

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE INGENIERÍA**

### **PROTOTIPO DE UNA SILLA DE RUEDAS SEMIAUTÓNOMA PARA PERSONAS MINUSVÁLIDAS NO VIDENTES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**BÁRCENES GUEVARA JIMMY CRISTIAN  
VÁSQUEZ FUELTALA DIEGO ANTONIO**

**DIRECTOR: Ing. Nelson Sotomayor**

**Quito, Octubre 2005**

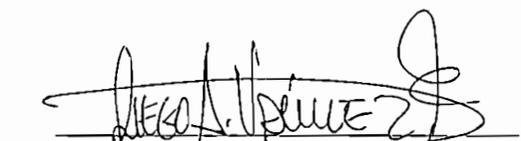
## DECLARACIÓN

Nosotros, Bárcenes Guevara Jimmy y Vásquez Fuellela Diego, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros 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.



Bárcenes Jimmy



Vásquez Diego

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Bárcenes Guevara Jimmy y Vásquez Fuelta Diego, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Nelson Sotomayor', is written over a horizontal line.

**Ing. Nelson Sotomayor**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **Agradecimientos**

*A Dios por concederme un día más de vida, para terminar esta etapa de mi vida.*

*A Antonio, Blanca, Kelly, Adriana y Raquel, por apoyarme siempre, sin condiciones.*

*A los maestros, quienes a parte de compartir sus conocimientos sin condiciones, me brindaron su amistad y sabios consejos para un buen futuro profesional.*

*A todos mis compañeros y los verdaderos amigos, por hacer que todo el tiempo de estadía en nuestra "POLI", fuera satisfactorio, inolvidable y de un real aprendizaje continuo en el valorar a las personas por lo que son y por lo que pueden llegar a brindarnos.*

***De todo corazón GRACIAS y Dios los Bendiga***

***Diego***

*Dedico este trabajo a mis padres **Antonio** y **Blanca**, que me apoyaron incondicionalmente y de quienes he recibido la mejor herencia; el de luchar por ser integro en la vida. Para ustedes. que se merecen lo mejor de mí, los amo.*

**Diego**

## **Agradecimientos**

*A Elva Libertad mi madre, la muestra más grande de lucha, sacrificio y entrega, a Ángel Celio mi padre, que me enseñó la humildad y a valorar a cada persona, a Edison, Geovanny y Yajaira, mis hermanos-amigos muestra de unidad, a esta mi familia, mis ángeles personales, quienes me han dado su cariño y apoyo incondicional.*

*A mis amigos con los que compartí buenos y malos momentos, pero que siempre estuvieron brindándome su apoyo, contagiándome su risa, dándome un consejo.*

*A los profesores que me brindaron su conocimiento y amistad durante esta etapa universitaria, y a los que estuvieron antes de todo esto.*

*A mí querida "POLI" por darme la oportunidad de ser un alumno más de sus aulas, a las que siempre recordaré con cariño*

***A todos ustedes mil gracias por ser parte de mis maestros en esta  
"ESCUELA DE LA VIDA"***

***Jimmy***

*Dedico este trabajo a mi familia que me ha dado su apoyo incondicional, de manera especial a mis padres **Elva** y **Ángel**, que han sido un ejemplo de lucha y perseverancia. Gracias por todo lo que me han dado y me han enseñado. Siempre los llevo conmigo, los amo.*

**Jimmy**

## CONTENIDO

Resumen	iii
Presentación	iv

### **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS BÁSICOS**

1.1 Sensores	1
1.1.1 Sensores ópticos	2
1.1.2 Sensores de ultrasonido	3
1.1.3 Sensores de imágenes	7
1.1.4 Encoder	8
1.1.5 Sensores magnéticos	9
1.1.6 Acelerómetro	10
1.1.7 Giróscopo	11
1.1.8 Sistemas de posicionamiento global (GPS)	11
1.2 Actuadores	12
1.2.1 Sistemas de actuación mecánica	12
1.2.2 Actuadores en sistemas eléctricos	12

### **CAPÍTULO 2. SISTEMA MECÁNICO Y ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO**

2.1 Sistema mecánico	13
2.1.1 Normas para el uso de sillas de ruedas	13
2.1.2 Base estructural de la silla de ruedas	16
2.1.3 Ventajas mecánicas del sistema	17
2.1.4 Limitaciones mecánicas del sistema	18
2.2 Sistema eléctrico	19
2.2.1 Diagramas de bloques de los módulos implementados	19
2.2.1.1 Módulo de comando	20
2.2.1.2 Módulo de sensorización por ultrasonido	25
2.2.1.3 Módulo de procesamiento central	36
2.2.1.4 Módulo de potencia	38

2.2.2	Ventajas eléctricas del sistema	57
2.2.3	Limitaciones eléctricas del sistema	58

### **CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA Y PROGRAMAS DE CONTROL**

3.1	Arquitectura	59
3.1.1	Funcionamiento Normal de la silla	61
3.1.2	Selección de los comandos	63
3.1.3	Funciones requeridas del PIC para el control	65
3.2	Lógica de funcionamiento	66
3.2.1	Activación de motores	67
3.2.2	Configuración de registros, modos y módulos	67
3.3	Programa de control	73
3.3.1	Programa principal y Subrutinas	73
3.4	Diagramas de flujo	78

### **CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS**

4.1	Pruebas de los sensores de ultrasonido	91
4.2	Ubicación experimental de los sensores	93
4.3	Detección de diferentes materiales	94
4.4	Pruebas en los motores	95
4.5	Lista de elementos y precios	96
4.6	Resultados obtenidos	98

### **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones	100
5.2	Recomendaciones	103

### **Referencias Bibliográficas**

### **Anexos**

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo de silla de ruedas semiautónoma que sirva de guía a personas minusválidas no videntes para permitirles tener mayor autonomía en lo que a su movilización se refiere.

El diseño se basa en trabajos anteriores de robótica móvil, se aplica el acondicionamiento de señales de ultrasonido, para controlar el funcionamiento de los motores que utiliza la silla de ruedas.

Se desarrollan metodologías para que el prototipo tenga la capacidad de detectar obstáculos cercanos que se encuentren en su trayectoria, mediante el procesamiento del ultrasonido obtenido de un arreglo de sonares, para tener una representación apropiada de señales y del medio en el que se desenvolverá.

Esta representación ayudará a reconocer obstáculos y hacer que la silla de ruedas tome ciertas acciones para evitarlos, el prototipo en caso de encontrar obstáculos tendrá dos opciones: de existir un solo camino este tomará la decisión, de existir más de un camino este informará al usuario para que sea él quien tome la decisión.

## PRESENTACIÓN

Debido a la necesidad que existe en nuestro medio de desarrollar técnicas, métodos, mecanismos en el proceso de asistencia a personas minusválidas no videntes, en el presente trabajo se realiza un estudio de los fundamentos que intervienen en el desarrollo de la asistencia.

El presente documento está dividido en cinco partes fundamentales. En el primer capítulo se realiza una breve descripción de los tipos de sensores y técnicas de detección más usados en aplicaciones similares y una descripción un poco más profunda del funcionamiento y utilización de los sensores de ultrasonido, así como también se presentan algunas ayudas electrónicas de traslado y ayudas de navegación global para ciegos, ya desarrolladas.

En el segundo capítulo se toma todas las especificaciones, condiciones y normas para ayudar a moverse a personas con deficiencias físicas, se presenta también una descripción de la parte mecánica del prototipo, así como del hardware donde se detallan los diferentes circuitos utilizados para el mando de la silla, acondicionamiento de los sensores de ultrasonido, control del prototipo y manejo de los motores, además se presentan los respectivos cálculos para cumplir con las normas y realizar el diseño de los diferentes circuitos electrónicos.

En el tercer capítulo se presenta una descripción del funcionamiento del prototipo, así como de la arquitectura y los algoritmos de control que se ejecutan en los dos microcontroladores de la tarjeta principal que gobernará al sistema.

Las pruebas y resultados del trabajo realizado se presentan en el cuarto capítulo.

En el último capítulo se presentan las conclusiones obtenidas de la realización de este trabajo y recomendaciones para futuros trabajos de robótica móvil.

Posteriormente se adjunta las referencias bibliográficas utilizadas para la realización del presente trabajo y los anexos que contienen información tanto de los circuitos impresos, hojas de datos de los elementos utilizados, aspectos físicos y los detalles económicos del prototipo.

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTOS BÁSICOS

Los seres vivos cuentan con una serie de sentidos que les permiten obtener información del ambiente y sus sistemas de navegación utilizan la información obtenida de estos sentidos para poder conocer el mundo.

Entre los problemas que se presentan en la navegación autónoma está el reconocimiento del ambiente o del mundo en el que se desempeña el robot y la detección de obstáculos tanto en ambientes estáticos como dinámicos.

Para resolver estos problemas el robot debe estar equipado con una serie de sensores, distribuidos de tal forma que le ayuden a reconocer su entorno obteniendo información del mundo externo.

En este capítulo se describen los diferentes tipos de sensores usados para la navegación de robots autónomos, además se explican algunos métodos y técnicas para la utilización de estos sensores en la detección de ambientes.

### 1.1 SENSORES

Los sensores son dispositivos que miden propiedades físicas (distancias, sonido, magnetismo, olores, presiones, altitud, velocidad, inclinación, etc.). Las mismas propiedades pueden medirse por varios sensores, algunos son limitados, ruidosos e inexactos aunque en las últimas décadas se han mejorado sus características, buscando la precisión. [1]

La sensorización implica diversas disciplinas como la electrónica: Un sensor de colisión (detectar si pasa o no corriente), procesamiento de señales: Un micrófono (separar la voz del ruido), informática: Un cámara que devuelve los bordes (reconocer un objeto).

Para poder aplicar la sensorización en sistemas de evasión de obstáculos, movilización autónoma o semi-autónoma y en la robótica se tienen presentes aspectos fundamentales como son: la medición de distancias por medio de ultrasonido basado en medición del tiempo de eco del ultrasonido o también por la intensidad del eco de retorno; infrarrojos y la intensidad recibida de las señales del infrarrojo, dos cámaras (visión estereoscópica) para sistemas sofisticados de imágenes o perfiles basado en los colores primarios y sus definiciones, triangulación con un láser y una cámara fija para detectar el movimiento en donde todo lo demás es estático, medición con láser para detectar la temperatura de un ser vivo en una área inhabitada.

De acuerdo a investigaciones realizadas los tipos de sensores y técnicas de detección más usados en aplicaciones similares a los requerimientos de este proyecto se describen a continuación:

### 1.1.1 SENSORES ÓPTICOS

Los sensores ópticos más usados son las fotorresistencias, el fotodiodo y los fototransistores, a su vez los fotodiodos y los fototransistores se usan como sensores de infrarrojo en los sistemas de navegación.

Los sensores de Infrarrojos pueden utilizarse como sensores On-Off, es decir solo pueden dar información sobre la existencia o no de un obstáculo, si se desea tener información sobre la distancia se debe recurrir a métodos de triangulación lo cual se hace muy complejo y poco preciso, debido a esto no son muy utilizados para este propósito. Su aplicación principal esta en la detección de obstáculos para evitar colisiones. [2]

Para aplicaciones similares al presente proyecto es muy usado un par emisor (fotodiodo)-receptor (fototransistor) de reflexión, el sensor se calibra para detectar obstáculos a una distancia determinada por medio de una resistencia variable que regula la corriente aplicada al emisor.

El problema que tiene este tipo de sensores es que pueden recibir interferencia del ambiente.

Para evitar esto se debe recurrir a técnicas de modulación donde se transmite un tren de pulsos de determinada frecuencia, de tal manera que el receptor debe sentir pulsos de la misma frecuencia que el emisor por medio de un filtro con lo cual se discrimina entre el ruido y la interferencia del ambiente y la reflexión causada por un obstáculo real.

### 1.1.2 SENSORES DE ULTRASONIDO

Los sensores de ultrasonido son muy utilizados para la detección de obstáculos, con la ventaja de que pueden dar una información de la distancia a la cual se encuentra el obstáculo, para ello utilizan las propiedades de las ondas de sonido y a partir de la información de la velocidad del sonido y del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción se obtiene información de la distancia.

Por lo general se usa un transductor como emisor y otro como receptor, aunque también se puede usar un solo transductor como emisor y receptor, en este caso tras la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo para que las vibraciones en el sensor desaparezcan y luego se prepara para recibir el eco producido por el obstáculo, cuando se va a trabajar con transductores de ultrasonido se debe tener en cuenta los siguientes parámetros (ver Figura 1.1)

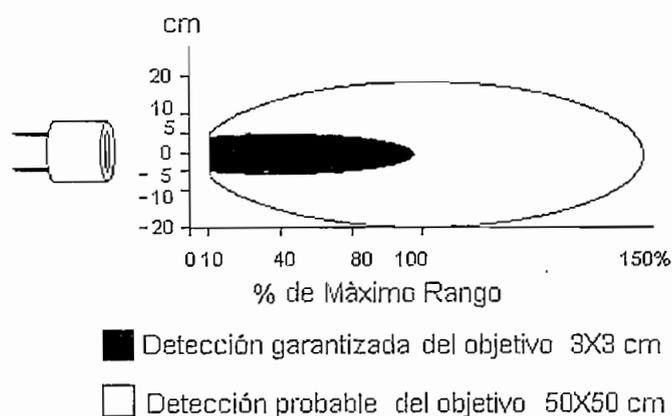


Figura 1.1 Parámetros de un transductor de US

## **Ángulo del cono**

El campo de actuación del pulso que se emite desde un transductor de ultrasonido tiene forma cónica. El eco que se recibe como respuesta a la reflexión del sonido indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra dentro del cono acústico y no especifica en ningún momento la localización angular del mismo

## **Zona muerta**

Cuando se usa el mismo transductor como emisor y receptor, existe una distancia mínima, determinada por el tiempo de relajación del transductor desde el momento en que deja de emitir hasta que está listo para recibir, todos los objetos que estén a una distancia menor a la distancia mínima no pueden ser detectados. Cuando se usa un transductor como emisor y otro como receptor hay una distancia mínima determinada por el ángulo y la posición relativa entre los dos transductores. El área determinada por la distancia mínima es conocida como zona muerta.

