
Terminales	8	0.08	0.64
Jacks	2	0.05	0.1

Total Tarjeta de Control de Motores			**16.38**
Tarjeta impresa	1	3.8	3.8
Relés	2	2.25	4.5
Transistores TIP 110	4	0.23	0.92
Transistores NPN	4	0.07	0.28
Diodos 1N4148	14	0.06	0.84
Resistencias ¼ W	8	0.04	0.32
Headers	8	0.03	0.24
Conectores de fuente	3	0.3	0.9
Condensadores cerámicos	2	0.1	0.2
Condensadores electrolíticos	1	0.13	0.13
Opto acopladores	2	0.35	0.7
Conectores 4 contactos	2	0.35	0.7
Zócalos 6 pines	2	0.375	0.75
Zócalos 16 pines	2	1.05	2.1

Total Tarjeta de Fuente			**13.84**
Tarjeta impresa	1	2	2
Regulador LM7805	1	1.8	1.8
Conversor DC-DC +5,+12,-12V	1	7.95	7.95
Conector de Fuente	1	0.3	0.3
Disipador	1	0.5	0.5
Conectores 4 contactos	3	0.35	1.05
Headers	12	0.02	0.24

Otros Gastos	**1**	**10**	**10**

COSTO TOTAL	DOLARES	**294.53**

Como se puede ver, el valor por el que se puede ensamblar un robot móvil como el que se ha desarrollado, es bajo comparado con plataformas móviles comerciales, cuyos costos fácilmente alcanzan los miles de dólares.

CAPITULO 4

RESULTADOS

Al finalizar la realización de este trabajo, se cuenta con un prototipo de plataforma móvil de tracción diferencial, que puede cumplir tareas de navegación simples como: marcha adelante, marcha atrás y movimientos de izquierda y derecha, además tiene la capacidad de evadir obstáculos que se encuentren al alcance de sus sensores de ultrasonido, por lo que puede navegar libremente por su ambiente de trabajo.

El acondicionamiento de sensores de ultrasonido implementado, cumple con la función de dar el "sentido de la vista" al robot móvil. Se lo realizó de manera que, al encontrar un obstáculo a 20 cm de distancia del robot, envíe dicha información al microcontrolador. Si se desea cambiar la distancia a la cual reaccionan los sensores de ultrasonido se debe modificar el programa de control, ya que dicha distancia se calibra en base a una medición indirecta realizada por el microcontrolador.

Se ha conseguido que la plataforma móvil reduzca el consumo de energía, al utilizar un microcontrolador con tecnología CMOS y otros dispositivos electrónicos de bajo consumo.

El robot cuenta con baterías recargables, lo que hace que se desplace libremente durante un tiempo aproximado de 1 hora, esto se ha comprobado luego de que se realizaron mediciones experimentales de la corriente que consume la plataforma móvil mientras está en operación y, se determinó que la autonomía viene limitada por la capacidad de corriente que puede entregar la batería que alimenta los motores DC.

Además, en la plataforma móvil se colocó un bus de expansión por medio del cual se puede acceder a los pines no utilizados del microcontrolador, lo que permitirá realizar posteriores trabajos de mejoramiento o ampliación. Finalmente se debe mencionar que, en el trabajo realizado se distinguen claramente tres partes:

- Los sensores de ultrasonido y su acondicionamiento, con los que se obtiene información del medio en el que se encuentra el robot móvil.
- Los motores, su tarjeta de control y el sistema mecánico, que sirven para darle movimiento a la plataforma móvil.
- El sistema microprocesado, el cual se comunica con los sensores de ultrasonido, recibe su información y sobre esa base controla a los motores, es decir, el movimiento del robot móvil.

En las siguientes figuras se muestran fotografías de la plataforma móvil:

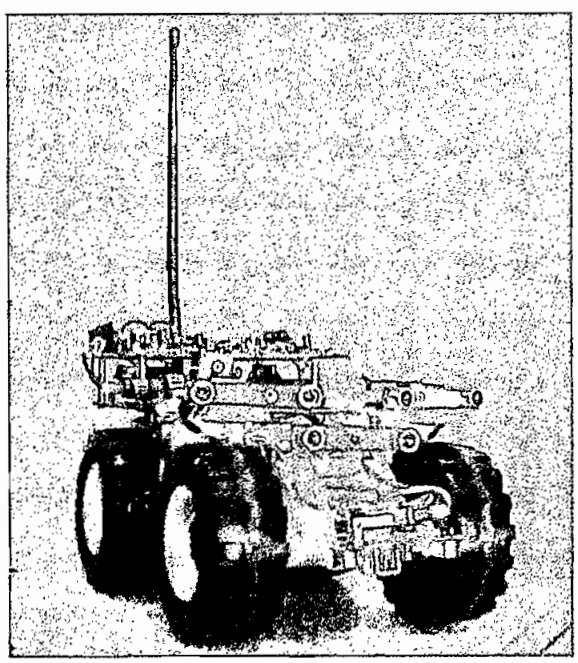


Figura 4. 1: Plataforma móvil Pionero 1, vista frontal.

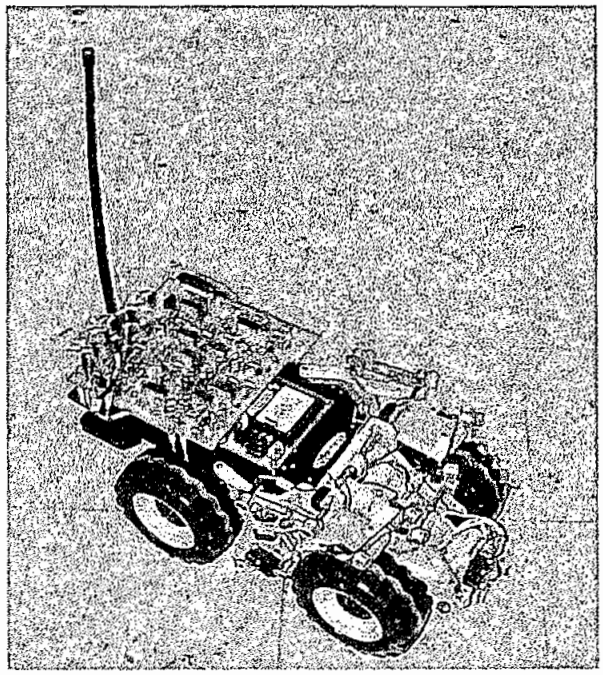


Figura 4. 2: Plataforma móvil Pionero 1, vista superior.

Tabla 4.1: Sumario técnico

ELEMENTOS	INFORMACION TECNICA
Procesador	PIC 16F877 a 20 Mhz
RAM	368 bytes (memoria de datos)
FLASH	8 Kbytes (memoria de programa)
EEPROM	256 bytes (memoria de datos)
Movimiento	2 motores DC
Sensores	6 pares de sensores de ultrasonido (emisor – receptor)
Energía	2 Baterías NiCd recargables (600 mAh, 1.2 Ah) Las baterías pueden ser fácilmente removidas y reemplazadas
Autonomía	1 hora aproximadamente
Extensión de bus	El robot puede ser expandido por módulos añadidos en el bus que muestra los pines no utilizados
I/O para el usuario	9 entradas / salidas ST / TTL 5 entradas / salidas TTL (5V) 5 entradas / salidas ST * ST: Schmitt Trigger
Tamaño	Largo: 39 cm Ancho: 20 cm Alto: 18 cm
Peso	Aprox. 1.9 Kg.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

5. 1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El acondicionamiento de los sensores de ultrasonido implementado ha demostrado que utilizando este tipo de transductores se puede dotar de un "sentido de la vista" artificial a los robots móviles para que puedan cumplir con las tareas que se les asigne sin chocar con objetos que se encuentren en sus trayectorias. El acoplamiento entre el sistema mecánico y electrónico ha demostrado funcionar correctamente pues por medio de las señales de control electrónicas se comanda a los motores, con el fin de que el robot realice movimientos evasivos cuando se encuentren obstáculos frente a él.

Con el presente trabajo se ha demostrado que la manera más óptima de generar osciladores que alimenten a transmisores de ultrasonido es utilizando un microcontrolador, especialmente cuando los sensores (par transmisor – emisor) utilizados tiene un ancho de banda pequeño, como es el caso de los sensores aquí empleados cuya frecuencia de oscilación es de 40 kHz ± 1%.

Se ha comprobado que es posible desarrollar este tipo de proyectos utilizando presupuestos relativamente bajos, empleando imaginación y las destrezas adquiridas a lo largo de los años de formación profesional.

Este trabajo tiene singular importancia pues explora y desarrolla un área de conocimiento como la Robótica Móvil, que no ha sido un tema de estudios relevantes en el país y que si es objeto de un mayor desarrollo puede contribuir al mejoramiento tecnológico del mismo.

La incursión en el campo de desarrollo e implementación de robots móviles que realicen tareas especificas en nuestro medio podría constituirse en una actividad

lucrativa y con mucho futuro ya que la competencia en esta área es casi inexistente en el país.

4. 2 TRABAJO A FUTURO

Se puede utilizar el puerto serial del microcontrolador, que se encuentra disponible en el bus de expansión para realizar un control remoto de la plataforma móvil, únicamente añadiendo en el programa de control las rutinas de comunicación serial.

Se podrían montar elementos adicionales de navegación y de esta manera realizar el control de posición del robot móvil. El colocar sobre el robot una cámara de video facilitaría la exploración de lugares de difícil acceso para los seres humanos.

Además se puede implementar algún sistema adicional que aproveche los movimientos aleatorios que tiene el robot móvil y hacer que realice un trabajo útil mientras se desplaza su ambiente de trabajo, por ejemplo puede realizar tareas de limpieza si se le instala una pequeña aspiradora portátil.

Si se desea que el robot tenga mayor libertad de movimientos, se debería colocar un mayor número de sensores de ultrasonido, para que de esta manera el robot tenga mayor información de su ambiente de trabajo.

Finalmente, se puede mencionar que la Robótica Móvil es un área apasionante, que debe ser desarrollada para mejorar o hacer mas fácil la vida de los seres humanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Lenin Andrango, Nelson Sotomayor, *Simulación y Ensamblaje de un Prototipo para Control y Navegación de un Robot Móvil*, EPN, Quito,1999

- [2] A. P. Cracknell, *Ultrasonidos*, Editorial Paraninfo, Madrid, 1983

- [3] J. Borenstein, N. Everett and L. Feng, *Navigating Mobile Robots System and Techniques*, Wellestey, MA: AK Peters, 1996

- [4] Savant Roden y Carpenter, *Diseño Electrónico*, Addison-Wesley Iberoamericana, 1992

- [5] P. J. McKerrow, *Introduction to Robotics*, Sidney: Addison-Wesley Publishing Company, 1993

- [6] Boylestad R., Nashelsky L., Electrónica: Teoría de Circuitos, Prentice Hall Hispanoamericana, Sexta Edición, México, 1997

- [7] J. Carr, "Designing with Digital IC's", *Proc. Radio Electronics*, vol. 57, 1986

- [8] Mauricio Silva, *Diseño y Construcción de un Módulo Didáctico y Software para Simulación en un PC de un Medidor de Nivel de Líquidos en Tanques Abiertos, por medio de Ultrasonido*, EPN, Quito,1998

- [9] José Flores, *Medidor Ultrasónico de Nivel de Líquidos en Movimiento en un Canal*, EPN, Quito, 1990

- [10] Alfredo Bravo, *Sistema de Seguridad de Locales en Base a Perturbaciones Ultrasónicas*, EPN, Quito,1982

- [11] National Analog and Interface Products Databook, 1999 Edition

- [12] Enciclopedia Encarta 1999, *Microsoft Corporation*

- [13] Manual del Usuario PIC 16F8XX, *Microchip Technology Inc.*, 1998

- [14] Manual del Usuario MPLAB 5.0, *Microchip Technology Inc.*

- www.monografias.com

- www.jameco.com

- www.michochip.com

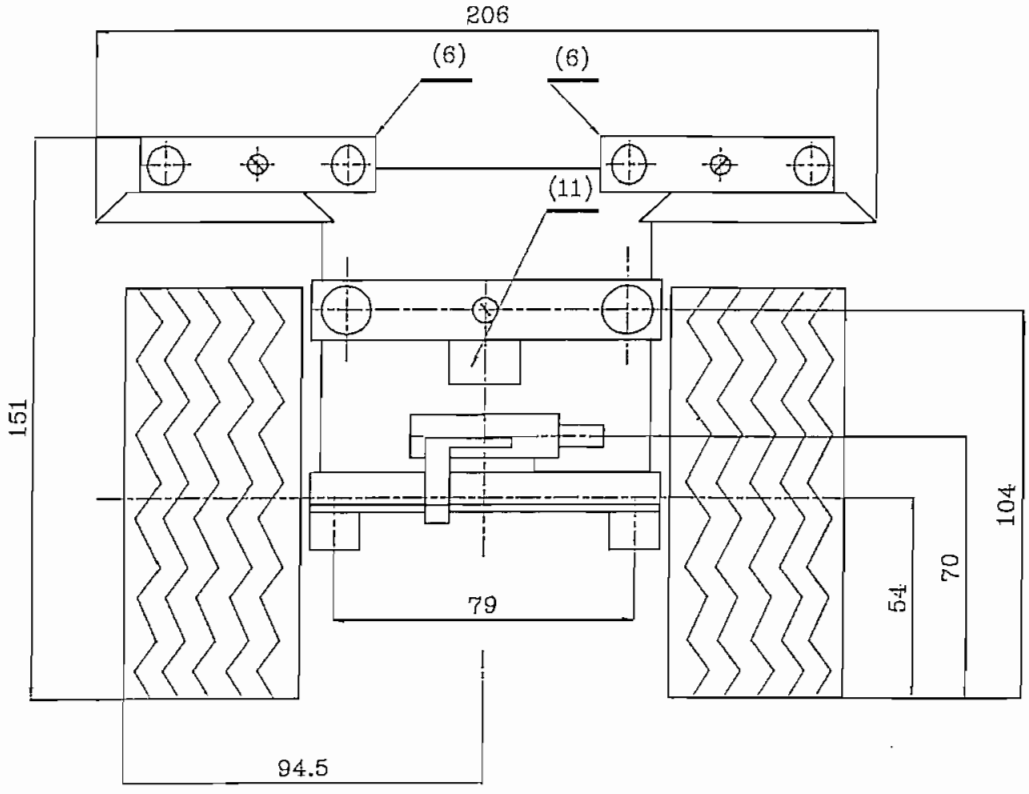
- www.4icpa.org/Espanol/Research/ultrasonido.htm