## **Distancia máxima**

La distancia máxima de detección está determinada por la potencia y la frecuencia de trabajo a la que se emite, a mayor frecuencia se puede cubrir mayor distancia, la frecuencia de trabajo más usada es 40 KHz, aunque existen en el mercado transductores hasta de 250 KHz. Para la recepción del eco de ultrasonido se usan por lo general dos métodos, el método de detección por umbral y el método de detección de tono.

### *Detección por umbral*

En este método, existe el circuito de recepción que amplifica y filtra la señal del receptor y el circuito detector de nivel, basado en un comparador de tensión. El principal problema de este método es que es muy sensible al ruido lo que puede generar detecciones erróneas.

### *Detección por tonos*

Se puede eliminar el problema del método anterior, basándose en que tanto la señal de ultrasonido transmitida como la recibida poseen una frecuencia fija, determinada por las características propias de los transductores ultrasónicos, también resulta posible discriminar el eco del ruido en base a su frecuencia. Esto lo independiza también de la atenuación, para ello se utiliza un detector de tonos en el circuito receptor.

Una gran ventaja de los sensores de ultrasonido, es que al dar información de la distancia a la que se encuentra un obstáculo, se puede hacer un mapa del entorno en que se encuentra el robot, para ello se utiliza un arreglo de sensores de ultrasonido alrededor del robot, ubicados de tal forma que cada uno cubre un sector angular alrededor del robot, sin embargo al hacer esto se tiene varios problemas, los más frecuentes se describe a continuación:

*Pobre directividad:* Ya que el campo de actuación de la onda emitida por el transductor tiene forma cónica, existe la probabilidad de que el eco se haya producido por un objeto presente en la periferia del eje central, aunque la máxima probabilidad es que el objeto detectado esté sobre el eje central del cono acústico, esto limita la exactitud de la detección.

*Ecos falsos:* Puede darse debido a que la onda emitida por el transductor se refleje varias veces en diversas superficies antes de que vuelva a incidir en el transductor (si es que incide). Esto implica que la lectura del sensor indicará la presencia de un obstáculo a una distancia mucho mayor que a la que está en realidad el obstáculo que produjo la reflexión de la onda.

Otra fuente común de *falsos ecos*, conocida como ***crosstalk***, se produce cuando se emplea un cinturón de ultrasonidos donde una serie de sensores están trabajando al mismo tiempo, en este caso puede ocurrir que un sensor emita un pulso y sea recibido por otro sensor que estuviese esperando el eco del pulso que él había enviado con anterioridad (o viceversa).

Para solucionar este último problema se puede hacer una multiplexación de los sensores para que no trabajen todos al tiempo, otra técnica usada es tener un solo sensor que por medio de un mecanismo gire alrededor de un eje en el centro del robot y de esta manera cubre toda la periferia del robot. Sin embargo estos dos métodos hacen mucha más lenta la detección del entorno.

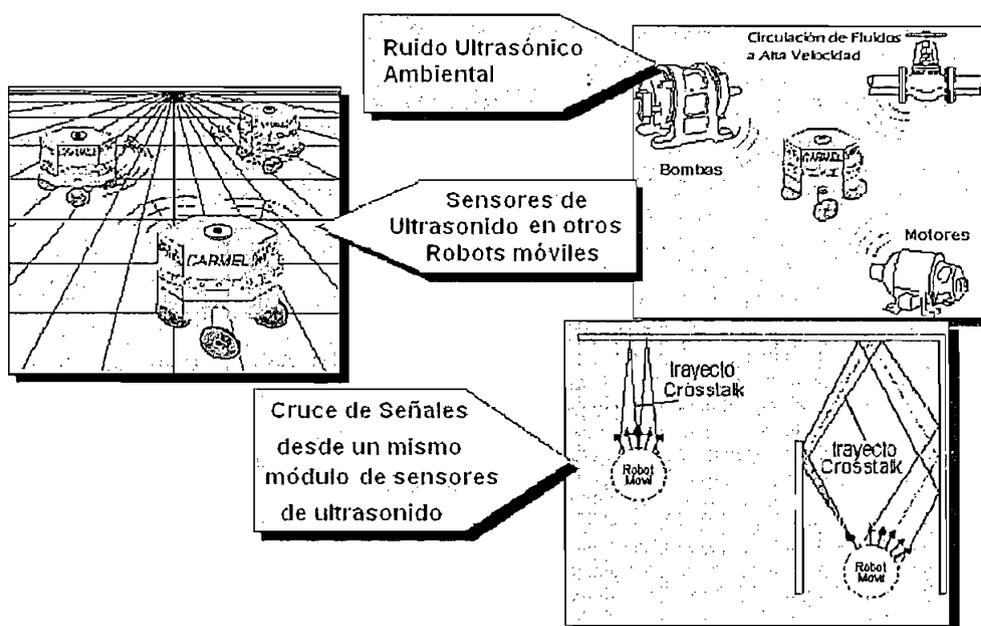


Figura 1.2 Problemas del Ultrasonido.

*Medidas Falsas:* Pueden ser provocadas por ruidos ultrasónicos de fuentes externas, esto se hace muy evidente cuando se tienen varios robots trabajando con ultrasonido en un mismo lugar.

*Reflexiones Especulares:* Una onda de ultrasonido tiene el mismo ángulo de incidencia y reflexión respecto a la normal a la superficie (ley de reflexión).

Esto implica que si la orientación relativa de la superficie reflectora con respecto al eje del sensor de ultrasonido es mayor que un cierto umbral, el sensor nunca reciba el pulso de sonido que emitió. Existen diversos métodos para resolver estos problemas, muchos de ellos se resuelven mediante la generación de un mapa del entorno y a partir de unas medidas probabilísticas, mejor información sobre este tema se encuentra en la referencia [2].

### 1.1.3 SENSORES DE IMÁGENES

Los métodos de visión artificial son muy útiles a la hora de desarrollar mapas del entorno en el cual se encuentra el robot, existen desde procesos muy sencillos donde a partir de la información suministrada por varias fotorresistencias a un DSP (Procesador Digital de Señales) se hacen reconocimiento de patrones y contornos, hasta métodos más complejos donde se captan imágenes en tiempo real desde una cámara.

La visión es el sentido más usado por la mayoría de los animales para captar información del mundo exterior, por ello al desarrollar sistemas de visión artificial se está logrando un gran paso en la evolución de la robótica.

Hoy en día se consiguen en el mercado sensores de imágenes (cámaras) empaquetados en un circuito integrado llamado CCD (Figura 1.3), la salida de estos sensores es análoga pero se pueden conectar a un conversor análogo-digital para poder tratar la imagen con un DSP.

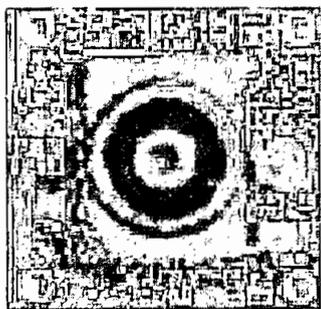


Figura 1.3 Cámara con CCD.

Una imagen proporciona información en dos dimensiones, sin embargo al utilizar técnicas de estereoscopia (usando dos cámaras) como lo hacen algunos animales incluyendo el hombre se puede obtener alguna información de profundidad, pero esto es muy complicado y se prefiere usar sensores de ultrasonido si se quiere una medida de la profundidad.

### 1.1.4 ENCODERS

Cuando se usan motores a paso para el desplazamiento de un robot, se puede contar fácilmente las vueltas a partir de los pasos que da cada llanta y con ello se puede determinar la distancia recorrida por el robot, sin embargo muchos robots utilizan motores de DC ya que estos tienen menos consumo de potencia.

Para medir la distancia recorrida por cada llanta cuando se usan motores de DC se utilizan los encoders, este método utiliza los sensores de infrarrojo, con un desfase de 90 grados con respecto a un código binario (compuesto por franjas, negras y blancas) ubicado ya sea en las llantas o en el motor (Figura 1.4) y mediante el cual se puede determinar tanto el desplazamiento como la dirección de la llanta. [2]

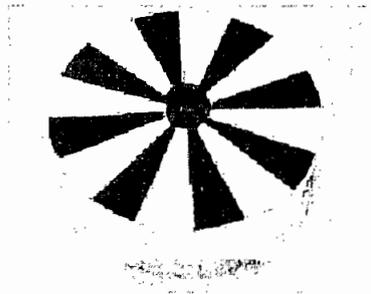


Figura 1.4 Código en la rueda para encoders

Por medio de los encoders se puede hacer que cada rueda avance una serie de pasos y no un tiempo determinado, con lo cual se puede controlar el desplazamiento y llevar un registro de la ruta seguida por el robot a partir de un punto de partida, para controlar los ángulos en los giros se puede hacer un control a partir de las vueltas que da cada llanta (para un giro diferencial, donde cada llanta gira en una dirección opuesta), sin embargo esto puede traer muchos errores debido a deslizamientos, para mejorar esto se puede recurrir al uso de otros sensores que se describirán más adelante, además de esto por medio de encoders se puede hacer un control de la velocidad del robot, detectar posibles situaciones en las que el robot quede detenido ante un obstáculo y hacer un control de desplazamiento.

Para este último se parte del hecho que si el robot sigue una línea recta, el desplazamiento en una de las ruedas laterales, debe ser igual la rueda opuesta que esta en el mismo eje, a partir de esto se hace una comparación de las dos medidas y el resultado es el error, el cual es utilizado por el control (P, PI o PID) para corregir la ruta.

### 1.1.5 SENSORES MAGNÉTICOS

Se ha visto que al utilizar encoders para determinar la posición relativa del robot, existen problemas al tratar de determinar el ángulo de giro, para mejorar este problema se puede dotar al robot de una brújula electrónica con lo cual se puede controlar la dirección del robot (ya empieza a entrar en área del posicionamiento absoluto) y controlar el ángulo de los giros de una manera relativamente fácil.

Existen Brújulas electrónicas a partir de bobinas, pero las más usadas y más prácticas son las que utilizan el fenómeno de magnetorresistencia.

La magnetorresistencia se basa en la propiedad que tienen algunos materiales de cambiar su resistencia según la dirección de la polarización del material debido a un campo magnético externo con respecto a la dirección de la corriente.

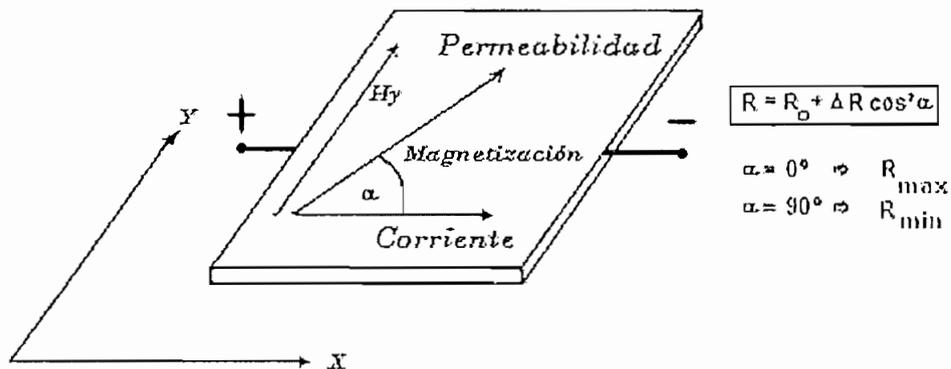


Figura 1.5 Magnetorresistencia, tomado de [3]

En el mercado se encuentra el integrado KMZ52 de Philips Semiconductor, que trae dos sensores basados en el fenómeno de la magnetorresistencia.

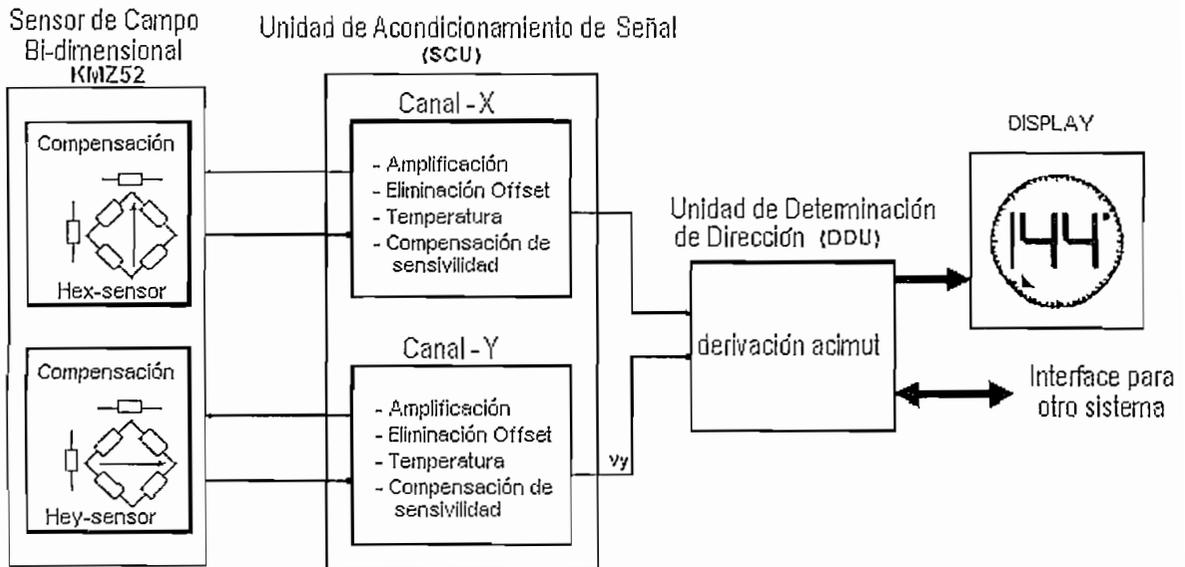


Figura 1.6 Brújula magnética con sensores de magnetorresistencia, tomado de [3]

Los dos sensores se polarizan con un desfase de  $90^\circ$  de tal manera que cuando actúan ante el campo magnético de la tierra, un sensor da como salida la información de la componente en el eje x y el otro la componente en y.

Estos sensores dan como salida un voltaje diferencial, para hacer los cálculos se deben digitalizar y luego mediante un procesador se calcula el ángulo al que se encuentra el polo norte magnético con respecto a la dirección del robot (esto se hace mediante un cálculo sencillo, hallando el arcotangente entre las dos señales entregadas por los sensores).