- www.aeci.org.mx/ultrasonido.htm

- www.dukane.com/us/service/TrainEPU.htm

ANEXO A

VISTA FRONTAL



Nota: La descripcion total del reductor de velocidades se encuentra en la hoja JA002

No	Cant	DESCRIPCION	OBSERVACION	No	Cant	DESCRIPCION	OBSERVACION
6	6	SENSORES DE ULTRASONIDO		12	2	MOTOR	0.5-1 A / 6V
5	6	SELECTOR ON/OFF/RECARGA	Derecha fuente motores Izquierda fuente control	11	1	SOPORTE DE SENSORES DELANTERO	
4	1	SISTEMA MICROPROCESADO	PIC 16F877	10	2	SOPORTE PARA SENSORES	
3	1	Acondicionamiento de motores		9	1	CONVERSOR DC-DC	EM9515
2	1	Bastidor New Bright		8	1	CONTROL DE MOTORES	
1	4	SWITCHES DE PROTECCION		7	2	JACK PARA RECARGA	Derecha fuente motores Izquierda fuente control

CARRERA EN ELECTRONICA Y CONTROL

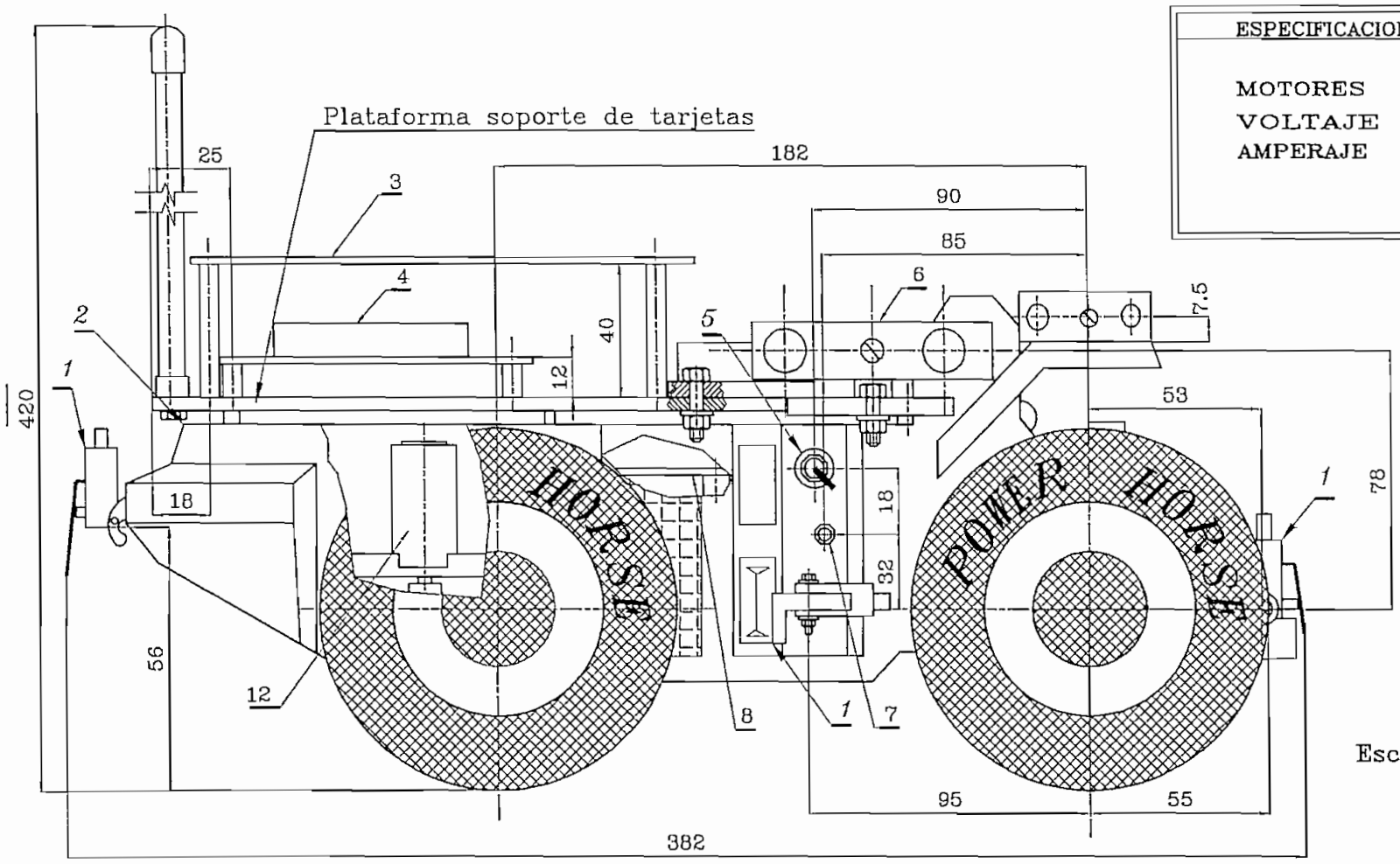
A4

PLATAFORMA MOVIL
PIONERO 1

Date: 2000	Modificacion	Drawn: J. ARMIJOS	DWG. No:	Stat:	Rev:
Dis:NEW BRIGHT		Date: 2000/11	JA001	A	
Scale: 1 : 2		J. ARMIJOS		Sheet: 3	

PROTOTIPO

VISTA LATERAL

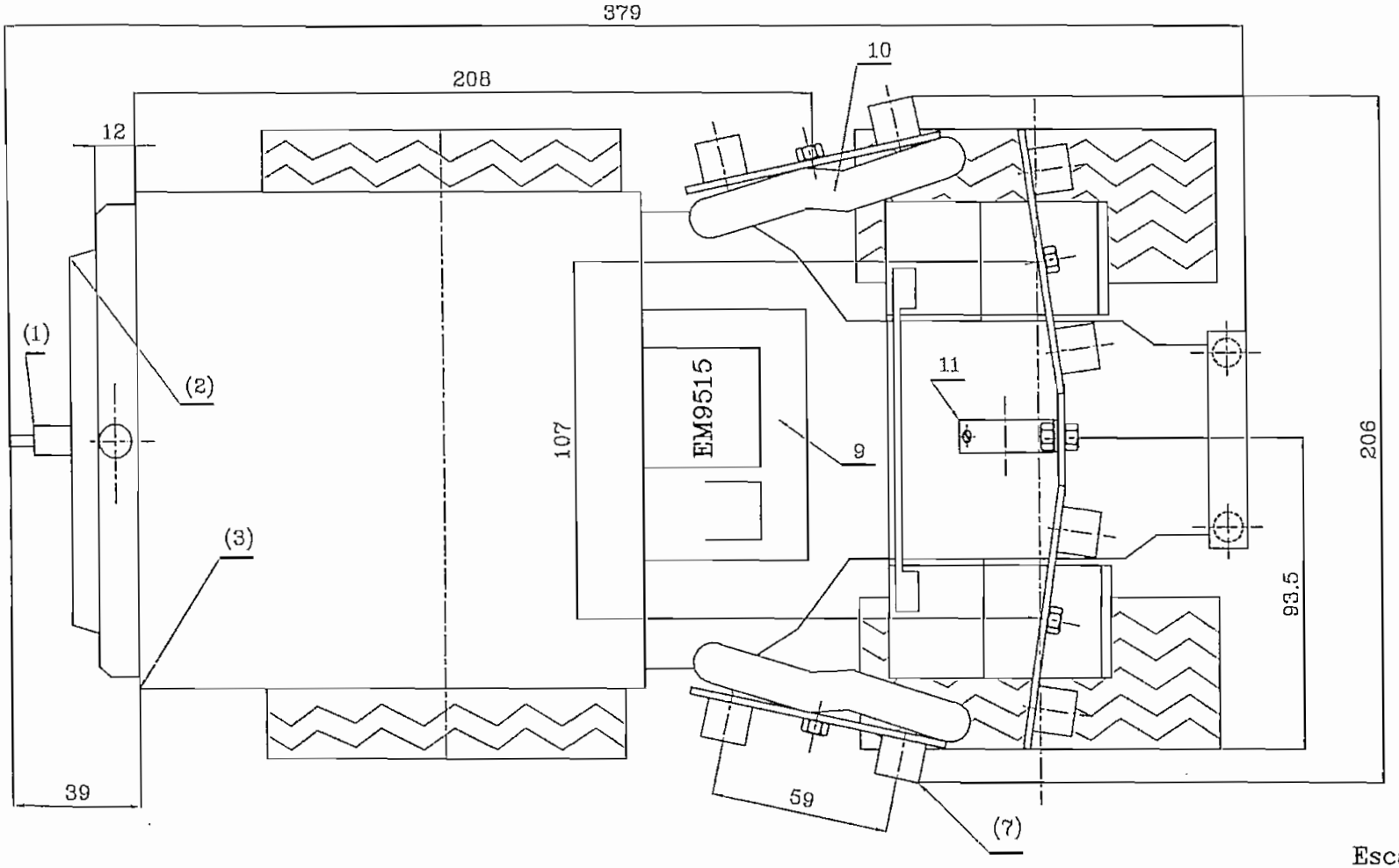


ESPECIFICACIONES TECNICAS	
MOTORES	
VOLTAJE	6V
AMPERAJE	0,5–1 A

Escala: 1:2

Nota: el detalle de piezas se lo hace en la hoja de la vista frontal al igual que el bloque de piezas del proto

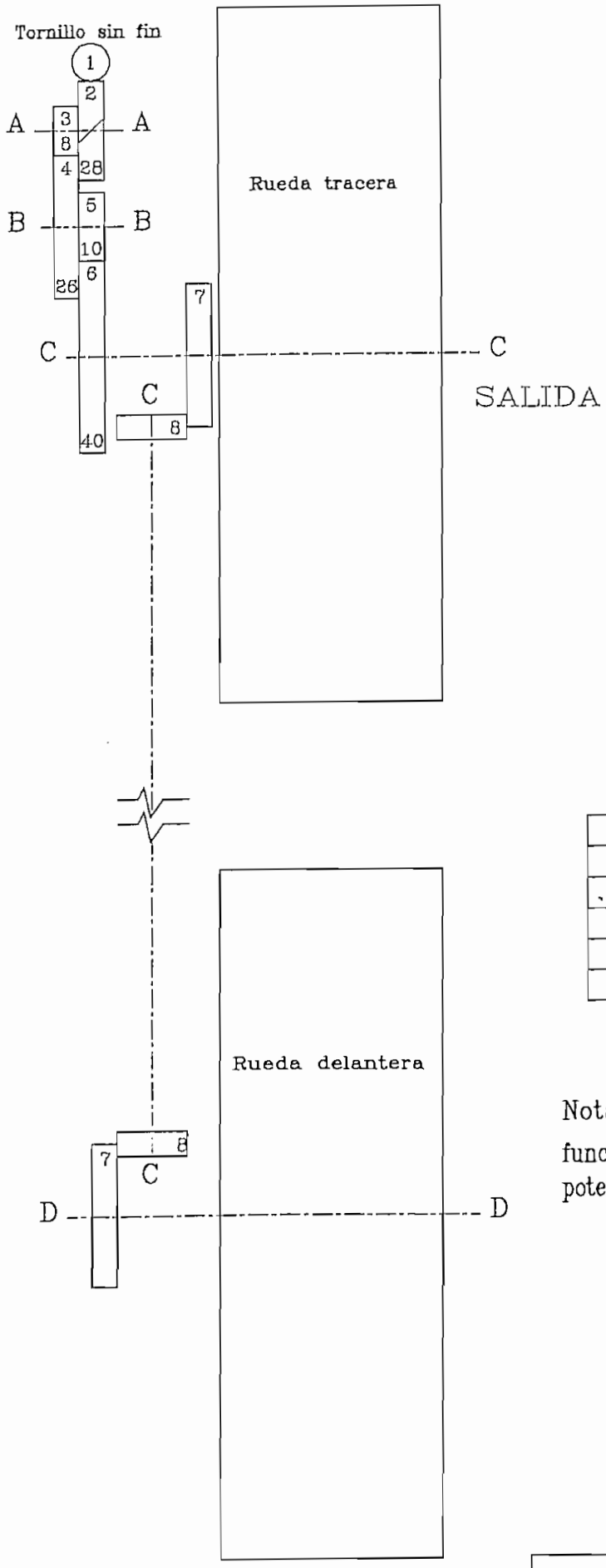
VISTA SUPERIOR



Escala: 1:2

Nota: el detalle de piezas se lo hace en la hoja de la vista frontal al igual que el bloque de piezas del proto

DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD



No	No. de dientes	Diámetro	Eje de Estancia
2	28	16 mm	A—A
3	8	8 mm	A—A
4	26	23 mm	B—B
5	10	11 mm	B—B
6	40	31 mm	C—C

Nota: los engranajes 7 y 8 funcionan como extensiones de potencia a las llantas delanteras

Hoja JA002

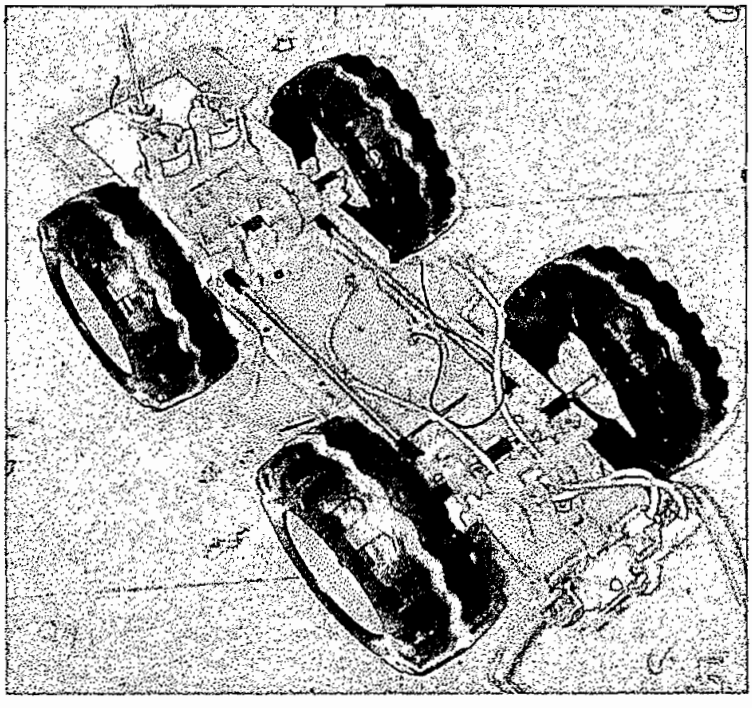


Figura A1: Caja de reducción y motores.

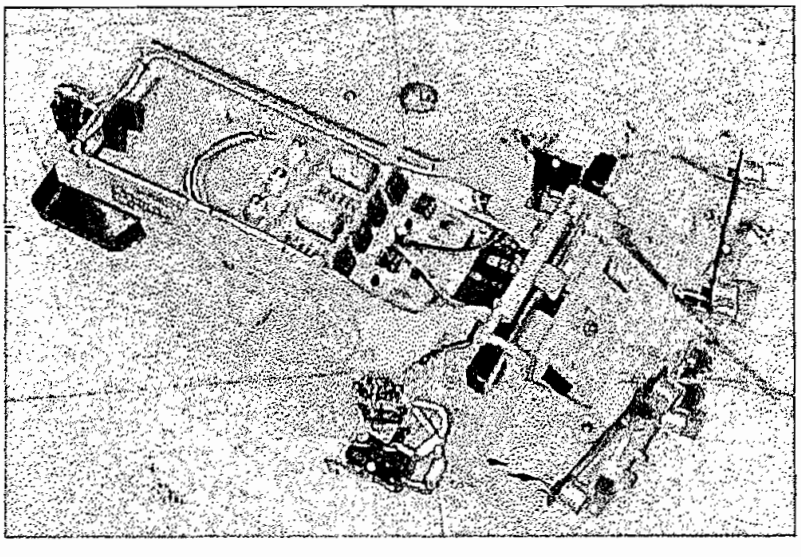
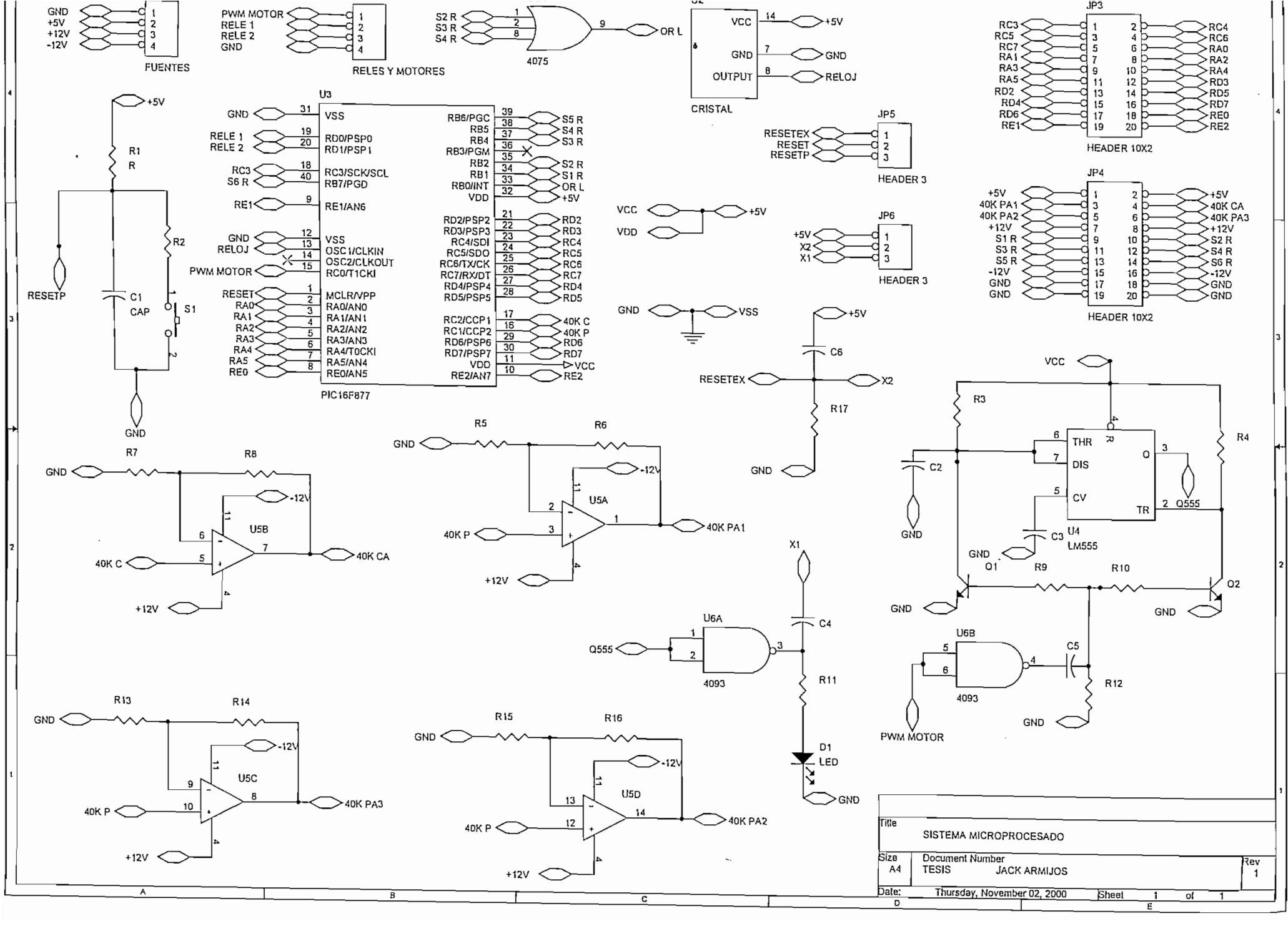


Figura A2: Carrocería.

ANEXO B


FUENTES
GND
+5V
+12V
-12V
RELES Y MOTORES
PWM MOTOR
RELE 1
RELE 2
GND
4075
S2 R
S3 R
S4 R
OR L
CRISTAL
VCC
GND
OUTPUT
RELOJ
HEADER 10X2
JP3
JP4
JP5
JP6
HEADER 3
RESETEX
RESET
RESETP
X2
X1
U3
PIC16F877
VSS
RB6/PGC
RB5
RB4
RB3/PGM
RB2
RB1
RB0/INT
VDD
RD2/PSP2
RD3/PSP3
RC4/SDI
RC5/SDO
RC6/TX/CK
RC7/RX/DT
RD4/PSP4
RD5/PSP5
RC2/CCP1
RC1/CCP2
RD6/PSP6
RD7/PSP7
RE2/AN7
RD0/PSP0
RD1/PSP1
RC3/SCK/SCL
RB7/PGD
RE1/AN6
OSC1/CLKIN
OSC2/CLKOUT
RC0/T1CKI
MCLR/VPP
RA0/AN0
RA1/AN1
RA2/AN2
RA3/AN3
RA4/T0CKI
RA5/AN4
RE0/AN5
40K C
40K P
40K PA1
40K PA2
40K PA3
40K CA
R1
R
R2
C1
CAP
S1
C6
R17
R3
R4
C2
C3
U4
LM555
Q555
Q1
Q2
R9
R10
R11
R12
C4
C5
U6A
U6B
4093
X1
D1
LED
U5A
U5B
U5C
U5D
R5
R6
R7
R8
R13
R14
R15
R16
Title
SISTEMA MICROPROCESADO
Size
A4
Document Number
TESIS
JACK ARMIJOS
Rev
1
Date:
Thursday, November 02, 2000
Sheet
1
of
1

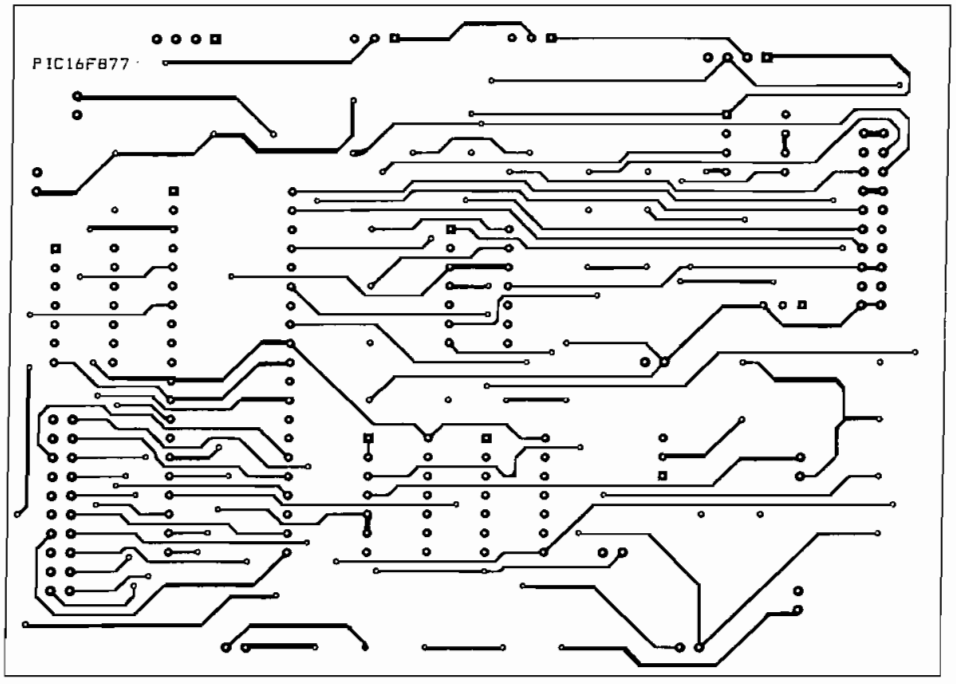


Figura B2: Tarjeta del sistema microprocesado. Pista superior.

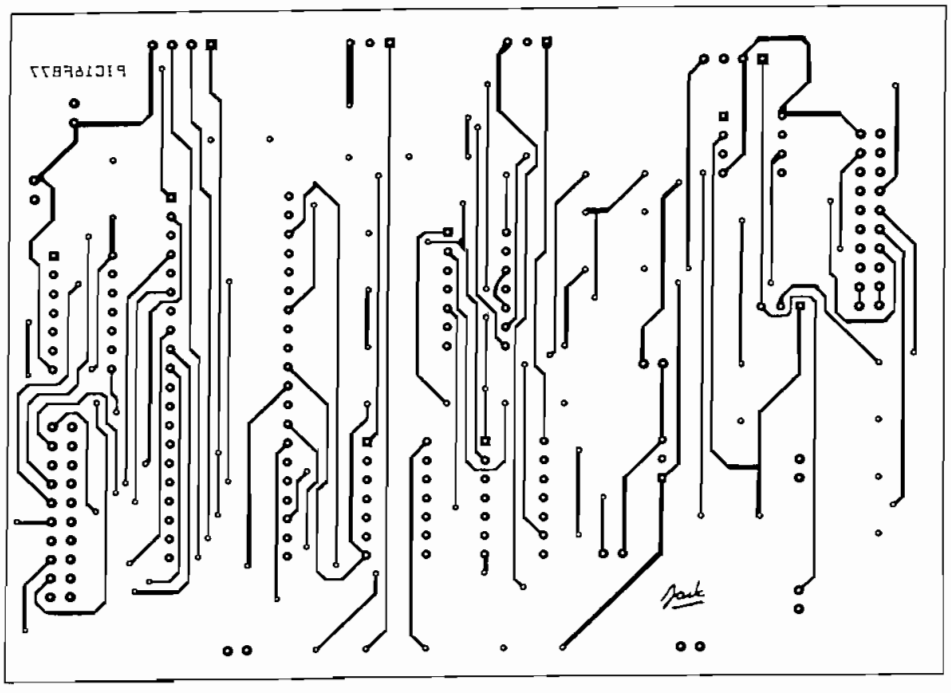


Figura B3: Tarjeta del sistema microprocesado. Pista inferior.