Por software se puede hacer una corrección de la dirección con respecto al polo norte real, más información en la referencia [3].

### 1.1.6 ACELERÓMETRO

Los acelerómetros son dispositivos usados para medir aceleración y vibración. Este dispositivo está constituido por una masa conocida pegada a un elemento piezoeléctrico. A medida que el acelerómetro se mueve, la masa aplica una fuerza al cristal generando una carga. Al leer esta carga se puede determinar la aceleración.

### 1.1.7 GIRÓSCOPO

Se llama giróscopo a cualquier cuerpo en rotación que presenta dos propiedades fundamentales: la inercia giroscópica o 'rigidez en el espacio' y la precesión, que es la inclinación del eje en ángulo recto ante cualquier fuerza que tienda a cambiar el plano de rotación. La rigidez en el espacio de un giróscopo es consecuencia de la primera ley del movimiento de Newton, que afirma que un cuerpo tiende a continuar en su estado de reposo o movimiento uniforme si no está sometido a fuerzas externas, así el volante de un giróscopo, una vez que empieza a girar tiende a seguir rotando en el mismo plano en torno al mismo eje.

La precesión consiste en que cuando una fuerza aplicada a un giróscopo tiende a cambiar la dirección del eje de rotación, el eje se desplaza en una dirección que forma un ángulo recto con la dirección de aplicación de la fuerza, gracias a estas características se puede utilizar el giróscopo para controlar la dirección de un móvil o para controlar la inclinación de un objeto con respecto a un eje determinado.

Los giróscopos constituyen parte importante de sistemas de auto-navegación o guiado inercial en aviones, naves espaciales, misiles teledirigidos, cohetes, barcos y submarinos, en la actualidad los giróscopos tradicionales son sustituidos por giróscopos de fibra óptica. [2]

### 1.1.8 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

GPS es un sistema de navegación satelital, que consta de 24 satélites que proporcionan posiciones precisas en tres dimensiones, velocidad y tiempo las 24 horas del día, en cualquier parte del mundo y en todas las condiciones climáticas, el móvil debe tener un receptor de radio para hacer el enlace con los satélites, el receptor utiliza cuatro satélites para calcular la latitud, la longitud, la altitud y la información horaria. El GPS es el mejor sistema para hacer un posicionamiento absoluto pero es muy costoso para aplicaciones básicas de navegación y proyectos como a los que se enfoca este trabajo.

## 1.2 ACTUADORES

### 1.2.1 SISTEMAS DE ACTUACIÓN MECÁNICA

Son dispositivos que se pueden considerar como convertidores de movimiento, en tanto que transforman el movimiento de una forma a otra, entre los elementos mecánicos más usados están los mecanismos de barras articuladas, levas, engranes, cremalleras, cadenas, correas de transmisión, piñones. Si bien a la electrónica hoy en día se la utiliza de una forma generalizada para el desempeño de diversas funciones que antes se las realizaban con mecanismos rígidos, éstos todavía son útiles para llevar a cabo funciones básicas como:

1. Amplificación de fuerzas; por ejemplo, la que se obtiene mediante palancas.
2. Cambio de velocidad; por ejemplo, mediante engranes.
3. Transferencia de rotación de un eje a otro; por ejemplo, una banda sincrónica.
4. Determinados tipos de movimiento; por ejemplo, los que se obtienen mediante un mecanismo de retorno rápido.

### 1.2.2 ACTUADORES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Al estudiar los sistemas eléctricos que se emplean como actuadores de control deberán tenerse en cuenta los siguientes dispositivos y sistemas:

1. *Dispositivos de conmutación*, como son los interruptores mecánicos (relevadores) y los interruptores de estado sólido (diodos, tiristores y transistores), en los que la señal de control enciende o apaga un dispositivo eléctrico.
2. *Dispositivos tipo solenoide*, en los cuales una corriente pasa por un solenoide accionando un núcleo de hierro dulce, por ejemplo una válvula hidráulica / neumática operada por solenoide, donde la corriente de control pasa por el solenoide que se utiliza para regular el flujo hidráulico / neumático.
3. *Sistemas motrices*, por ejemplo, motores de DC y de AC, en los cuales la corriente que pasa por el motor produce una rotación.

## CAPÍTULO 2

### SISTEMA MECÁNICO Y ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO

En sistemas de transportación sean estos, eléctricos o de combustión se tiene fundamentalmente la parte mecánica y su desarrollo continuo para poder optimizar el rendimiento de transportación y la confortabilidad de quien usa el transporte, junto con la parte eléctrica forman un sistema completo de transporte que brinda muchos servicios para comodidad de los usuarios, en el presente proyecto se toman las especificaciones y condiciones necesarias para ayudar a personas con deficiencias físicas.

#### 2.1 SISTEMA MECÁNICO

La parte mecánica se debe referir a especificaciones y normas que debe cumplir el diseño como por ejemplo máxima capacidad de carga, máxima velocidad de recorrido, diseño anatómico, normas de pendientes en subida y bajada para sillas de ruedas y esto lo realiza un técnico de dicha área, sin embargo en este capítulo se presentan los fundamentos básicos y sencillos de la parte mecánica.

##### 2.1.1 NORMAS PARA EL USO DE SILLAS DE RUEDAS

###### **Peso máximo del usuario en la silla de ruedas**

Existen criterios para limitar el peso máximo de un usuario que utiliza una silla de ruedas electrónica, dependiendo del material con el que se construyó la silla, ensamblajes, uniones, etc. la masa máxima del usuario que se considera es de 108 Kg, por ser especificado en la silla de ruedas utilizada. [4]

Se analiza el peso total o su equivalencia en fuerza para que los motores sean capaces de mover el sistema en su totalidad:

$$PTM = PEM + PMU + PFP + PSC \quad \text{Newton}$$

2.1

donde :

**PEM** = Peso de Estructura Mecánica = 490,0 N

**PMU** = Peso Máximo del Usuario = 1058,0 N

**PFP** = Peso de la Fuente de Poder = 390,0 N

**PSC** = Peso del Sistema de Control = 19,6 N

**PTM** = Peso Total para Movilizarse = 1957,6 N.

### **Velocidad máxima para sillas de ruedas eléctricas**

Comercialmente en el internet se encuentran sillas de ruedas electrónicas como la *EXTREME 4X4*, *TRAC About*, *Chairman ROBO 3*, *PERMOBIL J45* entre muchos modelos y fabricantes con especificaciones de velocidades entre 9 Km/h y 1.8 Km/h, [5], con lo cual se toma el promedio de estos valores siendo de 5.4 Km/h, y se realizan pruebas para esta velocidad encontrando que para el sistema realizado en el presente trabajo, esta velocidad es grande para usuarios que no tienen visibilidad o poca movilidad en los extremidades superiores por lo tanto se ha considerado una máxima velocidad de 5,4 Km/h o 1.5 m/s.

### **Pendientes en subida y bajada para la silla de ruedas**

Sobre requerimientos del diseño en espacios para sillas de ruedas, se norman según los siguientes aspectos [4]:

**TMSD** (Tramo Máximo Sin Descanso)

**TMSD** = 9 metros

**PMPI** (Pendiente Máxima Permitida en Interiores)

**PMPI** = 11% correspondiente a un ángulo de 6 °

**PMPE** (Pendiente Máxima Permitida en Exteriores)

**PMPE** = 8% correspondiente a un ángulo de 4.6 °

**PMR** (Pendiente Máxima Recomendable)

**PMR** = 6 % correspondiente a un ángulo de 3.4 °

Si el movimiento es una superficie plana, se toma un coeficiente de fricción cinético aproximado ( $\mu_c$ ) igual a 0.57, en los materiales de hule sobre concreto húmedo [6], y con el peso total a movilizar se calcula la fuerza máxima necesaria para la movilización hacia delante, atrás, izquierda o derecha ya que la fuerza requerida  $F$  para el movimiento debe ser igual a la fuerza de rozamiento  $Fr$ .

$$F = Fr \quad 2.2$$

$$Fr = \mu.m.g \quad 2.3$$

$$F = 0.57 * 200 \text{ Kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 = 1117N$$

Si el movimiento es una superficie con pendiente ascendente, se considera las normas establecidas anteriormente así como el tramo máximo de movimiento de la silla sin descanso, se toma la normal en función del ángulo  $\beta$  que representa el 11% del **PMPI**.

$$N = m.g.\cos\beta \quad 2.4$$

La fuerza máxima  $F$  necesaria para la movilización es la suma de la fuerza de rozamiento  $Fr$  con la componente del peso ( $m.g.\sen\beta$ )

Donde:

$$Fr = \mu N \quad 2.5a$$

$$F = Fr + m.g.\sen\beta \quad 2.5b$$

$$F = (m.g) (\mu.\cos\beta + \sen\beta) \quad 2.5c$$

$$F = 200\text{Kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 (0.57 * \cos 6^\circ + \sen 6^\circ) = 1277N$$

Si el movimiento es una superficie con pendiente descendente, se considera las mismas normas anteriores, y las ecuaciones varían de acuerdo a las componentes de fuerza que se restan. La fuerza máxima  $F$  necesaria para la movilización es la resta de la fuerza de rozamiento  $Fr$  con la componente del peso ( $m.g.\sen\beta$ )

$$F = F_r - m \cdot g \cdot \sin\beta \quad 2.6a$$

$$F = (m \cdot g) (\mu \cdot \cos\beta - \sin\beta) \quad 2.6b$$

$$F = 200 \text{ Kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 (0.57 \cdot \cos 6^\circ - \sin 6^\circ) = 906 \text{ N}$$

### 2.1.2 BASE ESTRUCTURAL DE LA SILLA DE RUEDAS

La base mecánica de la silla de ruedas está construida de tubos de hierro de 2.54 centímetros de diámetro, soldados de la forma geométrica de una caja con los cortes que se presentan en la Figura 2.1, capaz de soportar el peso total acumulado de el usuario, las fuentes de poder, los motores, el sistema de control eléctrico, el sistema de control electrónico y la estructura metálica en si mismo.

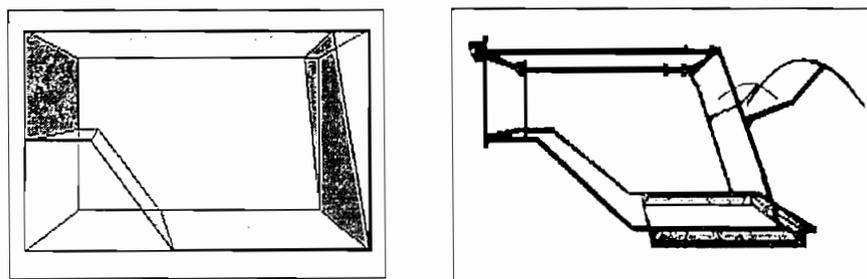


Figura 2.1 Forma geométrica de la base estructural

Este armazón va montado sobre dos ruedas traseras de 50 centímetros de diámetro (Figura 2.2a), que se acoplan mediante correas o bandas (Figura 2.2b) a los ejes de dos motores de corriente continua, y sobre dos ruedas delanteras de 26 centímetros de diámetro con giro de rotación en forma libre.

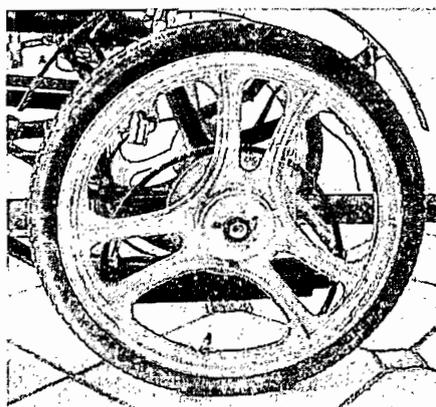


Figura 2.2a Ruedas traseras

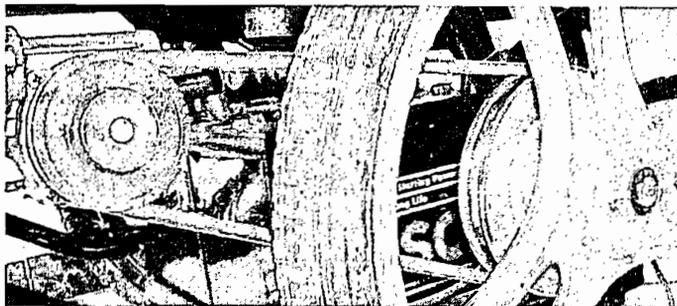


Figura 2.2b Acople electromecánico Motor-Rueda

El diseño actual también consta de partes mecánicas tapizadas y removibles (Figura 2.3) para la seguridad y confortabilidad del usuario, como son: el espaldar, que puede tener un ángulo de reclinamiento; el asiento; soportes para los brazos, que pueden regularse la altura adecuada para reposar los brazos y el estrado de los pies que también es ajustable.

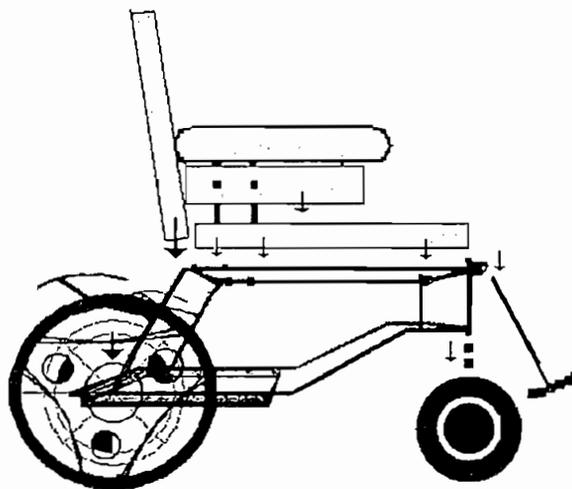


Figura 2.3 Esquema mecánico de la silla de ruedas

### 2.1.3 VENTAJAS MECÁNICAS DEL SISTEMA

*Estabilidad*, Debido a la forma estructural y el material utilizado en la construcción de la silla, esta ofrece gran estabilidad, la distribución del peso tanto del usuario, la estructura y de las baterías que son los más representativos frente esto, es casi exactamente simétrica, tanto que no permite perder estabilidad *en caso de* aplicar lentamente pesos adicionales en la periferia de la silla.

*Seguridad*, Con la ventaja anterior, la seguridad es por ende una ventaja adicional de la silla de ruedas, por otro lado todas las partes removibles y tapizadas de la silla se las ha colocado de tal forma que permiten que el usuario sienta seguridad como confort.

*Confiable*, Por la sencillez del diseño mecánico, se permite que la silla no tenga fallas que no se puedan solucionar inmediatamente, como serían el pincharse una llanta, aflojarse un tornillo, oxidarse una parte removible, o desgaste de las bandas de acoplamiento, con lo cual la silla es confiable de utilizar sin tener que saber o ser un experto en mecánica.

#### **2.1.4 LIMITACIONES MECÁNICAS DEL SISTEMA**

*Acceso y ascenso a lugares con gradas*, En caso de una persona cuadrapléjica, la estructura presenta este ítem como una limitación absoluta, pero en el caso de personas paraplejías videntes este ítem no es totalmente una limitación, pero se tiene un alto grado de dificultad para subir un escalón de grada, debido al peso total acumulado del sistema de transporte por lo que se puede recurrir a la ayuda de otra persona.

*Acceso a lugares demasiado angostos*, El tamaño de esta silla es un poco mayor que el de las convencionales y existen lugares diseñados para que puedan circular solo este tipo de sillas de ruedas, lo cual se presenta como una desventaja de accesibilidad a dichos sitios.

*Transportabilidad de la silla*, Por el mismo diseño estructural, la silla no es plegable lo cual se presenta como una desventaja frente a las sillas convencionales que se pueden plegar y desplegar para poder ser transportadas en espacios reducidos.

## 2.2 SISTEMA ELÉCTRICO

La silla fue construida a partir de un modelo comercial como plataforma, a la que se le ha incorporado; un módulo de comando, un módulo de sensorización por ultrasonido, un módulo de procesamiento central, constituido por dos microcontroladores y acondicionadores de señal, un módulo de control de potencia para los dos motores, fuentes de corriente continua, buses de entrada/salida y un conjunto de interfaces de usuario, seleccionables según el modo de control y su destreza.

### 2.2.1 DIAGRAMAS DE BLOQUES DE MÓDULOS IMPLEMENTADOS

Los distintos módulos eléctricos de alimentación, mando, control y actuación diseñados se interconectan mediante buses de datos y buses de señales, para una fácil comprensión del funcionamiento del sistema en su totalidad se presenta un diagrama de bloques en la Figura 2.4

En aras de una mayor simplicidad en el control, se optó por una circuitería basada en dos microcontroladores, para dotar al módulo de una cierta autonomía y posibilidad de re-configuración al mismo tiempo.

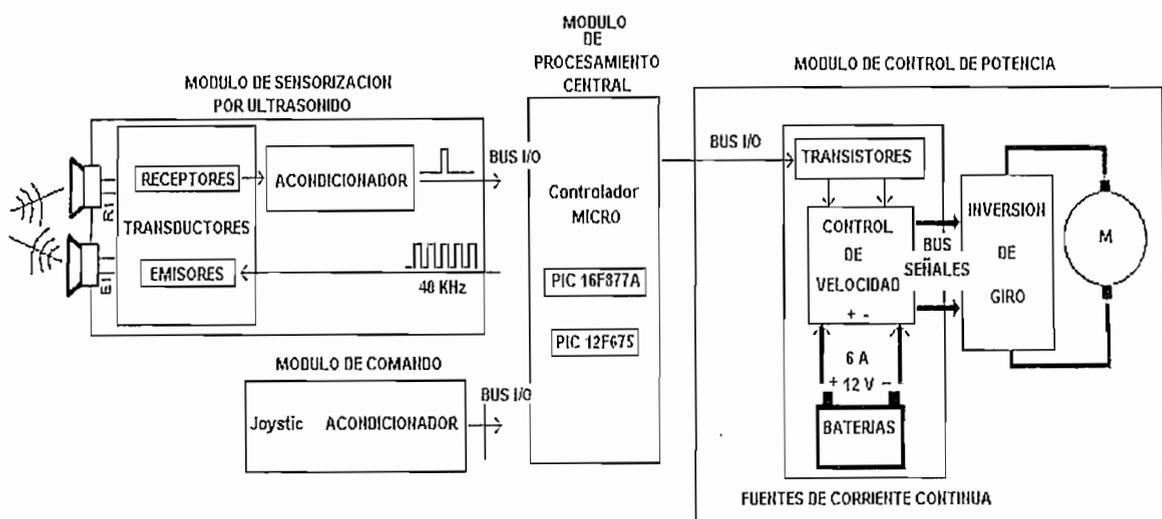


Figura 2.4 Diagrama de Bloques

La elección de este tipo de dispositivos se basa en la disponibilidad de canales de conversión A/D para entradas analógicas, salidas PWM, puertos de múltiple uso y la propia capacidad de procesamiento.

### 2.2.1.1 Módulo de comando

Es el módulo donde se ubican los dispositivos que el usuario dispone para la conducción de la silla de ruedas, este va dentro de un pequeño tablero metálico dispuesto sobre el descanso derecho del brazo para fácil maniobra de los dispositivos, por el hecho que la mayoría de las personas son diestras.

Los dispositivos son: un interruptor de encendido, una palanca de mando, tres selectores, tres pulsadores, un indicador auditivo y varios indicadores luminosos que asisten al usuario en la conducción y dan alerta de estado, además se tiene el respectivo bus de interconexión con los demás módulos del sistema.

El interruptor de encendido habilita la alimentación del módulo de procesamiento central, el cual a su vez habilita la alimentación y el control de todo el sistema eléctrico y electrónico de manera directa, junto al interruptor se encuentra el bus de conexión con el módulo de control. En la parte superior del tablero esta el panel de mando donde se encuentran los demás elementos de maniobra e indicadores visibles para asistencia y alerta del usuario.



Figura 2.5 Panel de mando

### Palanca de mando JS2MECH 103

Es un elemento electro-mecánico de fabricación italiana para direccionamiento de la silla basado en deflexiones de resortes acoplados mecánicamente a potenciómetros, los cuales varían su valor de resistencia con la deflexión que se apliquen en los resortes. Comercialmente existen muchos tipos de estas palancas, de acuerdo a las aplicaciones que se necesite, en este caso se toma una palanca de bajo costo con una sensibilidad aceptable.

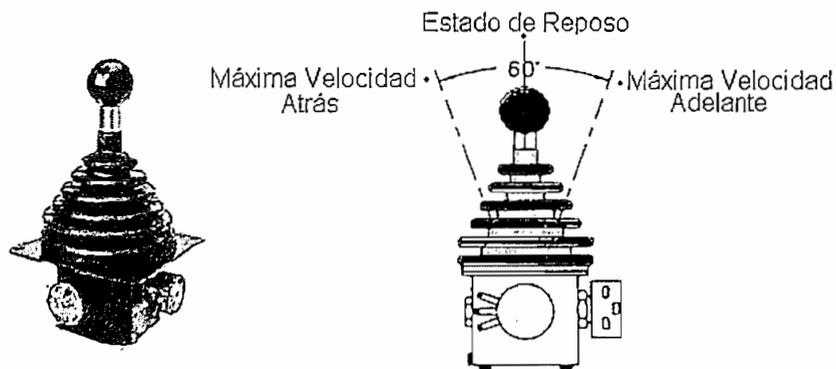


Figura 2.6 Palanca para direccionamiento de la silla

Experimentalmente se obtuvieron los siguientes valores de resistencia para las tres posiciones siguientes:

Estado de máxima velocidad adelante:  $4.6\text{ K}\Omega$

Estado de máxima velocidad atrás:  $3.8\text{ K}\Omega$

Estado de reposo:  $4.2\text{ K}\Omega$

Resistencia entre los terminales fijos del potenciómetro  $10\text{ K}\Omega \pm 2\%$

Con los respectivos valores de resistencia se procede a polarizar los terminales fijos de los potenciómetros y con el terminal variable del divisor de voltaje se procede a realizar el acondicionamiento y enviar la información al módulo de procesamiento central.

El acondicionamiento de la palanca de mando es digital y se realiza mediante programación en el microcontrolador, convirtiendo el voltaje de entrada análogo a

palabra digital de ocho bits, si la palanca se encuentra en estado de reposo se entregan 2.5 V al microcontrolador, lo que quiere decir que se tiene una palabra digital igual a 128 en sistema decimal, en el programa se resta este valor, se saca el módulo y se multiplica por un factor de ganancia  $G = 8$  encontrado experimentalmente, para llegar a obtener nuevamente otra palabra digital que se aproxime a 250, que luego se cargará en el registro el cual indica el ancho de pulso en el modo PWM del microcontrolador.

### *Selectores*

Con un selector se decide el modo de operación del sistema es decir el direccionamiento de movilidad se lo hace manualmente o semi-autónomo, en modo manual el usuario tiene la facultad de dirigirse por el camino que él elija, en cambio en modo semiautónomo el usuario no está facultado para dirigirse libremente en cualquier sentido, debido a que el módulo de sensorización ultrasónica entra en funcionamiento, asistiendo al usuario en su direccionamiento frente a obstáculos que se puedan presentar.

Con otro de los selectores se da la señalización luminosa de giro hacia la izquierda o a la derecha como parte de seguridad del usuario y de su contorno. De igual manera con el ultimo selector se da la señalización luminosa de parqueo o luz de pare y si se el usuario se moviliza en la noche por recorridos donde no lo puedan ver fácilmente, puede encender la señalización frontal.

### *Pulsadores*

El pulsador del audio-indicador actúa directamente al presionarlo y sirve como señal de advertencia para los transeúntes que se encuentran alrededor o cruzando la vía del usuario.

Los pulsadores que se encuentran cerca de los indicadores de voltaje, se utilizan para cambiar el ángulo de inclinación del espaldar desde 165 grados hasta 80 grados de inclinación. En caso de enclavado del pulsador se tiene fines de carrera para limitar el ángulo de inclinación.

### Indicadores Luminosos

Se tiene dos leds que muestran el modo de operación del sistema, rojo para modo manual y verde para modo semi-autónomo, un led para mostrar el estado de parqueo, un led para mostrar el estado de los direccionales, y un led que indica el estado del sistema completo, es decir si está o no habilitado .

### Indicadores auditivos

En el caso que el usuario sea una persona minusválida no vidente, el audio indicador es un elemento de prevención muy importante, tanto para el usuario de la silla como para las personas movilizándose cerca, además si el nivel de voltaje en los bornes de la batería está en el límite inferior, se dará una señal intermitente de advertencia.

### Control del motor para el inclinamiento del espaldar en la silla

Para controlar el sentido de giro del motor que se acopla mecánicamente a través de un tornillo sin fin y que este a su vez acciona el vástago de un pequeño pistón que se une con la estructura móvil del espaldar de la silla, se tiene un circuito que se presenta a continuación:

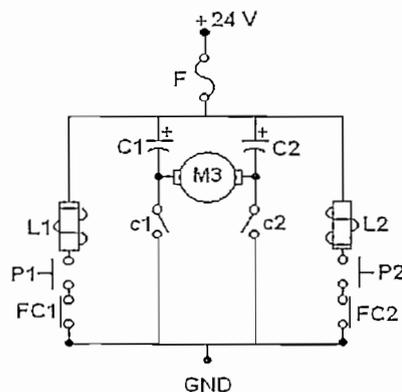


Figura 2.7 Control de motor para reclinamiento

Los capacitores C1 y C2 toman valores de 220  $\mu$ F a 25 V, para los límites de reclinamiento se dispone de los fines de carrera FC1 y FC2, los pulsantes P1 y P2 permiten invertir el giro a través de los contactos c1 y c2.

### *Control para condiciones de batería baja*

En el caso que el usuario olvide revisar el nivel de voltaje en las baterías antes de realizar un recorrido relativamente largo o en el caso de que el usuario sea minusválido no vidente y no exista otra persona que le indique el nivel de voltaje de las mismas, se ha diseñado un circuito de chequeo de bajo nivel de voltaje en los bornes de la batería, el cual a partir de 11 V empieza a dar una señal auditiva y luminosa, para que el usuario este en sobre aviso y evite quedarse sin la correcta alimentación de los motores.

El circuito toma los 5 V que entrega el regulador como referencia para representar a los 11 V (límite inferior de voltaje en la batería), se compara mediante un operacional con el voltaje de un divisor de tensión, el cual representa el voltaje de la batería, luego el comparador envía una señal al módulo de control en caso de tener nivel bajo de voltaje en los bornes de la batería.

Para el cálculo del divisor de tensión se usa la expresión (2-7):

$$V_{pot} = \left( \frac{R_b}{R_a + R_b} \right) V_{cc1} \quad 2.7$$

$$5V = (R_b / (R_a + R_b)) * 11 V$$

donde:

$$R_a + R_b = P = 20 K\Omega$$

$$0.455 = R_b / P$$

$$R_b = 9.1 K\Omega$$

Este circuito se aplica a cada una de las baterías individualmente y en forma continua supervisan el nivel de voltaje de cada una.