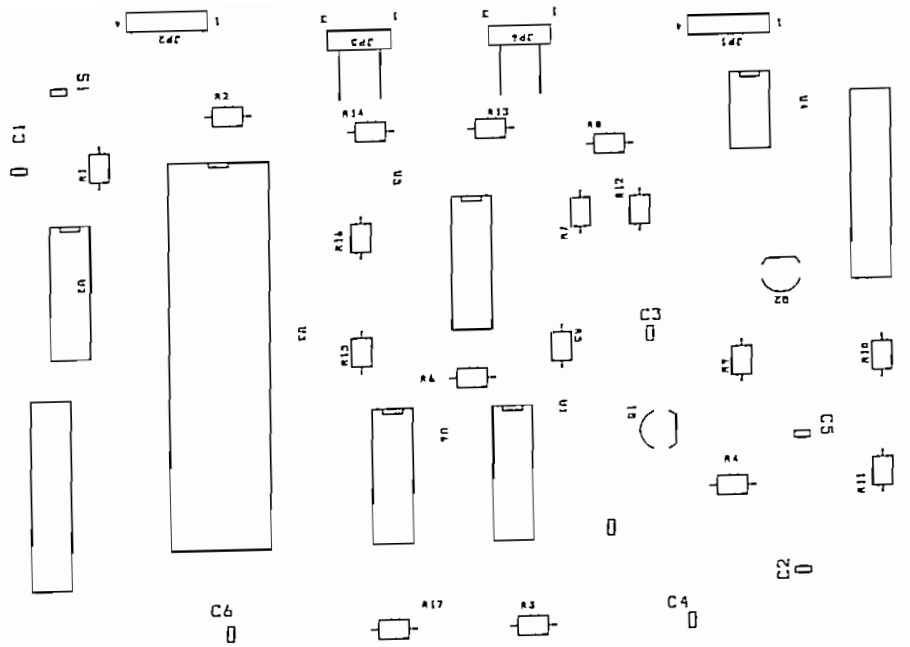


Figura B4: Tarjeta del sistema microprocesado. Ubicación de elementos.

Tabla B1: Lista de elementos y valores.

ELEMENTO	VALOR	DESCRIPCION
R_1, R_4, R_7, R_8, R_5, R_{13}, R_{15}	10 kΩ	Resistencia ¼ W
R_6, R_{14}, R_{16}	20 kΩ	Resistencia ¼ W
R_2	1 kΩ	Resistencia ¼ W
R_{17}	8.2 kΩ	Resistencia ¼ W
R_{11}	220 Ω	Resistencia ¼ W
R_3	300 kΩ	Resistencia ¼ W
R_9, R_{10}	2 kΩ	Resistencia ¼ W
R_{12}	2.7 kΩ	Resistencia ¼ W
C_1, C_5	1 uF	Capacitor cerámico
C_4	100 uF	Capacitor cerámico
C_6	10 uF	Capacitor cerámico
C_3	0.1 uF	Capacitor cerámico
U_2	Cristal	Cristal oscilador 20 MHz
U_3	PIC 16F877	Diodo zener 3.1V
U_5	2N3904	Transistor NPN
U_5	TL084CN	Amplificador operacional
U_6	CD4093	Compuerta NAND CMOS
U_1	4075	Compuerta OR CMOS

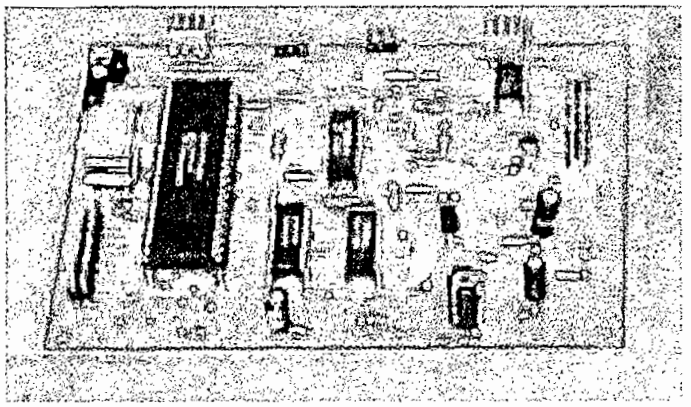
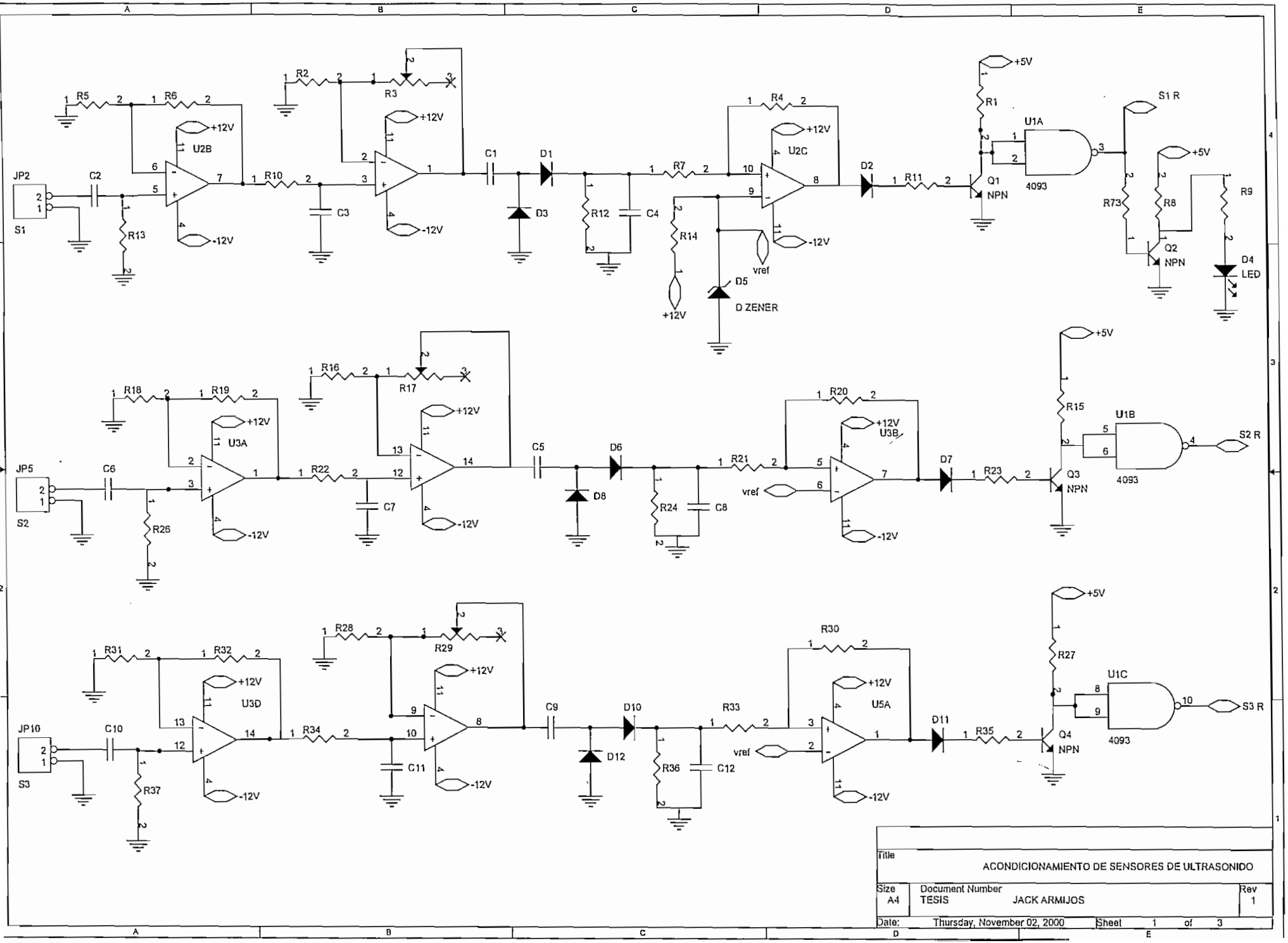
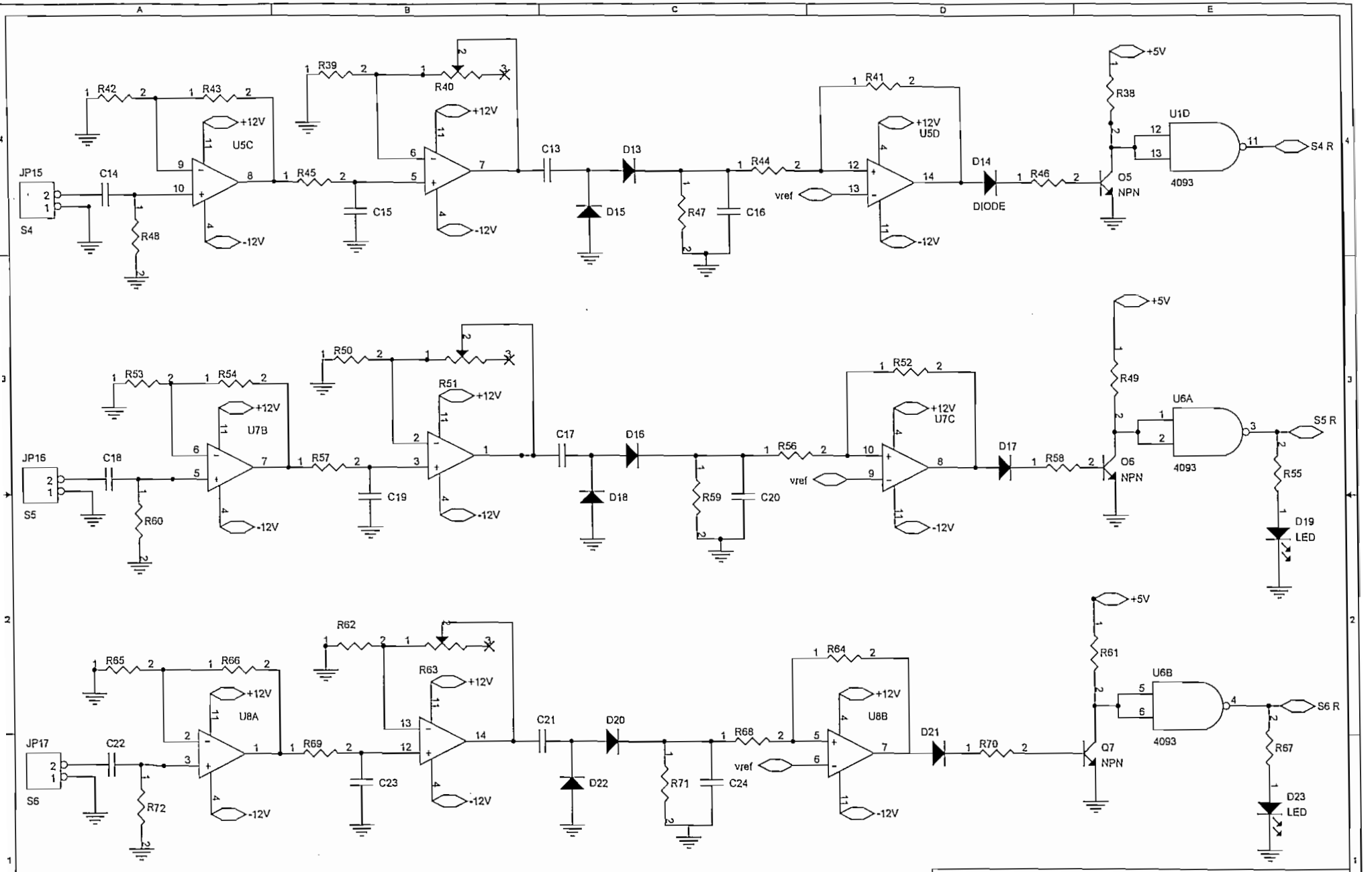
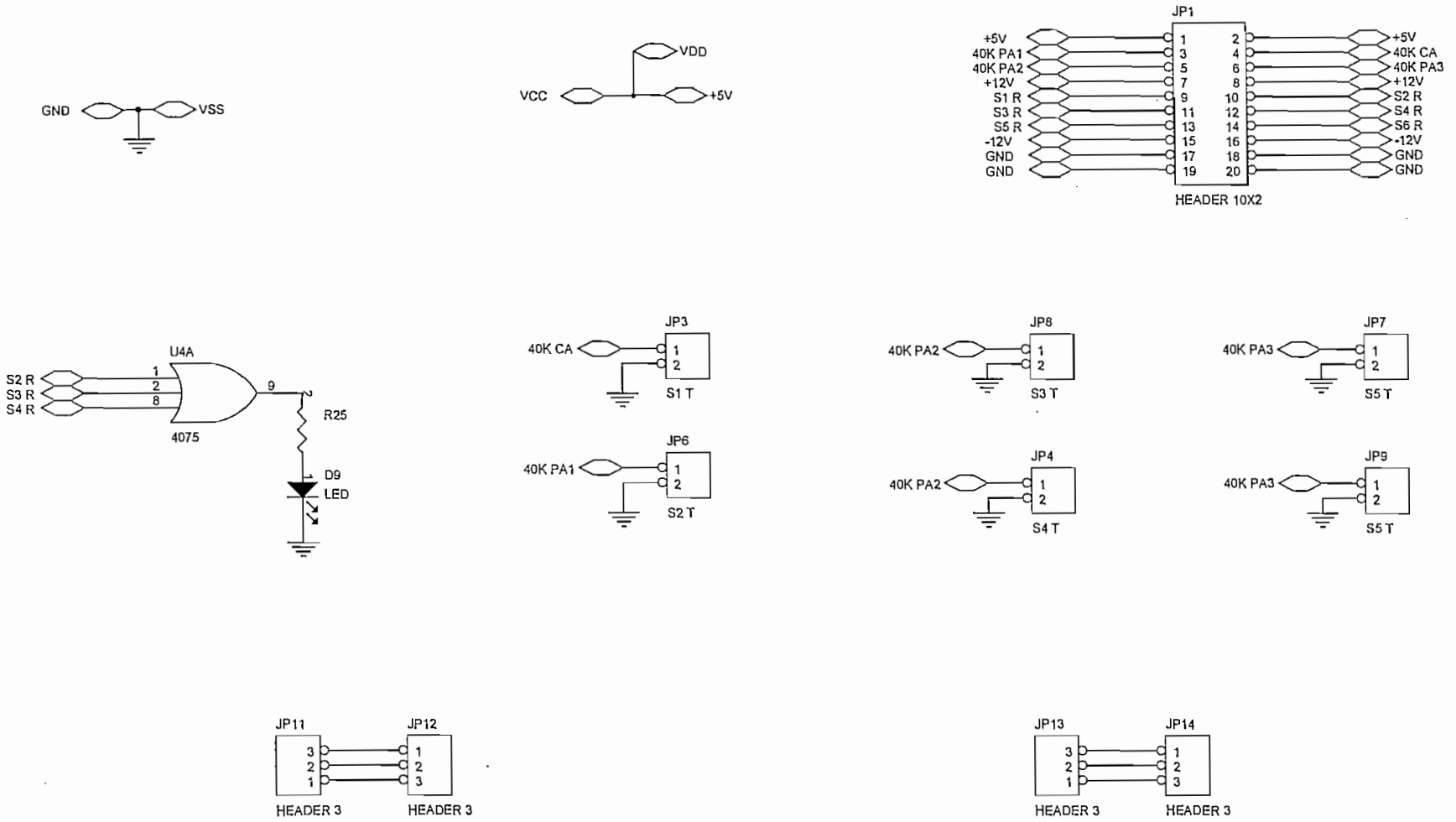