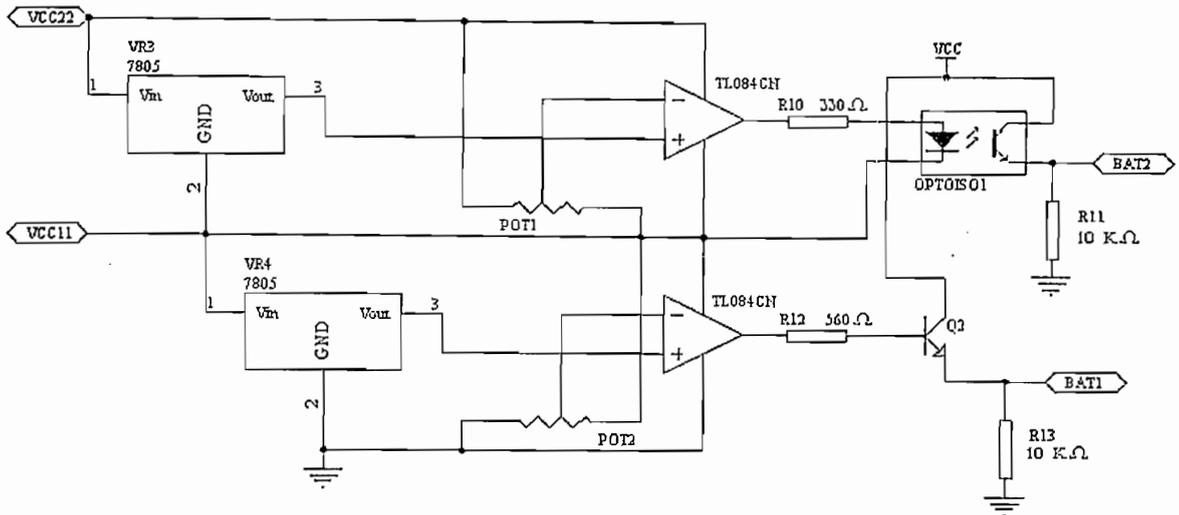


Figura 2.8 Circuito detector de bajo nivel de voltaje en las baterías

Los potenciómetros utilizados son de precisión, y cumplen dos funciones, divide la tensión de la fuente Vcc11 para obtener el voltaje de referencia con el cual se compara el voltaje fijo que entrega el regulador 7805 de + 5 V y la calibración de esta referencia para futuros cambios, lo que sería imposible si el divisor de tensión es hecho con resistencias.

### 2.2.1.2 Módulo de sensorización por ultrasonido

En este proyecto no se trata de realizar una conducción automática, ya que iría en contra del planteamiento de partida, sino una conducción asistida en la que se requiere en esencia detectar la presencia de objetos cercanos alrededor del vehículo y no una descripción completa del entorno, se descartan con ello las técnicas de visión artificial que necesitarían por otra parte unos procesadores e interfaces muy sofisticados dada la riqueza de información de estos sensores.

Los sistemas basados en láser presentan problemas de necesidad de exploración espacial considerando la alta direccionalidad del haz; así mismo los infrarrojos, que son adecuados como detectores todo-nada necesitarían igualmente elaborar técnicas de triangulación para obtener la distancia, además de exigir un proceso de modulación / demodulación para evitar interferencias del medio. [7]

En proyectos parecidos, la utilización del ultrasonido se considera como la técnica más adecuada en este tipo de sensorización, sus características de operación son superiores frente a otros métodos, presentan haces amplios que reducen las necesidades de barridos y buena sensibilidad en distancias dentro del rango de 20 cm. a 100 cm.

En el presente trabajo se utilizó el método de experiencia con tres diferentes tipos de sensores de ultrasonido y uno de infrarrojo, para tomar la decisión final de escoger el tipo de sensor con la mejor respuesta, al final como transductores se utilizaron transmisores y receptores comerciales fabricados por Honeywell-Electrocorp y distribuido por Jameco, por requerir menor tensión de excitación, ser más robustos, de menor tamaño y costo que los electrostáticos.

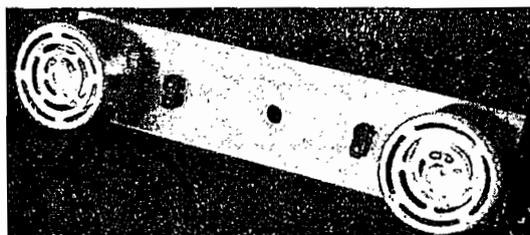


Figura 2.9 Sensor Ultrasónico

- Transmisor: ancho de banda 4.0KHz/112dB, nivel de precisión de sonido 119dB/40  $\pm$ 1.0KHz
- Receptor: ancho de banda 3.5KHz @ -71dB, min. sensitivity 65dB/40  $\pm$ 1.0KHz (0dB vs. 1V  $\mu$ bar) R=3.9k.
- Tamaño: 0.47"H x 0.62" diam.

La frecuencia de trabajo es 40 KHz para mantener cierta sensibilidad al operar en aire a distancias no muy cortas (1 a 2 m).

#### *Ubicación de los sensores*

Los sensores de ultrasonido son colocados en la periferia del vehículo para ayudar a la navegación de la silla e impedir colisiones bruscas con obstáculos.

Después de las pruebas realizadas en el laboratorio, se lleva a cabo la integración en la silla. La configuración del cinturón de sensores en la periferia de la silla es la que muestra la Figura 2.11, siendo ocho el número óptimo de sensores encontrado por las simulaciones realizadas en el laboratorio para cubrir aceptablemente la zona circundante esta es discretizada en ocho sectores angulares diferentes, operando el sensor correspondiente y los dos contiguos.

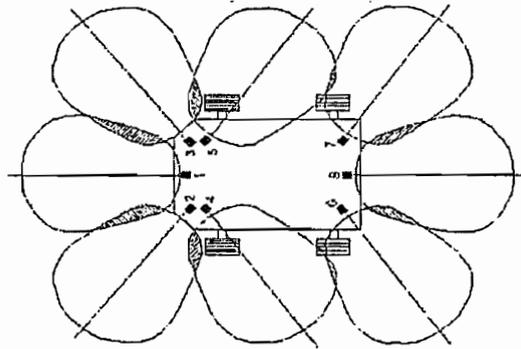


Figura 2.10 Ubicación de los sensores

El módulo maneja ocho receptores y ocho transmisores de ultrasonido, comunicándose con el módulo de procesamiento central para informar sobre la presencia de obstáculos.

Los ocho pares de sensores informan del contorno a la silla de ruedas, pero en caso de gradas o desniveles en el frente como en la parte posterior, se disponen sensores como se indica en la Figura 2.11

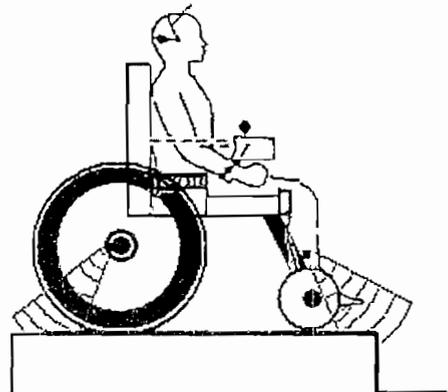


Figura 2.11 Detección de gradas o desniveles

Una amplia variedad de posibilidades en la transmisión y la recepción del ultrasonido permiten optimizar la exploración del entorno de la silla para obtener mejores respuestas y una mejor detección de obstáculos.

En esta aplicación se ha optado por disponer de parejas de transductores, emisor y receptor, que selectivamente se activarán proporcionando información de los objetos más próximos detectados en su sector correspondiente mediante la técnica pulso-eco [7], el microcontrolador 12F675 se encarga de realizar los disparos ultrasónicos y de detectar los obstáculos según la intensidad del eco de retorno.

#### *Acondicionamiento de las señales para los sensores de ultrasonido*

##### *Emisores*

Para emitir la señal en los transductores emisores de ultrasonido, se efectúa un oscilador de precisión como el que genera un microcontrolador enviando trenes de pulsos cuadrados de 12 ms de anchura, con frecuencia igual a 40 KHz. Y una amplitud de 5 V directamente desde el pin GIO3 del microcontrolador 12F675, basándose en la medición de la corriente promedio de cada sensor que es 3,3 mA y al final sobre la corriente total cuando todos los emisores están conectados, al microcontrolador siendo de 21.70 mA; que es menor a la máxima corriente de salida proporcionada por algún pin I/O del microcontrolador, según las características eléctricas del microcontrolador 12F675 es de 25 mA. [8]

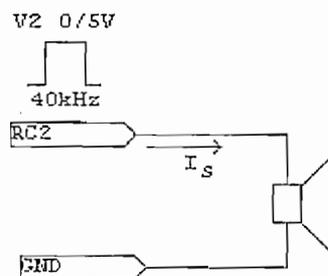


Figura 2.12 Emisión del ultrasonido

Figura 2.13 Amplificador inversor de AC con alimentación única

La señal de salida es rectificadora en media onda por D1 y filtrada por un capacitor C5 y representa la distancia a un objeto medida continuamente por un receptor, el voltaje de referencia a través de P1 y U4 representa la distancia límite a la cual la

silla debe acercarse a un objeto para que no ocurra una colisión, se comparan estos voltajes y se activa el transistor Q2 para notificar al microcontrolador.

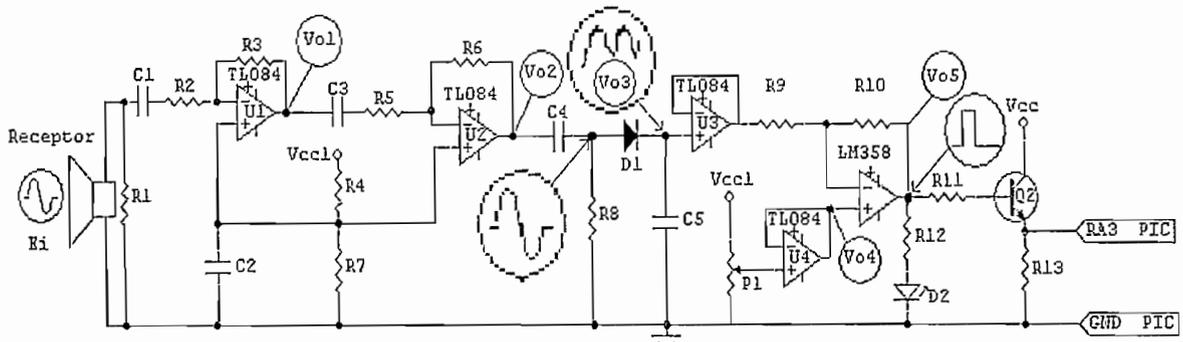


Figura 2.14 Acondicionador del receptor de ultrasonido

*Cálculos:*

El receptor se comporta como una pequeña fuente de AC, que se acopla mediante  $R1$  tomando un valor de  $10\text{ K}\Omega$ , de acuerdo al fabricante,  $C1$  también acopla solo la señal de AC a una frecuencia de trabajo  $f_T$ , se escoge una frecuencia crítica  $f_c$  tal que se cumpla la relación descrita en la ecuación 2.8 que es usada en aplicaciones de medición con ultrasonido:

$$f_T = 2.5f_c \quad 2.8$$

Si la frecuencia de trabajo es de  $40\text{ KHz}$ ; la  $f_c$  es  $f_c = 16\text{ KHz}$ .

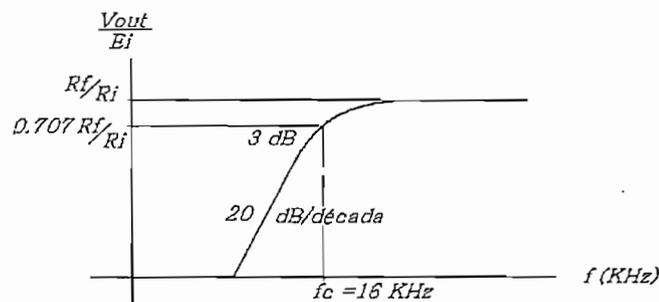


Figura 2.15 Respuesta en frecuencia del filtro pasa altos

Se escoge un valor de capacitor, generalmente se encuentra entre los  $0.001\ \mu\text{F}$  y  $0.1\ \mu\text{F}$  [9], conviene trabajar con valores pequeños de capacitancia para que las resistencias se encuentre en las decenas de los  $\text{k}\Omega$ , y las corrientes que circulan por el operacional no sean grandes.

Se escoge  $C_1 = 0.001 \mu F$ , luego se calcula  $R_2$  porque es más fácil ajustar  $R_2$ .

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad 2.9$$

$$R_2 = 9.947 K\Omega$$

El voltaje en la salida del primer operacional  $U1$  esta dada por:

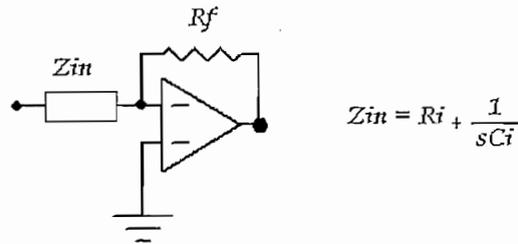


Figura 2.16 Función de transferencia

$$V_o = \left( \frac{R_f}{R_i + \frac{1}{sC}} \right) E_i \quad 2.10a$$

Si se considera  $R_i \gg X_c$ , el capacitor se comporta como un corto, el cual es el acoplamiento directo de las señales de AC, y de bloqueo para señales de DC.

$$V_o = \left( \frac{R_f}{R_i} \right) E_i \quad 2.10b$$

$E_i$  es el voltaje entregado por el sensor, a la señal de salida  $V_o$  se suma una componente continua de  $V_{cc}/2$ :

$$V_{o1} = - \left( \frac{R_3}{R_2} \right) E_i + A_{DC} \quad 2.11$$

Para obtener una ganancia de  $G = -40$ ;  $R_3 = 400 K\Omega$

Para la componente continua adecuada  $A_{DC}$  se toma los valores de  $R_4 = R_7$ , para esto  $R_b$  toma valores igual al doble del equivalente paralelo entre  $R_i$  y  $R_f$ ,

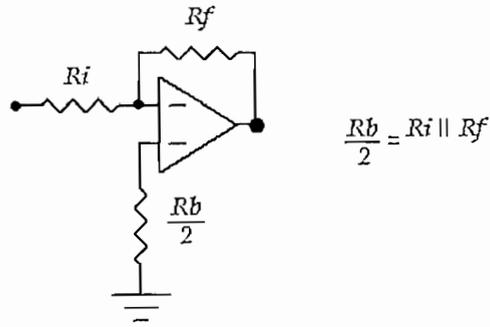


Figura 2.17 Equivalente para calcular Rb

$$R4 = R7 = R2 \parallel R3 = 9.75 K\Omega \quad 2.12$$

En la segunda etapa se procede con el mismo criterio de diseño que en la primera etapa, lo que cambia es la ganancia de voltaje  $G = -10$  entonces  $R6 = 100 K\Omega$ , siendo el voltaje de entrada el voltaje de la etapa anterior, obteniendo un voltaje de salida  $V_{o2}$

$$V_{o2} = -\left(\frac{R6}{R5}\right)\left(-\frac{R3}{R2}(Ei)\right) + A_{DC} \quad 2.13$$

$C4$  y  $R8$  forman un filtro pasivo que descarta completamente la componente continua,

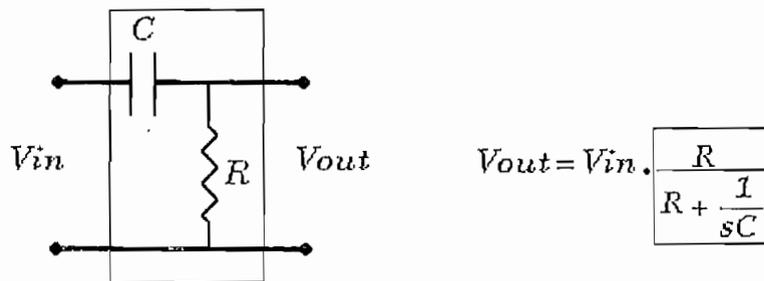


Figura 2.18 Filtro que bloquea DC

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R}{R + \frac{1}{sC}} = A_G \quad 2.14$$

Se quiere que la ganancia sea nula cuando la frecuencia sea mínima, de la expresión 2.14 se observa si  $\omega \rightarrow 0$ ,  $A_G \rightarrow 0$ ; y si  $\omega \rightarrow \infty$ ,  $A_G \rightarrow 1$ ; por tanto la frecuencia crítica  $f_c$  debe acercarse a 0 Hz:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad 2.15$$

Se procede a realizar los cálculos con dos valores de frecuencia, 10 Hz y 40 Hz que son múltiplos de la frecuencia de trabajo y que se acercan a 0 Hz:

$$RC = \frac{1}{20\pi} \quad \text{con } f_c = 10 \text{ Hz}$$

$$RC = \frac{1}{80\pi} \quad \text{con } f_c = 40 \text{ Hz}$$

Se prueba con varios valores de  $R_8$  para los dos casos de frecuencias críticas, obteniendo los resultados siguientes:

Tabla 2.2 Valores de  $C_4$  a 10 Hz y 40 Hz variando  $R_8$

	$C_4 (\mu F)$ a 10 Hz	$C_4 (\mu F)$ a 40 Hz
$R_8 = 10 \text{ K}\Omega$	1.592	0.398
$R_8 = 5 \text{ K}\Omega$	3.184	0.796
$R_8 = 1 \text{ K}\Omega$	15.92	3.98

Se escoge un valor estándar para  $C_4 = 4.7 \mu F$  y se vuelve a calcular  $R_8$  obteniendo  $3386 \Omega$  para 10 Hz y  $847 \Omega$  para 40 Hz; se prueba con los dos valores y se tiene mejor respuesta para frecuencia de corte igual a 40 Hz.

Luego de la rectificación en media onda que lo hace el diodo D1, que debe ser de germanio por la frecuencia alta de trabajo, se filtra la señal en media onda con C5,

C5 puede ser muy grande para tener menor rizado, pero en cambio la respuesta de la señal se hace muy lenta, entonces se procede a experimentar con valores altos de capacitor y de a poco ir reduciéndolo hasta tener un tiempo de respuesta aceptable.

$C5 = 2.2 \mu F$  (Filtro encontrado experimentalmente)

R9 y R10 se diseña conforme a un comparador con histéresis, siendo:

$$V_{UT} = 2 \text{ V}; \quad V_{LT} = 1 \text{ V};$$

$$V_h = V_{UT} - V_{LT} = 1 \text{ V} \quad 2.16$$

$$V_{ctr} = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = 1.5 \text{ V} \quad 2.17$$

$$R10 = n R9 \quad 2.18$$

donde  $n$  se obtiene de la relación:

$$n = \frac{(+V_{sat}) - (-V_{sat})}{V_h} \quad 2.19$$

$$n = \frac{(+12) - (0)}{1} = 12$$

Si  $R9 = 10 \text{ K}\Omega$ , entonces de 2.18 se tiene  $R10 = 120 \text{ K}\Omega$

$$V_{ref} = \frac{V_{ctr}}{1 + \frac{1}{n}} \quad 2.20$$

$$V_{ref} = 1.38 \text{ V}$$

P1 debe estar en posición tal que entregue el voltaje de referencia calculado.

Para el encendido de los transistores, si las corrientes de base son grandes se asegura la saturación:

$$I_b \geq \frac{I_c}{\beta} \quad 2.21$$

$$h_{FE} = \beta = 200; \quad V_{CE\_on} = 0.2V; \quad V_{BE\_on} = 0.65V$$

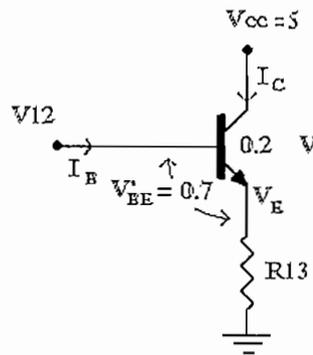


Figura 2.19 Transistor en saturación

$$I_b = \frac{I_e}{\beta + 1} \quad 2.22a$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} \quad 2.22b$$

$$I_e = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_{13}} \quad 2.23a$$

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{(\beta + 1)R_{13}} \quad 2.23b$$

Igualando la expresiones 2.22 y 2.23

$$I_e \frac{\beta}{\beta + 1} = I_c$$

De 2.21 se tiene:

$$\frac{V_{bb} - V_{be}}{(\beta + 1)R_{13}} \geq \frac{I_e \left( \frac{\beta}{\beta + 1} \right)}{\beta}$$

Reemplazando  $I_e$  se tiene:

$$\frac{V_{bb} - V_{be}}{(\beta + 1)R_{13}} \geq \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_{13}} \left( \frac{\beta}{\beta + 1} \right)$$

En la presente configuración, el valor de  $R_{13}$  no influye en la condición para saturación segura, debido que si la corriente de base disminuye, la corriente de emisor también disminuirá en relación a la ganancia de corriente  $h_{FE}$ .

$$\frac{6 - 0.65}{200 + 1} \geq (5 - 0.2) \frac{200}{200 \cdot (201)}$$

$$0.0266 \geq 0.0238$$

Sea  $R_{13} = 10K\Omega$

Se toman valores en las decenas de miles de ohmios para tener corrientes que se pueden manejar correctamente.

Para limitar la corriente del led:

$$R_{12} = \frac{V_{cc1}}{I_{led}}$$

2.24

$$R_{12} = \frac{12V}{0.035A} = 342\Omega$$

En valor estandarizado  $R_{12} = 330 \Omega$  pudiendo variarse de acuerdo al color del led o intensidad de luminosidad que se quiera dar.

### 2.2.1.3 Módulo de procesamiento central

El módulo de procesamiento central coordina el funcionamiento del sistema en conjunto, solicitando señales de información y enviando señales de comando a todos los módulos del sistema.

El manejo de entradas y salidas de los microcontroladores es realizado a través de transistores de señal, estos permiten manejar elementos que se encuentran a distintos voltajes ya que trabajan simplemente como interruptores, únicamente las señales que comandan la velocidad de los motores se manejan por medio de optotransistores.

En el modulo de procesamiento central se encuentran los microcontroladores *PIC 16F8777A* y *PIC 12F675*; el primero habilita el sistema eléctrico, establece el modo en que se ha de operar el prototipo, realiza el acondicionamiento digital del voltaje entregado por la palanca de mando, recibe las señales acondicionadas de los sensores receptores y procesar esta información para realizar el respectivo control de los motores, entrega las señales PWM a la base de los transistores de potencia, con ancho del pulso variable basado en el acondicionamiento digital de la palanca de mando para el control de velocidad en los motores, coordina la activación de los relés y el sentido en que deben ser alimentados los motores para control del giro en la silla de ruedas. El microcontrolador 12F675 que es más pequeño, se encarga de emitir la señal de ultrasonido de 40 Khz. A través de la salida GPIO2, este MICROCONTROLADOR no necesita de un oscilador externo ya que posee uno interno el cual se configura para que oscile a 4 MHz, el circuito de implementación es sencillo, solo necesita polarización y su costo es aceptable.

#### 2.2.1.4 Módulo de potencia

Este módulo eléctrico esta constituido por dos motores de corriente continua tipo serie, con armadura y campo independientes, que son alimentados por un circuito troceador DC/DC a través de una configuración de relés, las baterías que son la fuente de alimentación para los motores, además se tiene un sencillo cargador de baterías.

##### *Motores de DC*

Los motores son de 24Vdc y 15 A encontrados experimentalmente debido a no tener los datos de placas, ni tampoco encontrar en Internet los mismos motores, entonces se toma 24 Vdc como referencia de otros motores parientes de la misma casa comercial según la marca italiana "AMER" (Valdagno) y variando la carga hasta obtener una máxima corriente de 15 A, donde se mantiene casi constante a pesar de incrementar la carga, revisando que los bobinados no se calienten , los motores se controlan para variar las velocidades, aceleraciones, desaceleraciones y giros de la silla de ruedas, necesarios para un desplazamiento suave y seguro.

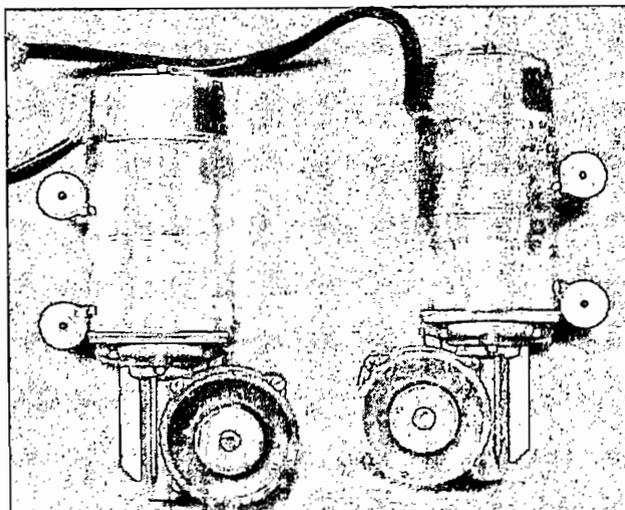


Figura 2.21 Motores DC

La silla de ruedas posee dos de estos motores de DC en su parte inferior media, y cada uno de los motores se encarga de impulsar una rueda en forma independiente de la otra.

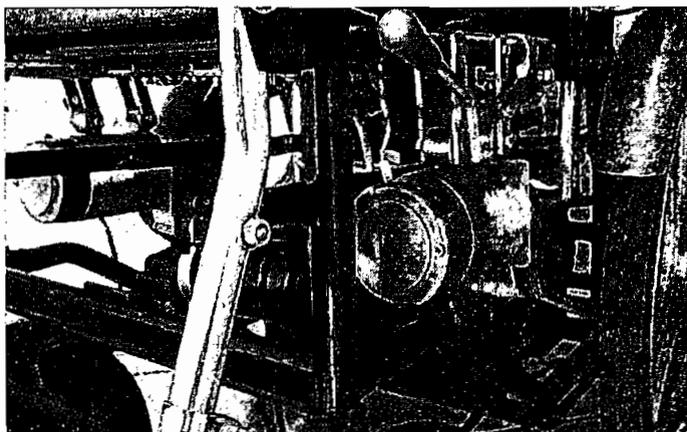


Figura 2.22 Ubicación de motores

Los giros del vehículo se logran impulsando una de las ruedas hacia adelante y la otra hacia atrás. Para lograr este efecto, se ponen en la parte delantera de la silla, dos ruedas giratorias para permitir la rotación de la silla.

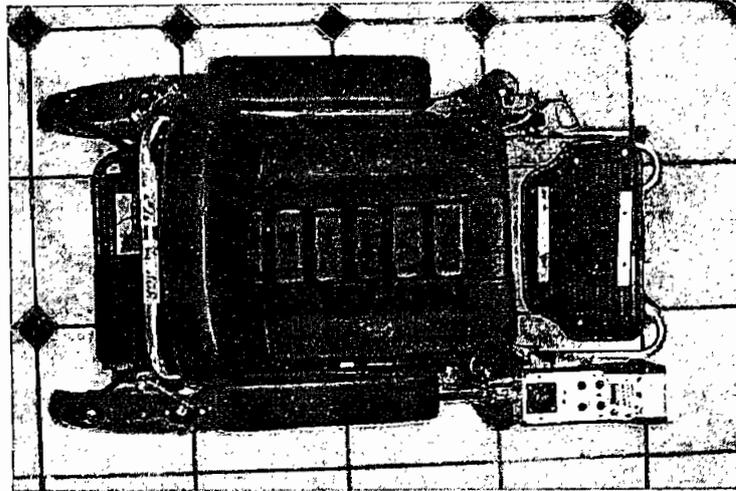


Figura 2.23 Vista superior de la silla

Los motores que se utilizan generalmente en proyectos similares son motores de corriente continua, debido a su fácil control y torque efectivo que entrega.

Al estar los motores alimentados por un circuito troceador DC/DC, es necesario determinar el rango de frecuencia apropiada para su correcto funcionamiento. Para lo cual se requiere determinar los valores de los parámetros de armadura como son resistencia ( $R_a$ ) e inductancia ( $L_a$ ) de armadura. [10]

$$R_a 1 = 0.82 \Omega$$

$$R_a 2 = 1.5 \Omega$$

Dato medido experimentalmente con un óhmetro.

Para el cálculo de la inductancia  $L_a$ , se tiene algunos métodos, entre los cuales se tiene el método de rotor bloqueado y el método de medición directo a través de un medidor de inductancias.