Figura B5: Tarjeta del sistema microprocesado.

ANEXO C


JP2
S1
C2
R5
R6
R13
U2B
+12V
-12V
R10
C3
R2
R3
C1
D1
D3
R12
C4
R7
R14
R4
U2C
vref
D5
D ZENER
D2
R11
R1
U1A
Q1
NPN
4093
S1 R
R73
R8
Q2
NPN
R9
D4
LED
+5V
JP5
S2
C6
R18
R19
U3A
R26
R16
R17
R22
C7
C5
D6
D8
R24
C8
R20
U3B
R21
D7
R23
R15
U1B
Q3
S2 R
JP10
S3
C10
R31
R32
U3D
R37
R28
R29
R34
C11
C9
D10
D12
R36
C12
R33
R30
U5A
D11
R35
R27
U1C
Q4
S3 R
Title
ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO
Size
A4
Document Number
TESIS
JACK ARMIJOS
Rev
1
Date:
Thursday, November 02, 2000
Sheet 1 of 3


JP15
S4
C14
R42
R43
U5C
+12V
-12V
R48
R39
R40
R45
C15
C13
D13
D15
R47
C16
R44
R41
U5D
vref
D14
DIODE
R46
R38
+5V
U1D
4093
Q5
NPN
S4 R
JP16
S5
C18
R53
R54
U7B
R60
R50
R51
R57
C19
C17
D16
D18
R59
C20
R52
U7C
D17
R58
R49
U6A
S5 R
R55
D19
LED
JP17
S6
C22
R65
R66
U8A
R72
R62
R63
R69
C23
C21
D20
D22
R71
C24
R68
R64
U8B
D21
R70
R61
U6B
Q7
S6 R
R67
D23
LED
Title
ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO
Size
A4
Document Number
TESIS
JACK ARMIJOS
Rev
1
Date:
Thursday, November 02, 2000
Sheet
2
of
3



Title	ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES DE ULTRASONIDO		
Size A4	Document Number TESIS	JACK ARMIJOS	Rev 1
Date: Thursday, November 02, 2000	Sheet 3 of 3		

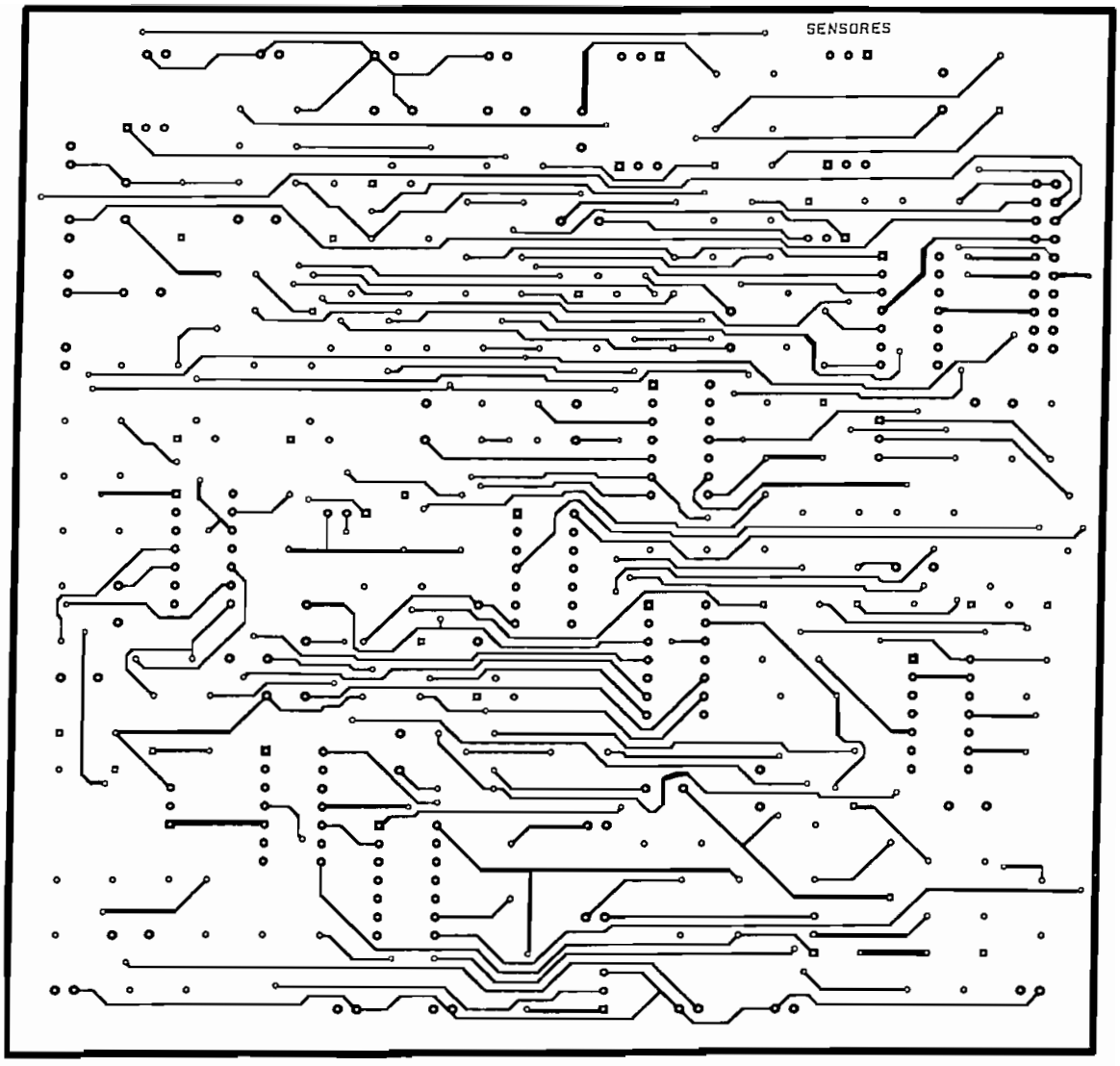


Figura C2: Tarjeta de Acondicionamiento de sensores de ultrasonido. Pista superior.

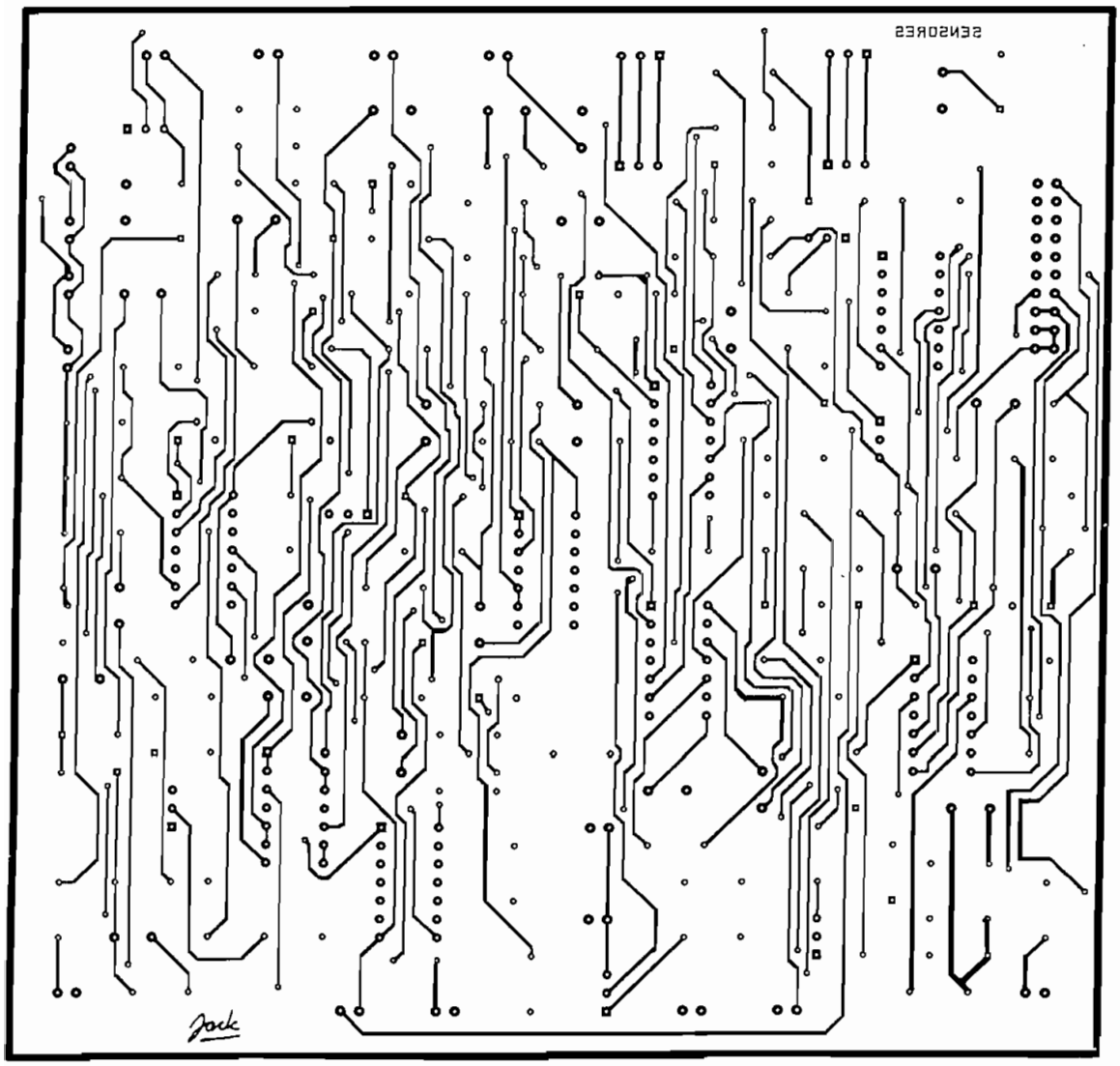


Figura C3: Tarjeta de Acondicionamiento de sensores de ultrasonido. Pista inferior.