*Método de rotor bloqueado:*

En este método se alimenta al motor con voltaje rectificado de media onda y se toman las formas de onda del voltaje en el motor:

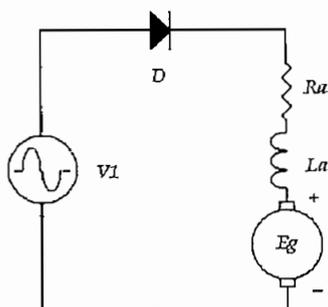


Figura 2.24 Circuito implementado para la prueba

$$V1 = V_{Ra} + V_{La} + E_g \quad 2.25a$$

$$V1 = V_{m\acute{a}x} \text{sen}(wt) \quad 2.26$$

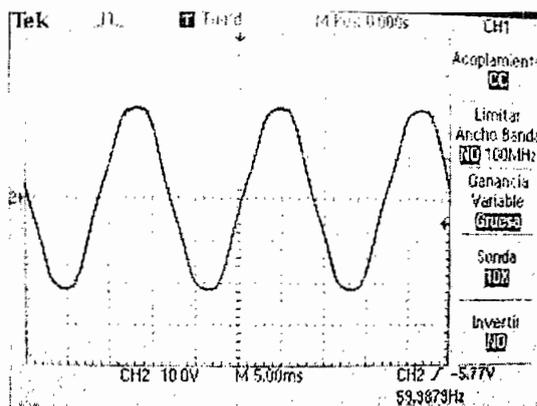


Figura 2.25 Fuente de alimentación

$$V_{m\acute{a}x} \text{sen}(wt) = V_{Ra} + V_{La} + E_g \quad 2.25b$$

$$V_{m\acute{a}x} \text{sen}(wt) = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_g \quad 2.25c$$

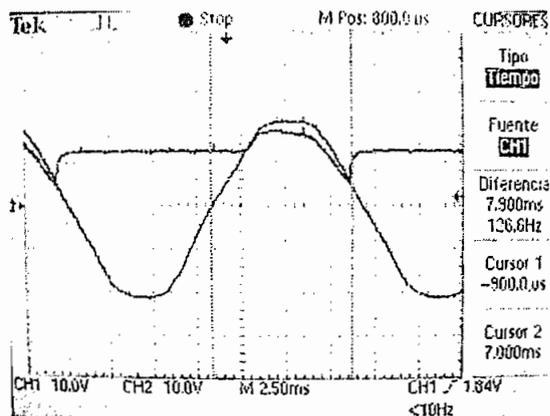


Figura 2.26 Formas de onda en la fuente y en la carga

Luego de obtener gráficamente el ángulo de apagado ( $\beta \approx 7.9$  ms) se procede al cálculo de la inductancia mediante la solución a la ecuación diferencial 2.25c:

$$V_{m\acute{a}x} \text{sen}(wt) = i_a Ra + La \cdot \frac{di_a}{dt} + E_g$$

Si:  $E_g = 0$

$$i(t) = \frac{V_{pico}}{Za} \text{sen}(wt - \phi) \quad 2.27$$

Si:  $V_{pico} \text{sen}(wt) = 0$

$$i(t) = -\frac{E_g}{Ra} \quad 2.28$$

Luego por superposición se tiene:

$$i(t) = \frac{V_{pico}}{Za} \text{sen}(wt - \phi) - \frac{E_g}{Ra} + \left( \frac{E_g}{Ra} - \frac{V_{pico}}{Za} \text{sen}(\alpha' - \phi) \right) * e^{\frac{\alpha' - wt}{Tg\phi}} \quad 2.29a$$

Si:  $wt = \beta$

$$i(t) = 0$$

$$0 = \frac{V_{pico}}{Za} \text{sen}(\beta - \phi) - \frac{E_g}{Ra} + \frac{E_g}{Ra} \cdot e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} - \frac{V_{pico}}{Za} \text{sen}(\alpha' - \phi) e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} \quad 2.29b$$

$$\frac{V_{pico}}{Za} \text{sen}(\beta - \phi) = \frac{E_g}{Ra} - \frac{E_g}{Ra} \cdot e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} + \frac{V_{pico}}{Za} \text{sen}(\alpha' - \phi) e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} \quad 2.29c$$

La expresión 2.29c multiplicada por el factor  $\frac{Za}{V_{pico}}$ , donde  $Za = \omega La + Ra$  se tiene:

$$\text{sen}(\beta - \phi) = \frac{E_g}{Ra} \frac{Za}{V_{pico}} \left( 1 - e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} \right) + \text{sen}(\alpha' - \phi) e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} \quad 2.29d$$

$$\text{sen}(\beta - \phi) = \frac{E_g}{V_{pico}} \frac{1 + Tg\phi}{1} \left( 1 - e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} \right) + \text{sen}(\alpha' - \phi) e^{\frac{\alpha' - \beta}{Tg\phi}} \quad 2.29e$$

1,062	1,7928	-0,001917
1,063	1,797	-0,000408
1,0635	1,7992	0,0003544
1,0632	1,7979	-0,000104
1,0633	1,7983	4,89E-05

Obteniendo  $\phi = 1.06326$

Además se tiene que:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\omega L_a}{R_a} \quad 2.31$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = f_{Red\_Eléctrica} = 60\text{Hz}$$

Si:  $R_a = 0.8\Omega$

$$L_a = 2.2563\text{mH}$$

Si:  $R_a = 1.5\Omega$

$$L_a = 4.2305\text{mH}$$

Sin duda que este método gráfico y matemático es tedioso y se obtiene un valor asequible de errores en la apreciación de las mediciones y errores de aproximación en los ángulos cuando no se toman todos los dígitos, por lo cual se optó por realizar la mediciones de la inductancia en el laboratorio, utilizando un puente de inductancias, obteniendo un valor de 0,16 mH, que es 14 y 26 veces menor al valor encontrado gráficamente.

El accionamiento de los motores se hace a través del troceador DC, que aplica trenes de pulsos de voltaje unidireccional a los motores, este voltaje es controlado variando la relación de trabajo y manteniendo un periodo T constante (PWM).

La corriente es unidireccional y el voltaje es no reversible, por lo tanto la operación es solamente en el primer cuadrante. A este tipo de circuitos básicos se los conoce como troceador clase A.

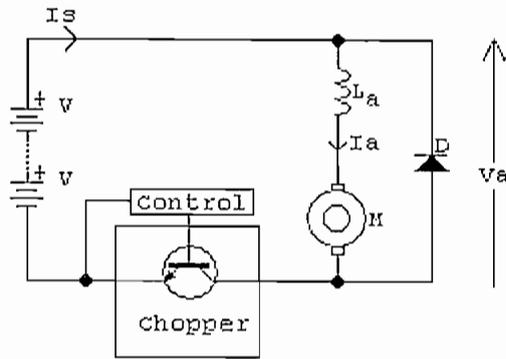


Figura 2.28 Troceador Clase A

Teniendo motores como carga del troceador clase A, para altos valores de relación de trabajo existe variación de la corriente de armadura, la misma que varía entre un máximo y un mínimo valor, pero probablemente la conducción sea continua siempre. Para bajos valores de relación de trabajo, la corriente puede llegar a ser cero durante un tiempo  $t_x$ , que ocasiona distorsiones en el voltaje entregado al motor, especialmente si se tiene una baja inductancia.

La frecuencia típica de conmutación esta en el orden de [11]:

$$100 \leq \frac{\omega}{2\pi} \leq 1000 \text{ Hz} \quad 2.32$$

Ahora se analiza la frecuencia de conmutación óptima del motor:

$$\phi = 1.06326 \text{ rad}$$

$$\text{tg} \phi = \frac{2\pi f_{CH} L_a}{R_a} \quad 2.33$$

$$\text{tg}(60.92^\circ) = \frac{2\pi * f_{CH} * 0.16 \text{ mH}}{0.8 \Omega}$$

$$f_{CH} = 1129.265 \text{ Hz}$$

Luego de tener esta frecuencia se procede a realizar una experimentación con un rango de frecuencias de conmutación que se encuentre dentro del promedio de la frecuencia teórica, encontrando que el voltaje en la carga presentaba pequeñas distorsiones en la forma de onda para valores superiores o inferiores al teórico, acertando que para 1.15 KHz el motor presenta la mejor forma de onda de voltaje.

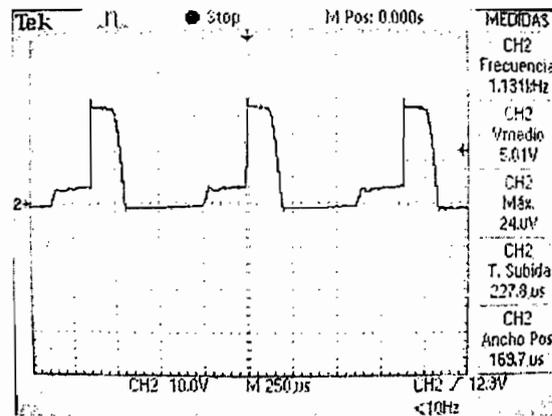


Figura 2.29 Forma de onda en la carga a 1.15 KHz

### Análisis de la potencia de los motores

Como los motores son viejos, se analiza la potencia que necesitan para mover la silla que no debe exceder a la potencia máxima que pueden entregar los mismos, para calcular la potencia máxima se debe encontrar la velocidad máxima la silla de ruedas y el peso máximo que se va a transportar. Del análisis de peso máximo hecho al iniciar el capítulo, se considera el caso más crítico donde la fuerza es máxima, y se procede al diseño de la potencia del motor para este caso:

$$P_{OUT} = T_{torque} * W_{angular} = F \cdot d_{is\ tan\ cia} * \frac{v_{lineal}}{r_{radio}} \quad 2.34a$$

$$d_{is\ tan\ cia} = r_{radio}$$

$$P_{OUT} = F_{eje} \cdot v_{lineal} \quad 2.34b$$

$F_{máxima}$  es la fuerza total máxima que se aplica sobre las cuatro ruedas cuando sube un tramo de 9 metros sin descanso en interiores, se puede considerar que esta fuerza se centraliza en las dos ruedas de atrás y se tiene:

$$F_{máxima} = 170Kg * 9.8 m/s^2 (0.57 * \cos 6^\circ + \sen 6^\circ) = 1085.60 N$$

$$F_{máx\ al\ eje} = \frac{1085.60}{2} = 542.8 N$$

### **Fuerza máxima al eje de un motor = 542.8 N**

En pruebas realizadas para personas con mínima movilidad de sus miembros superiores esta velocidad puede resultar peligrosa, por que el usuario no tendría la rapidez requerida en la reacción frente a obstáculos imprevistos, por eso se baja la velocidad encontrando una adecuada experimentalmente de 0.8 m/s, y se procede a calcular la potencia necesaria de los motores:

### **Velocidad adecuada para personas cuadrapléjicas o no videntes = 0.8 m/s**

$$P_{\text{potencia máxima necesaria al eje}} = V_{\text{velocidad máxima}} * F_{\text{fuerza máxima}} \quad 2.35$$

$$P = V_m * F_m = 1.5 \text{ m/s} * 542.8 = 814.2 \text{ Watts}$$

Para el caso de personas cuadrapléjicas o no videntes se tiene:

$$P = V_m * F_m = 0.8 \text{ m/s} * 542.8 = 434.24 \text{ Watts}$$

$$P_{\text{pérdidas máximas}} = (I_{\text{máxima}})^2 R_a \quad 2.36$$

$$P_{\text{perd}} = (10A)^2 * 0.8 \Omega = 80 \text{ Watts}$$

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{pérdida}} + P_{\text{salida}} \quad 2.37$$

$$P_{\text{entrada}} = 80 + 434.24 = 514.24 \text{ Watts}$$

### *Transistores de potencia*

Para la carga requerida las especificaciones básicas del transistor deben ser: un voltaje colector-emisor mayor a 24 V, una corriente de colector mayor a los 15 A.

Cuando el transistor está en saturación o en corte las pérdidas son despreciables. Pero si tenemos en cuenta los efectos de retardo de conmutación, al cambiar de un estado a otro se produce un pico de potencia disipada, ya que en esos instantes el producto  $I_C \times V_{CE}$  va a tener un valor apreciable, por lo que la potencia media de pérdidas en el transistor va a ser mayor.

Estas pérdidas aumentan con la frecuencia de trabajo, debido a que al aumentar ésta, también lo hace el número de veces que se produce el paso de un estado a otro

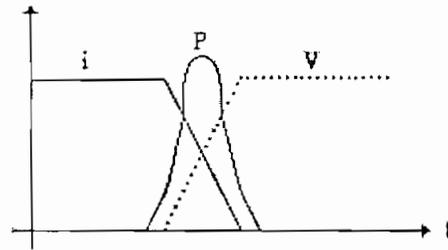


Figura 2.30 Pérdidas por conmutación

Conociendo también que la potencia disipada en la conmutación con carga inductiva se aproximan a la suma del área de los triángulos con bases  $(t_1+t_2)$  y  $(t_3+t_4)$  se calcula la energía de pérdidas en el transistor:

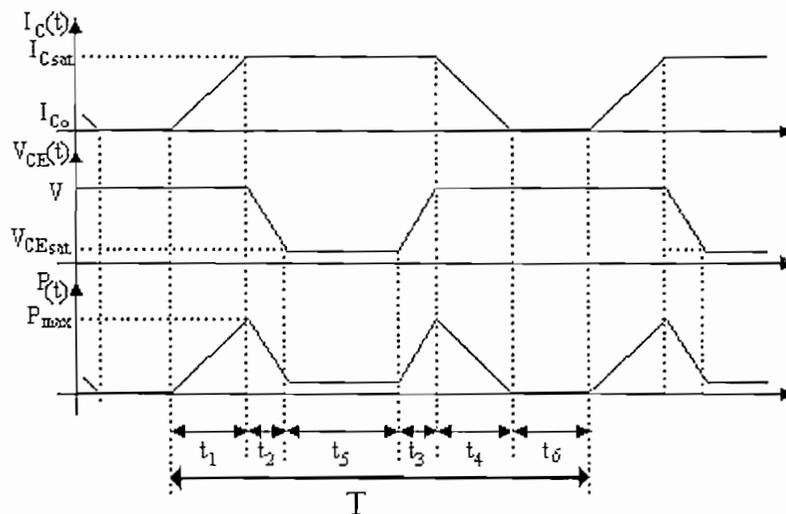


Figura 2.31 Potencia disipada por conmutación

La energía perdida durante el  $t_{on}$  viene dada por la ecuación:

$$W_{ton} = \frac{1}{2} V \cdot I_{C(sat)} (t_1 + t_2)$$

2.38

Siendo  $t_1+t_2 = t_{on}$  (tiempo de encendido del transistor)