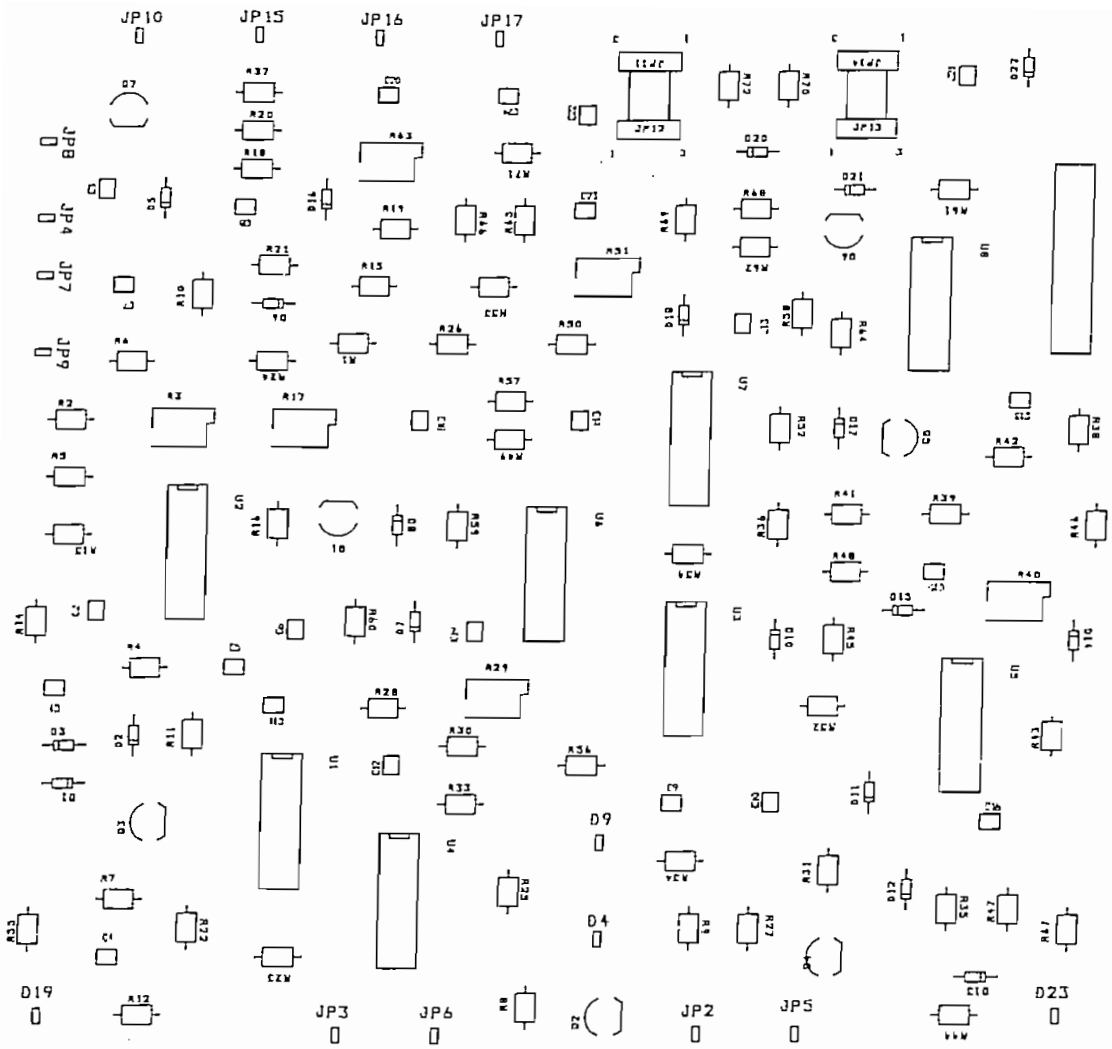


Figura C4: Tarjeta de Acondicionamiento de sensores de ultrasonido. Ubicación de elementos.

Tabla C1: Lista de elementos y valores

ELEMENTO	VALOR	DESCRIPCION
R_{13}, R_{26}, R_{37}, R_{48}, R_{60}, R_{72}	180 Ω	Resistencia ¼ W
R_5, R_{18}, R_{31}, R_{42}, R_{53}, R_{65}	1.5 kΩ	Resistencia ¼ W
R_6, R_{19}, R_{32}, R_{43}, R_{54}, R_{66}	330 kΩ	Resistencia ¼ W
R_{10}, R_{22}, R_{34}, R_{45}, R_{57}, R_{69}	270 Ω	Resistencia ¼ W
R_1, R_2, R_{15}, R_{16}, R_{27}, R_{28}, R_{38}, R_{39}, R_{49}, R_{50}, R_{61}, R_{62}, R_{14}	1 kΩ	Resistencia ¼ W
R_3, R_{17}, R_{29}, R_{40}, R_{51}, R_{63}	50kΩ	Potenciómetro de precisión
R_{12}, R_{24}, R_{36}, R_{47}, R_{59}, R_{71}	4.7 kΩ	Resistencia ¼ W
R_7, R_{21}, R_{33}, R_{44}, R_{56}, R_{68}	15 kΩ	Resistencia ¼ W
R_4, R_{20}, R_{30}, R_{41}, R_{52}, R_{64}	100 kΩ	Resistencia ¼ W
R_{11}, R_{23}, R_{35}, R_{46}, R_{58}, R_{70}	3.9 kΩ	Resistencia ¼ W
C_2, C_6, C_{10}, C_{14}, C_{18}, C_{22}	25nF	Capacitor cerámico
C_3, C_7, C_{11}, C_{15}, C_{19}, C_{23}	13nF	Capacitor cerámico
C_1, C_5, C_9, C_{13}, C_{17}, C_{21}	0.1uF	Capacitor cerámico
C_4, C_8, C_{12}, C_{16}, C_{20}, C_{24}	100uF	Capacitor electrolítico
D_1, D_3, D_6, D_8, D_{10}, D_{12}, D_{13}, D_{15}, D_{16}, D_{18}, D_{20}, D_{22}, D_2, D_7, D_{11}, D_{14}, D_{17}, D_{21}	1N4048	Diodo rectificador
D_5	1N	Diodo zener 3.1V
Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7	2N3904	Transistor NPN
U_2, U_3, U_5, U_7, U_8	TL084CN	Amplificador operacional
U_1, U_6	CD4093	Compuerta NAND CMOS
U_4	4075	Compuerta OR CMOS

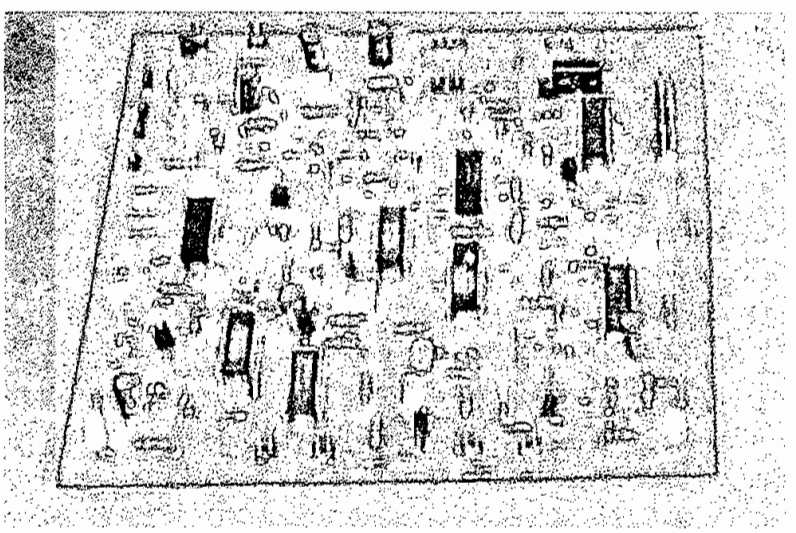


Figura C5: Tarjeta de Acondicionamiento de sensores.

ANEXO D

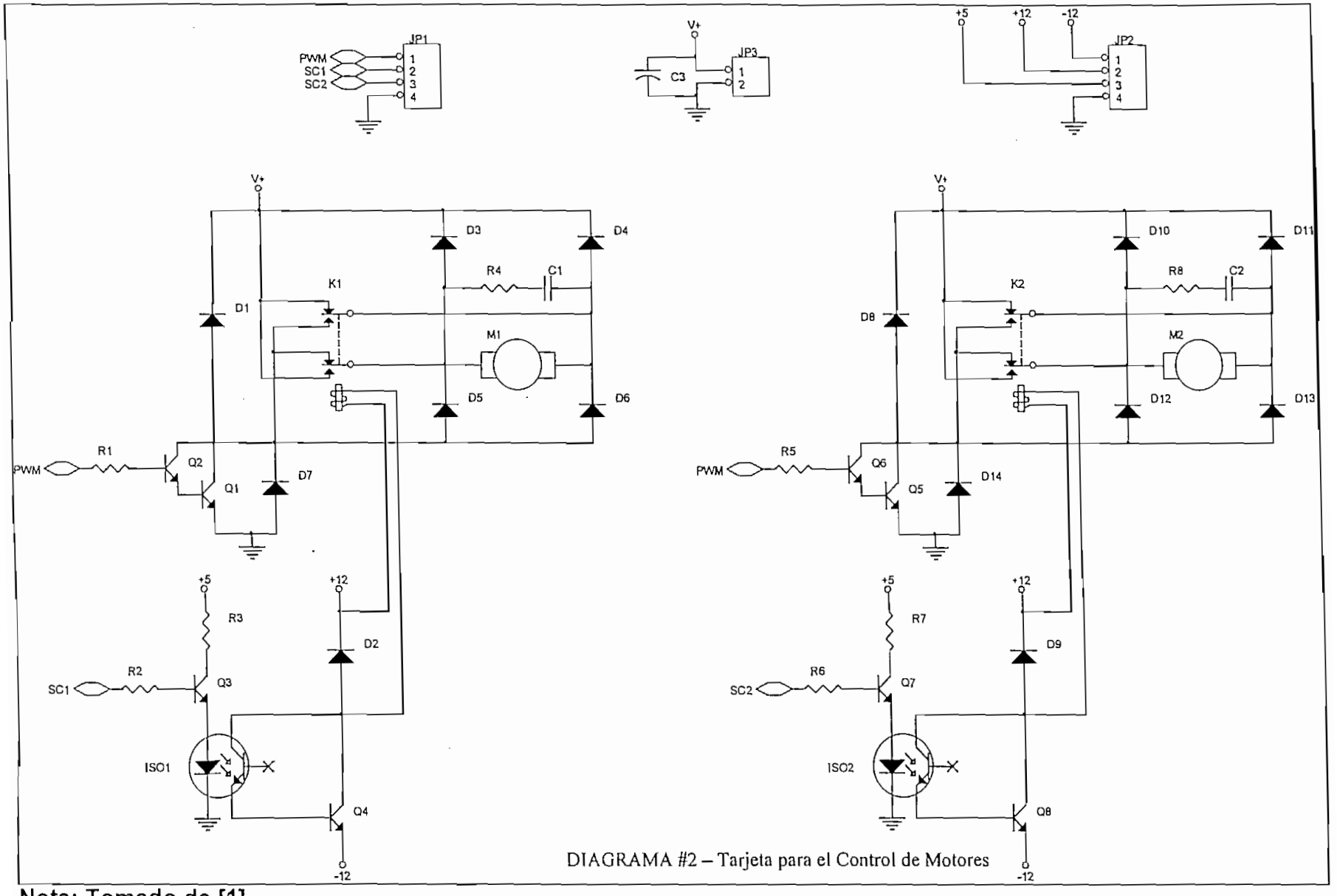
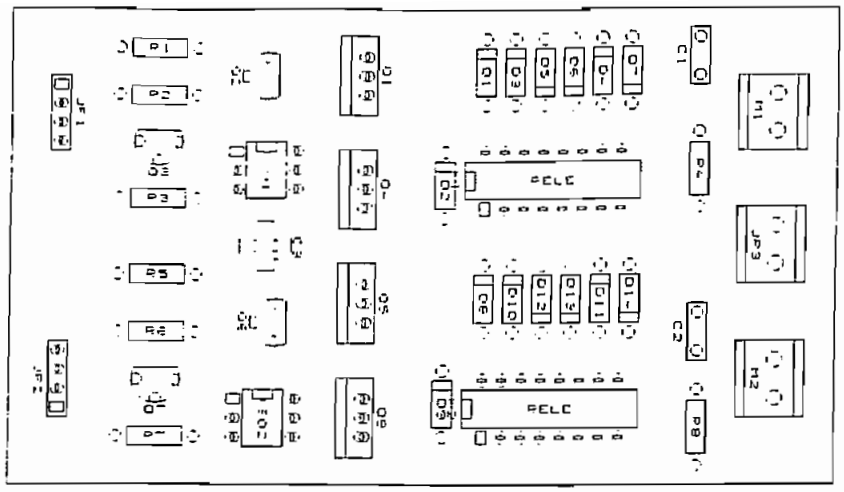


DIAGRAMA #2 – Tarjeta para el Control de Motores

Nota: Tomado de [1]


R1
R2
R3
R5
R6
R7
JP1
JP2
IC2
Q1
Q2
Q3
Q4
D1
D3
D5
D7
D9
D11
D13
D15
D17
D19
D21
D23
D25
D27
D29
D31
D33
D35
D37
D39
D41
D43
D45
D47
D49
D51
D53
D55
D57
D59
D61
D63
D65
D67
D69
D71
D73
D75
D77
D79

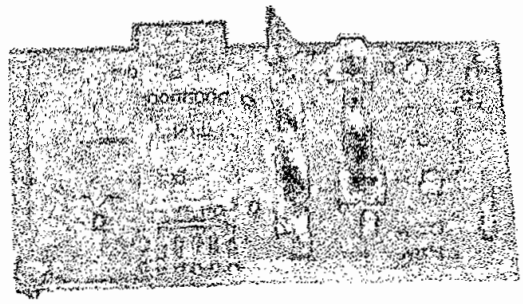


Figura D4: Tarjeta de control de motores.

Tabla D1: Lista de Componentes y valores.

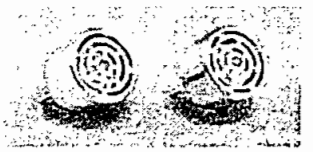
ELEMENTO	VALOR	DESCRIPCION
R1, R5	3,9 KΩ	Resistencias 1/4 W
R2, R6	10 KΩ	Resistencias 1/4 W
R3, R7	220 Ω	Resistencias 1/4 W
R4, R8	150 Ω	Resistencias 1/4 W
C1, C2	0,1 uF	Condensadores cerámicos
C3	10 uF	Condensador electrolítico
D1.. D14	1N4148	Diodos Si, Fast Switching
Q1, Q4, Q5, Q8		Transistores de Potencia TIP 110
Q2, Q3, Q6, Q7		Transistores NPN, 2N3904
SO1, SO2		OPTO, 4N28, NPN TRANS
RELE		Relé LMI 2E00

Nota: Tomado de [1]

ANEXO E

CATEGORY SEARCH

Integrated Circuits
Components
Computer Products
Test & Meas. Equip.



SENSOR,ULTRASONIC,40KHZ,TRAN

Part No. 136653
Product No. 40TR16F

-Case: alumimun flower
-Frequency: 40Khz +.0kHz
-Capacitance: 2000pf+30% transmitter: bandwidth 4.0kHz/112dB, sound pressure level 119dB/40 +1.0kHz (0dB+0.0002 ubar)/10V SN/cm/min
Receiver: bandwidth 3.5kHz @ -71dB, min sensitivity 65dB/40 +1.0kHz (0dB vs 1V ubar) R=3.9k Ohm
-Lead length/spacing: 0.39"
-Case size: 0.47" H x 0.62"Dia

Technical Documents

Technical Document 28 kb

© 2000 Jameco
All rights reserved.

Legal Statement
Privacy Policy

Jameco Part number 136653

ULTRASONIC SENSOR (TRANSMITTER / RECEIVER USE)

MODEL NO.: 40TR16F (CASE:ALUMINUM/FLOWER)

MODEL NO.: 40TR16P (CASE:PLASTIC/BLACK)

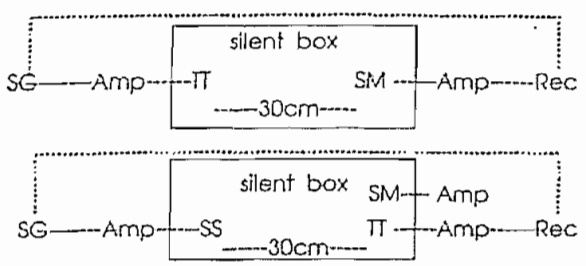
TRANSMITTER UNIT:

. Center Frequency (KHz)	: 40.0±1.0
. Sound Pressure Level (0 dB=0.0002 µbar)	: 119dB/40±1.0KH /10V SN/30cm/Min.
. Band Width (KHz) Min.	: 4.0 / 112 dB
. Capacitance (PF)	: 2000 ± 30%

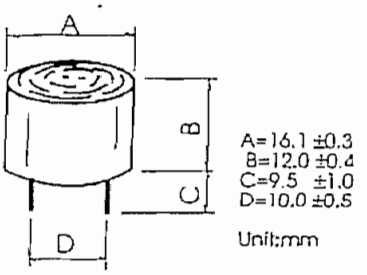
RECEIVER UNIT:

. Center Frequency (KHz)	: 40.0 ± 1.0
. Sensitivity Min. (O dB vs IV µbar)	: 65dB/40 ± 1.0KH (R=3.9KO)
. Band Width (KHz) Min.	: 3.5 / (at -71 dB)
. Capacitance (PF)	: 2000 ± 30%

• TEST CIRCUIT :



OUTLINE DIMENSION:



TT : test transducer
Rec : recorder
SM : std.microphone
Amp : amplifier
SG : signal generator

TT : test transducer
Rec : recorder
SM : std.microphone
Amp : amplifier
SG : signal generator
SS : std.speaker
R : resistance

CATEGORY SEARCH

Integrated Circuits
Components
Computer Products
Test & Meas. Equip.

CONVERTER,DC-DC,9WATT,5VDCin

Part No. 116986
Product No. EM951S

-Input voltage: 5VDC @ 2.1A
-PI input and output filters
-Isolation voltage: 500VDC
-Isolation capacitance: 180pf
-Isolation resistance: 1.0Mohm
-Short circuit protection
-Switching frequency: 20kHz
-Output: +12VDC @ 375mA, -12VDC @ 375mA
-Size: 2.0"L x 2.0"W x 0.5"H
-Weight: 0.1 lbs.

Technical Documents

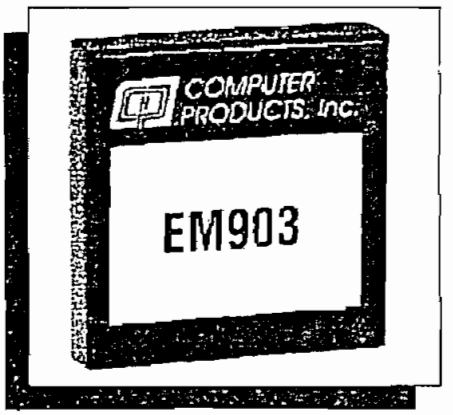
Technical Document 85 kb

© 2000 Jameco
All rights reserved

Jameco Part number 116986

EM900 SERIES
Single and Dual Output
5 to 9 Watt DC/DC Converters

- Pi Input Filter
- 500V Isolation
- Short Circuit Protected
- High Efficiency - 75%
- Non-conductive Plastic Enclosure
- For new designs, please see the NFC Series



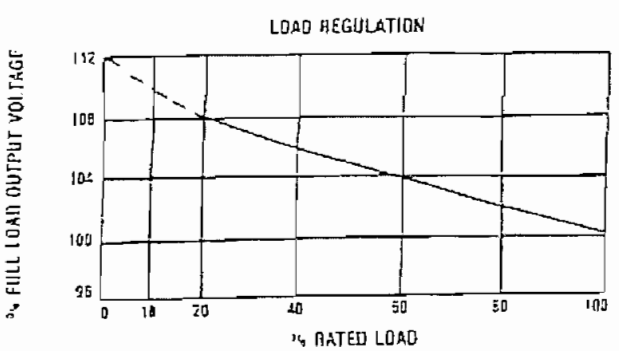
The EM900 series of low cost, general purpose DC/DC converters efficiently deliver 5 to 9 watts total power from a 2" X 2" X 0.4" package. Through careful attention to design, these economy modules achieve 75% typical efficiency. All models feature Pi input filters to minimize reflected input current plus continuous output short circuit protection. They require no output derating over their entire operating temperature range of -25°C to +71°C. These products are ideal for application where a local, low cost power source is needed to be derived from an existing 5V or 12V bus source.

SPECIFICATIONS

All specifications typical at nominal line, full load, and 25°C unless otherwise noted.

Output Specifications	
Voltage Accuracy	±3.0%, max.
Ripple and Noise, 20 MHz BW	100mV P-P, max.
Short Circuit Protection	Continuous
Input Specifications	
Input Voltage Range	
5 VDC Input Models	4.5 VDC-5.5 VDC
12 VDC Input Models	10.8 VDC-13.2 VDC
Reflected Ripple Current, 20 MHz BW	75 mA P-P
Input Filter	Pi Network

General Specifications	
Efficiency	75%
Isolation Voltage	500 VDC, min.
Isolation Capacitance	180 pF
Isolation Resistance	10%r8%r ohms
Switching Frequency	20 kHz, min.
Weight	2 oz. (57 grams)
Case Material	Non-Conductive Black Plastic
Mating Sockets, Case G	MS038-0
Environmental Specifications	
Operating Temperature Range	-25°C to +71°C
Derating	None
Storage Temperature Range	-40°C to 105°C
Humidity, Non-Condensing	20% to 95% RH
Cooling	Free Air Convection



Jameco Part number 116986

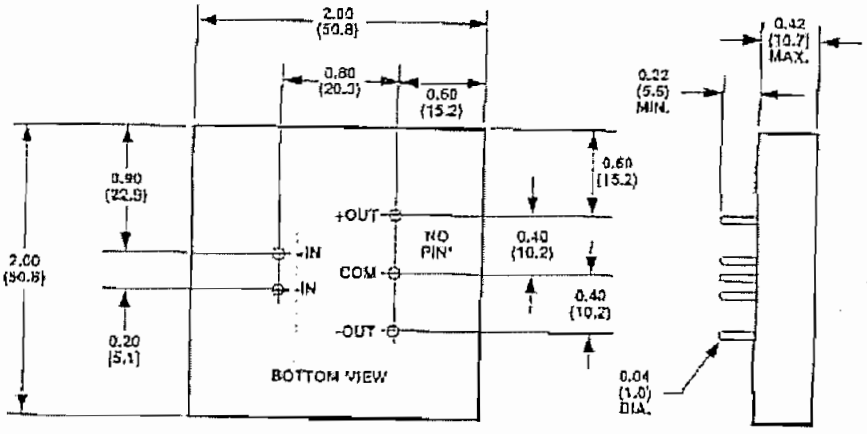
Input Voltage	Output Voltage	Output Current	Input Current No Load	Input Current Full Load	Reflected Ripple Current	Regulation[1] Line	Regulation[1] Load	Alt[2] Pin Out	Case	Model Number
5 VDC	5 VDC	1000 mA	85 mA	1210 mA	75 mA P-P	1.2%	8%	S	G	EM901
5 VDC	12 VDC	600 mA	125 mA	1790 mA	75 mA P-P	1.2%	8%	S	G	EM903
5 VDC	15 VDC	500 mA	125 mA	1790 mA	75 mA P-P	1.2%	8%		G	EM904
5 VDC	±15 VDC	±300 mA	150 mA	2120 mA	75 mA P-P	1.2%	8%	S	G	EM952
12 VDC	±15 VDC	±300 mA	60 mA	875 mA	75 mA P-P	1.2%	8%	S	G	EM962

Notes:

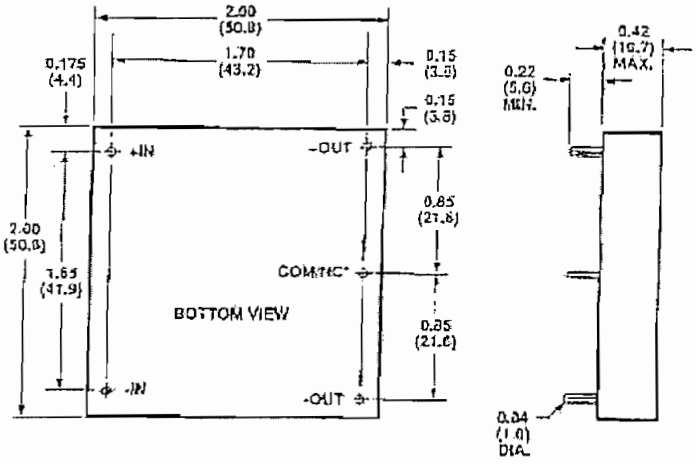
(1) Line regulation is per 1.0% change in input voltage. Load regulation is for load change from 100% to 20%.

(2) Alternate pin-out version, if available, is designated by suffix letter "S". For example, EM901S, etc. See case drawing.

CASE G
Standard Configuration
*No pin on single output models



CASE S
Alternate pin configuration
*No connection on single output models



COMPUTER PRODUCTS
Elkins Street * South Boston * MA 02127 * Phone 617-464-6600 * Fax 617-464-6612

MICROCHIP

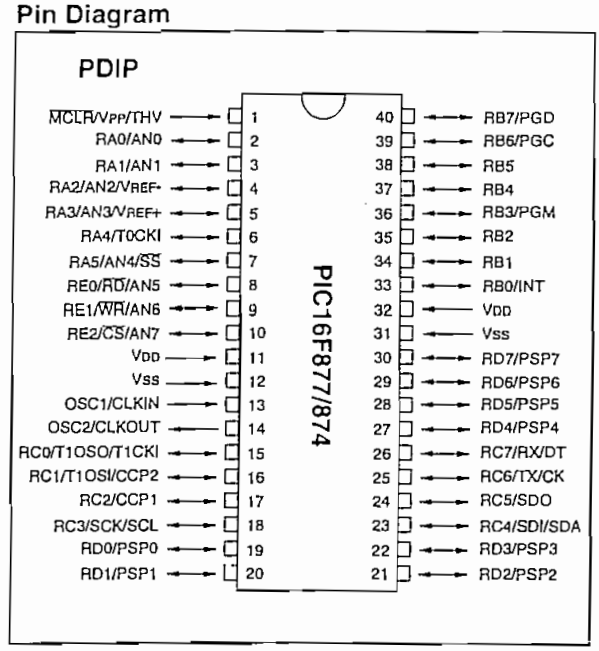
PIC16F87X

28/40-pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

Microcontroller Core Features:

- High-performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
  DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,
  Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)
  Up to 256 x 8 bytes of EEPROM data memory
- ★ **Pinout compatible to the PIC16C73/74/76/77**
- Interrupt capability (up to 14 internal/external interrupt sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect, and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code-protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low-power, high-speed CMOS FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ via two pins
- ★ Only single 5V source needed for programming
- ★ In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption:
  - < 2 mA typical @ 5V, 4 MHz
  - 20 μA typical @ 3V, 32 kHz
  - < 1 μA typical standby current

Pin Diagram



Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
- Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns, Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns, PWM max. resolution is 10-bit
- ★ 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- ★ Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master Mode) and I²C™ (Master/Slave)
- ★ Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

© 1998 Microchip Technology Inc.

Key Features PICmicro™ Mid-Range Reference Manual (DS33023)	PIC16F873	PIC16F874	PIC16F876	PIC16F877
Operating Frequency	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz	DC - 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
FLASH Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory	128	128	256	256
Interrupts	13	14	13	14
I/O Ports	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E	Ports A,B,C	Ports A,B,C,D,E
Timers	3	3	3	3
Capture/Compare/PWM modules	2	2	2	2
Serial Communications	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
Parallel Communications	—	PSP	—	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	5 input channels	8 input channels	5 input channels	8 input channels
Instruction Set	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions	35 Instructions

TABLE 1-2 PIC16F874 AND PIC16F877 PINOUT DESCRIPTION

Pin Name	DIP Pin#	PLCC Pin#	QFP Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
OSC1/CLKIN	13	14	30	I	ST/CMOS(4)	Oscillator crystal input/external clock source input.
OSC2/CLKOUT	14	15	31	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in crystal oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKOUT which has 1/4 the frequency of OSC1, and denotes the instruction cycle rate.
$\overline{MCLR}$/VPP/THV	1	2	18	I/P	ST	Master clear (reset) input or programming voltage input or high voltage test mode control. This pin is an active low reset to the device.
						PORTA is a bi-directional I/O port.
RA0/AN0	2	3	19	I/O	TTL	RA0 can also be analog input0
RA1/AN1	3	4	20	I/O	TTL	RA1 can also be analog input1
RA2/AN2/VREF-	4	5	21	I/O	TTL	RA2 can also be analog input2 or negative analog reference voltage
RA3/AN3/VREF+	5	6	22	I/O	TTL	RA3 can also be analog input3 or positive analog reference voltage
RA4/T0CKI	6	7	23	I/O	ST	RA4 can also be the clock input to the Timer0 timer/counter. Output is open drain type.
RA5/$\overline{SS}$/AN4	7	8	24	I/O	TTL	RA5 can also be analog input4 or the slave select for the synchronous serial port.
						PORTB is a bi-directional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-up on all inputs.
RB0/INT	33	36	8	I/O	TTL/ST(1)	RB0 can also be the external interrupt pin.
RB1	34	37	9	I/O	TTL	
RB2	35	38	10	I/O	TTL	
RB3/PGM	36	39	11	I/O	TTL	RB3 can also be the low voltage programming input
RB4	37	41	14	I/O	TTL	Interrupt on change pin.
RB5	38	42	15	I/O	TTL	Interrupt on change pin.
RB6/PGC	39	43	16	I/O	TTL/ST(2)	Interrupt on change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming clock.
RB7/PGD	40	44	17	I/O	TTL/ST(2)	Interrupt on change pin or In-Circuit Debugger pin. Serial programming data.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
— = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as an external interrupt.
2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in serial programming mode.
3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as general purpose I/O and a TTL input when used in the Parallel Slave Port mode (for interfacing to a microprocessor bus).
4: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC oscillator mode and a CMOS input otherwise.

 © 1998 Microchip Technology Inc.

TABLE 1-2 PIC16F874 AND PIC16F877 PINOUT DESCRIPTION (Cont.'d)

Pin Name	DIP Pin#	PLCC Pin#	QFP Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
						PORTC is a bi-directional I/O port.
RC0/T1OSO/T1CKI	15	16	32	I/O	ST	RC0 can also be the Timer1 oscillator output or a Timer1 clock input.
RC1/T1OSI/CCP2	16	18	35	I/O	ST	RC1 can also be the Timer1 oscillator input or Capture2 input/Compare2 output/PWM2 output.
RC2/CCP1	17	19	36	I/O	ST	RC2 can also be the Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output.
RC3/SCK/SCL	18	20	37	I/O	ST	RC3 can also be the synchronous serial clock input/output for both SPI and I^2C modes.
RC4/SDI/SDA	23	25	42	I/O	ST	RC4 can also be the SPI Data In (SPI mode) or data I/O (I^2C mode).
RC5/SDO	24	26	43	I/O	ST	RC5 can also be the SPI Data Out (SPI mode).
RC6/TX/CK	25	27	44	I/O	ST	RC6 can also be the USART Asynchronous Transmit or Synchronous Clock.
RC7/RX/DT	26	29	1	I/O	ST	RC7 can also be the USART Asynchronous Receive or Synchronous Data.
						PORTD is a bi-directional I/O port or parallel slave port when interfacing to a microprocessor bus.
RD0/PSP0	19	21	38	I/O	ST/TTL(3)	
RD1/PSP1	20	22	39	I/O	ST/TTL(3)	
RD2/PSP2	21	23	40	I/O	ST/TTL(3)	
RD3/PSP3	22	24	41	I/O	ST/TTL(3)	
RD4/PSP4	27	30	2	I/O	ST/TTL(3)	
RD5/PSP5	28	31	3	I/O	ST/TTL(3)	
RD6/PSP6	29	32	4	I/O	ST/TTL(3)	
RD7/PSP7	30	33	5	I/O	ST/TTL(3)	
						PORTE is a bi-directional I/O port.
RE0/$\overline{RD}$/AN5	8	9	25	I/O	ST/TTL(3)	RE0 can also be read control for the parallel slave port, or analog input5.
RE1/$\overline{WR}$/AN6	9	10	26	I/O	ST/TTL(3)	RE1 can also be write control for the parallel slave port, or analog input6.
RE2/$\overline{CS}$/AN7	10	11	27	I/O	ST/TTL(3)	RE2 can also be select control for the parallel slave port, or analog input7.
VSS	12,31	13,34	6,29	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	11,32	12,35	7,28	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
NC	—	1,17,28, 40	12,13, 33,34		—	These pins are not internally connected. These pins should be left unconnected.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
— = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as an external interrupt.
2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in serial programming mode.
3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as general purpose I/O and a TTL input when used in the Parallel Slave Port mode (for interfacing to a microprocessor bus).
4: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC oscillator mode and a CMOS input otherwise.

...case, the execution takes two instruction cycles with the second cycle executed as a NOP. One instruction cycle consists of four oscillator periods. Thus, for an oscillator frequency of 4 MHz, the normal instruction execution time is 1 µs. If a conditional test is true or the program counter is changed as a result of an instruction, the instruction execution time is 2 µs.

13.0 INSTRUCTION SET SUMMARY

Each PIC16CXXX instruction is a 14-bit word divided into an OPCODE which specifies the instruction type and one or more operands which further specify the operation of the instruction. The PIC16CXX instruction set summary in Table 13-2 lists **byte-oriented**, **bit-oriented**, and **literal and control** operations. Table 13-1 shows the opcode field descriptions.

For **byte-oriented** instructions, 'f' represents a file register designator and 'd' represents a destination designator. The file register designator specifies which file register is to be used by the instruction.

The destination designator specifies where the result of the operation is to be placed. If 'd' is zero, the result is placed in the W register. If 'd' is one, the result is placed in the file register specified in the instruction.

For **bit-oriented** instructions, 'b' represents a bit field designator which selects the number of the bit affected by the operation, while 'f' represents the number of the file in which the bit is located.

For **literal and control** operations, 'k' represents an eight or eleven bit constant or literal value.

TABLE 13-1 OPCODE FIELD DESCRIPTIONS

Field	Description
f	Register file address (0x00 to 0x7F)
W	Working register (accumulator)
b	Bit address within an 8-bit file register
k	Literal field, constant data or label
x	Don't care location (= 0 or 1) The assembler will generate code with x = 0. It is the recommended form of use for compatibility with all Microchip software tools.
d	Destination select; d = 0: store result in W, d = 1: store result in file register f. Default is d = 1
PC	Program Counter
$\overline{TO}$	Time-out bit
$\overline{PD}$	Power-down bit

The instruction set is highly orthogonal and is grouped into three basic categories:

- **Byte-oriented** operations
- **Bit-oriented** operations
- **Literal and control** operations

All instructions are executed within one single instruction cycle, unless a conditional test is true or the program counter is changed as a result of an instruction. In this case, the execution takes two instruction cycles with the second cycle executed as a NOP. One instruction cycle consists of four oscillator periods. Thus, for an oscillator frequency of 4 MHz, the normal instruction execution time is 1 µs. If a conditional test is true or the program counter is changed as a result of an instruction, the instruction execution time is 2 µs.

Table 13-2 lists the instructions recognized by the MPASM assembler.

Figure 13-1 shows the general formats that the instructions can have.

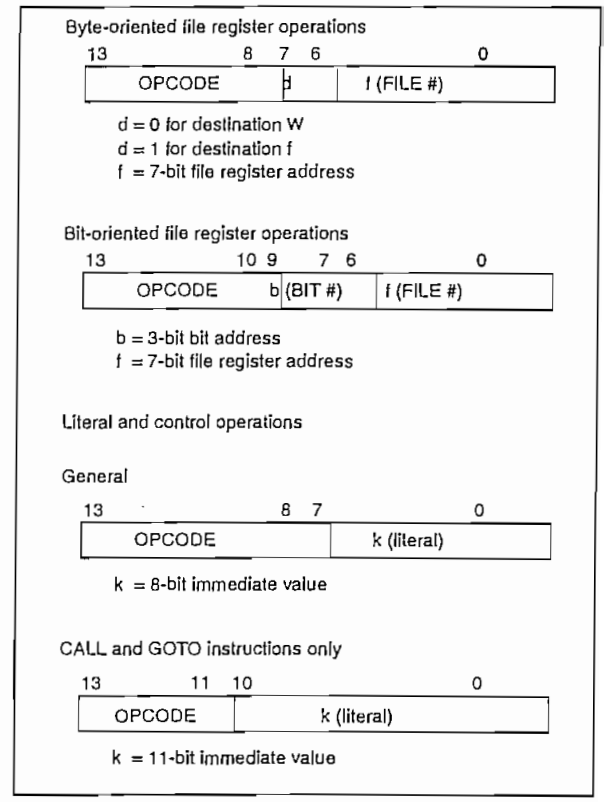
> **Note:** To maintain upward compatibility with future PIC16CXXX products, do not use the `OPTION` and `TRIS` instructions.

All examples use the following format to represent a hexadecimal number:

0xhh

where h signifies a hexadecimal digit.

FIGURE 13-1: GENERAL FORMAT FOR INSTRUCTIONS



A description of each instruction is available in the PICmicro™ Mid-Range Reference Manual, (DS33023).

TABLE 13-2 PIC16CXXX INSTRUCTION SET

Mnemonic, Operands		Description	Cycles	14-Bit Opcode MSb			LSb	Status Affected	Notes
BYTE-ORIENTED FILE REGISTER OPERATIONS									
ADDWF	f, d	Add W and f	1	00	0111	dfff	ffff	C,DC,Z	1,2
ANDWF	f, d	AND W with f	1	00	0101	dfff	ffff	Z	1,2
CLRF	f	Clear f	1	00	0001	1fff	ffff	Z	2
CLRW	-	Clear W	1	00	0001	0xxx	xxxx	Z	
COMF	f, d	Complement f	1	00	1001	dfff	ffff	Z	1,2
DECF	f, d	Decrement f	1	00	0011	dfff	ffff	Z	1,2
DECFSZ	f, d	Decrement f, Skip if 0	1(2)	00	1011	dfff	ffff		1,2,3
INCF	f, d	Increment f	1	00	1010	dfff	ffff	Z	1,2
INCFSZ	f, d	Increment f, Skip if 0	1(2)	00	1111	dfff	ffff		1,2,3
IORWF	f, d	Inclusive OR W with f	1	00	0100	dfff	ffff	Z	1,2
MOVF	f, d	Move f	1	00	1000	dfff	ffff	Z	1,2
MOVWF	f	Move W to f	1	00	0000	1fff	ffff		
NOP	-	No Operation	1	00	0000	0xx0	0000		
RLF	f, d	Rotate Left f through Carry	1	00	1101	dfff	ffff	C	1,2
RRF	f, d	Rotate Right f through Carry	1	00	1100	dfff	ffff	C	1,2
SUBWF	f, d	Subtract W from f	1	00	0010	dfff	ffff	C,DC,Z	1,2
SWAPF	f, d	Swap nibbles in f	1	00	1110	dfff	ffff		1,2
XORWF	f, d	Exclusive OR W with f	1	00	0110	dfff	ffff	Z	1,2
BIT-ORIENTED FILE REGISTER OPERATIONS									
BCF	f, b	Bit Clear f	1	01	00bb	bfff	ffff		1,2
BSF	f, b	Bit Set f	1	01	01bb	bfff	ffff		1,2
BTFSC	f, b	Bit Test f, Skip if Clear	1 (2)	01	10bb	bfff	ffff		3
BTFSS	f, b	Bit Test f, Skip if Set	1 (2)	01	11bb	bfff	ffff		3
LITERAL AND CONTROL OPERATIONS									
ADDLW	k	Add literal and W	1	11	111x	kkkk	kkkk	C,DC,Z	
ANDLW	k	AND literal with W	1	11	1001	kkkk	kkkk	Z	
CALL	k	Call subroutine	2	10	0kkk	kkkk	kkkk		
CLRWDT	-	Clear Watchdog Timer	1	00	0000	0110	0100	$\overline{TO}$,$\overline{PD}$	
GOTO	k	Go to address	2	10	1kkk	kkkk	kkkk		
IORLW	k	Inclusive OR literal with W	1	11	1000	kkkk	kkkk	Z	
MOVLW	k	Move literal to W	1	11	00xx	kkkk	kkkk		
RETFIE	-	Return from interrupt	2	00	0000	0000	1001		
RETLW	k	Return with literal in W	2	11	01xx	kkkk	kkkk		
RETURN	-	Return from Subroutine	2	00	0000	0000	1000		
SLEEP	-	Go into standby mode	1	00	0000	0110	0011	$\overline{TO}$,$\overline{PD}$	
SUBLW	k	Subtract W from literal	1	11	110x	kkkk	kkkk	C,DC,Z	
XORLW	k	Exclusive OR literal with W	1	11	1010	kkkk	kkkk	Z	

Note 1: When an I/O register is modified as a function of itself (e.g., `MOVF PORTB, 1`), the value used will be that value present on the pins themselves. For example, if the data latch is '1' for a pin configured as input and is driven low by an external device, the data will be written back with a '0'.

2: If this instruction is executed on the TMR0 register (and, where applicable, d = 1), the prescaler will be cleared if assigned to the Timer0 Module.

3: If Program Counter (PC) is modified or a conditional test is true, the instruction requires two cycles. The second cycle is executed as a NOP.

 © 1998 Microchip Technology Inc.