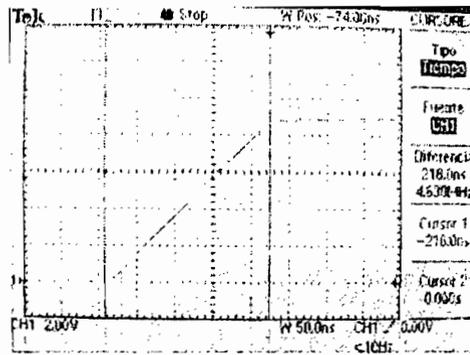


Figura 2.32 V colector-emisor ton

$$W_{ton} = \frac{1}{2} 25V \times 15Ax(216ns) = 40.5 \mu J$$

Durante el  $t_{off}$ , la energía de pérdidas en el transistor vendrá dada por la ecuación:

$$W_{toff} = \frac{1}{2} V_{CE(sat)} I_{C(sat)} (t3 + t4) \quad 2.39$$

Siendo  $t3+t4 = t_{off}$  (tiempo de apagado del transistor)

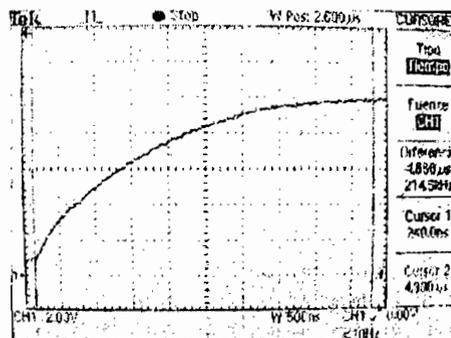


Figura 2.33 V colector-emisor toff

$$W_{toff} = \frac{1}{2} 25V \times 15Ax(4.66 \mu s) = 873.75 \mu J$$

La potencia media de pérdidas durante la conmutación será por tanto:

$$P_{dinámicas\_TOTALES} = \frac{W_{ton} + W_{toff}}{T} = f(W_{ton} + W_{toff}) \quad 2.40$$

La energía de pérdidas en conducción viene como:

$$W_{conducción} = V_{CE(sat)} I_{C(sat)} t_s \quad 2.41$$

$$W_{conducción} = 1.8V \times 15A \times 768.777 \mu s = 20.756mJ$$

La energía de pérdidas en no conducción viene como:

$$W_{no\_conducción} = V I_{Co} t_6 \quad 2.42$$

$$W_{no\_conducción} = 25V \times 250 \mu A \times 110.52 \mu s = 690.75 \eta J$$

Si lo que queremos es la potencia media total disipada por el transistor en todo el periodo debemos multiplicar la frecuencia con la sumatoria de pérdidas a lo largo del periodo (no conducción + conmutación + conducción).

$$P_{TOTALES} = f (W_{conducción} + W_{ton} + W_{toff} + W_{no\_conducción}) \quad 2.43$$

$$P_{TOTALES} = 1131Hz (20.756mJ + 40.5 \mu J + 873.75 \mu J + 690.75 \eta J)$$

$$P_{TOTALES} = 1131(0.02167) = 24.51Watts$$

En caso que el transistor este encendido casi todo el período se tiene:

$$W_{conducción} = V_{CEsat} I_{Csat} (T - (t_{on} + t_{off})) = 23.74mJ$$

$$W_{no\_conducción} = V \cdot I_{Co} t_{no\_conducción}; \text{ se consideran insignificantes}$$

$$P_{TOTALES} = 1131(23.74mJ + 40.5 \mu J + 873.75 \mu J)$$

$$P_{TOTALES} = 1131(0.02465) = 27.88Watts$$

Por construcción dos dispositivos semiconductores, en este caso; dos transistores MJ3005, no tienen "exactamente" las mismas características dinámicas y/o estáticas, es decir que los tiempos de apagado y encendido en los transistores pueden variar en el orden de los nano-segundos lo que implica que no todos los transistores se apagarían y se encenderían simultáneamente y produce que en algún instante un transistor disipe toda la potencia, es claro experimentarlo al medir la temperatura de cada transistor al cabo de cierto tiempo de funcionamiento con la misma señal de conmutación en la base, es por esto que se deben tener en cuenta alguno de los siguientes ítems de protección para el transistor:

- *Disipador de temperatura*

Se analiza la juntura colector-emisor y la resistencia térmica del TBJ para calcular el disipador adecuado, cuando el TBJ alcanza la segunda avalancha la corriente de colector alcanza valores que pueden dañar el TBJ por aumento de temperatura.

Se puede establecer una correspondencia entre la Ley de Ohm y la propagación térmica mediante la siguiente tabla de equivalencias:

Tabla 2.4 Tabla de analogía térmica-eléctrica

<i>Analogía térmica - Ley de Ohm</i>	
<i>Intensidad ( I )</i>	<i>Calor ( W )</i>
<i>Tensión ( V )</i>	<i>Temperatura ( T )</i>
<i>Resistencia ( R )</i>	<i>Resist. térmica ( R )</i>
$V = IR$	$T = WR$

Las unidades son W (vatios), T (°C) y R (°C/W), considerando las variables:

T<sub>j</sub> = temperatura de la unión

T<sub>a</sub> = temperatura ambiente

R<sub>jc</sub> = resistencia térmica unión-cápsula

R<sub>cd</sub> = resistencia térmica cápsula-disipador

R<sub>da</sub> = resistencia térmica disipador-ambiente

La potencia de disipación se divide si se coloca todos los transistores en el mismo radiador.

Por tanto, se debe disipar un total de (27.88x2) tomando un valor aproximado de 60 vatios, con los datos del fabricante se tiene:

T<sub>j</sub> = 200 °C

R<sub>jc</sub> = 0.7 °C/w

R<sub>cd</sub> = 0.8 °C/w (separador de mica y cápsula TO-3)

Seleccionando una temperatura ambiente de 20 grados (el radiador está al aire libre). Se examina detenidamente la situación, dibujando un diagrama de analogía eléctrica:

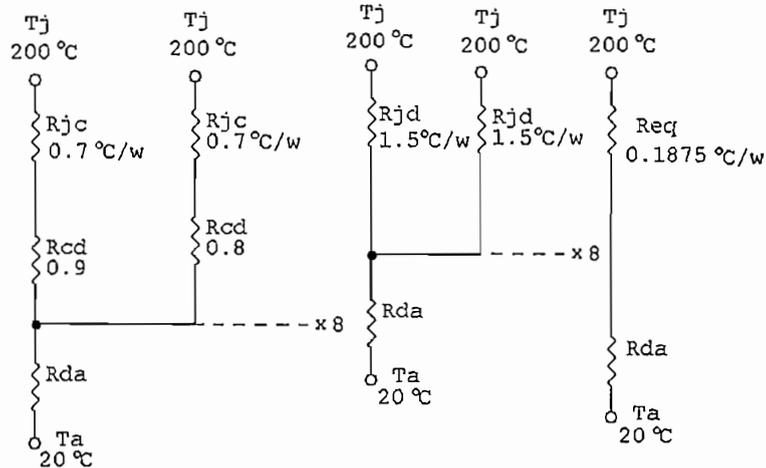


Figura 2.34 Diagrama de analogía eléctrica

La asociación de resistencias térmicas se trata igual que las eléctricas, asociando series y paralelos se llega al resultado de la Figura 2.34. La resistencia térmica total de los transistores ( $R_{eq}$ ) es de  $0.1875\text{ }^\circ\text{C/w}$ . O sea, se reduce la  $R_{jd}$  por el hecho de utilizar varios transistores. Tiene sentido, porque se proporciona varios caminos al flujo de calor.

Con esto se calcula el radiador

$$R_{da} = \frac{T_j - T_a}{P_{\text{TOTALES}}} - (R_{jc} + R_{cd}) \quad 2.44$$

$$R_{da} = \frac{200 - 20}{60} - 0.187 = 2.813\text{ }^\circ\text{C/w}$$

Lamentablemente en el medio no se consigue fácilmente disipadores y mucho menos que cumplan con requerimientos de diseño, además la fabricación bajo pedido resulta costosa, por lo que no queda más que adaptar un disipador, con el que se obtuvo resultados favorables para esta aplicación.

- *Sensor de temperatura LM 35C*

Se utiliza un semiconductor que es sensible al cambio de temperaturas para sensar la temperatura de transistores y diodos de potencia en conjunto y controlar discretamente el flujo de corriente en los semiconductores.

La señal que entrega el LM35C se la lleva directamente a una entrada analógica del microcontrolador, el acondicionamiento de esta señal se lo realiza internamente en una subrutina del programa principal del 16F877A, basado en las curvas características del sensor y experimentaciones realizadas con los dispositivos de potencia en funcionamiento, asignando un voltaje máximo entregado por el LM 35C que el 16F877A entiende como máxima temperatura permitida y realiza la desconexión de los motores y da una alerta al usuario.

- *Diodo de polarización inversa al transistor*

Durante la desactivación, el transistor debe soportar una corriente y un voltaje altos, el voltaje colector-emisor debe mantenerse a un nivel seguro, con este propósito se coloca un diodo en anti-paralelo al transistor que limita el voltaje de polarización inversa a 0.6V (Figura 2.35a).

- *Diodo anti-paralelo a la carga*

En casos de carga resistiva e inductiva ( $RL$ ) es necesario el diodo en anti-paralelo a la carga, este y el anterior cumplen la función de limitar la tensión en el transistor durante el paso de saturación a corte, proporcionando a través de los diodos un camino para la circulación de la intensidad inductiva de la carga y cualquier reflujó de corriente que pueda presentarse (Figura 2.35b).

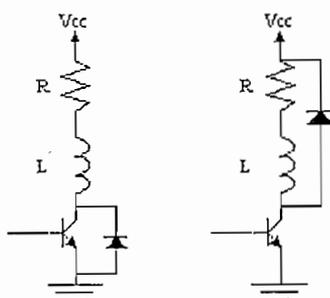


Figura 2.35 a) Diodo de polarización inversa al transistor  
b) Diodo anti-paralelo a la carga

- Resistencia para reducción del tiempo de apagado

Se colocan resistencias de valor pequeño ( $R_{\text{toff}} \approx$  decenas de ohmios) entre la base y el emisor para reducir el tiempo de apagado del transistor, para frecuencias muy altas, como se indica en la figura 2.36

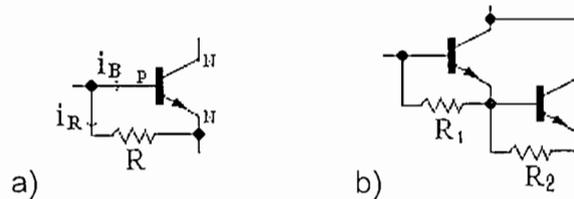


Figura 2.36 Resistencias de reducción del tiempo de apagado

El criterio para seleccionar el valor de las resistencias para reducir el tiempo de apagado en los transistores es:

$$i_{\text{RESISTENCIA}} \leq \frac{i_{\text{BASE}}}{10} \quad 2.45$$

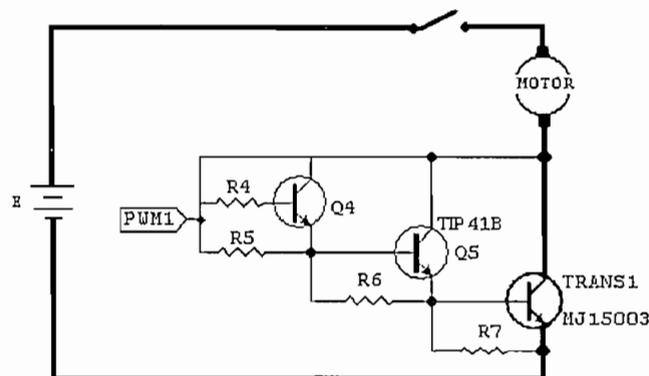


Figura 2.37 Circuito de disparo de los transistores

Además se tiene una ganancia de corriente  $h_{FE}$ , que relaciona la corriente de colector con la corriente de base:

$$h_{FE} = \frac{I_c}{I_b} \quad 2.46$$

En cambio para saturación segura se recuerda:

$$I_{\text{BASE}} = I_{R4} \geq \frac{I_{\text{COLECTOR } Q4}}{h_{FE}} \quad 2.21$$

Para MJ15003

$$I_{C_{MJ15003}} \approx 15A$$

$$I_{B_{MJ15003}} = \frac{I_{C_{MJ15003}}}{h_{FE}} = \frac{15A}{25} = 0.6A$$

$$\frac{V_{BE}}{R7} = I_{R7} \leq \frac{I_{B_{MJ15003}}}{10}$$

$$R7 \geq 11.6\Omega$$

Para Q5 = TIP41B

$$I_{C_{TIP41B}} \approx I_{E_{TIP41B}} = I_{B_{MJ15003}} + I_{R7} - I_{R6} \approx 0.66A$$

$$I_{B_{TIP41B}} = \frac{I_{C_{TIP41B}}}{h_{FE}} = \frac{0.66A}{20} = 0.033A$$

$$\frac{V_{BE}}{R6} = I_{R6} \leq \frac{I_{B_{TIP41B}}}{10}$$

$$R6 \geq 212\Omega$$

Para Q4 = 2N3904

$$I_{C_{Q4}} \approx I_{E_{Q4}} = I_{B_{TIP41B}} + I_{R6} - I_{R5} \approx 0.0363A$$

$$I_{B_{Q4}} = \frac{I_{C_{Q4}}}{h_{FE}} = \frac{0.036A}{200} = 0.18mA$$

$$\frac{V_{BE}}{R5} = I_{R5} \leq \frac{I_{B_{Q4}}}{10}$$

$$R5 \geq 38.8K\Omega$$

$$R4 \leq \frac{R5}{10} = 3.8K\Omega$$

Para valores menores de R4 se tiene mejor saturación del transistor.

Los valores calculados se someten a cambios por tener valores normalizados de resistencias y por que se ha trabajado en el limite de las condiciones corriente, además de tener  $h_{FE}$  medidos que varían un porcentaje de los entregados en las hojas de especificaciones, por tanto a partir de estos valores se tiene:  $R7=47\Omega$ ,  $R6=82\Omega$ ,  $R5=10K\Omega$ ,  $R4=1K\Omega$  que experimentalmente dieron buenos resultados.

### Fuentes de corriente continua

El sistema de potencia se alimenta eléctricamente con dos Baterías Recargables en serie de 12 V, 12 placas y 72 Amperios hora cada una, el sistema de control se alimenta con una fuente regulada de 5 V que se deriva de una de las fuentes de 12 V, la cual satisface las necesidades eléctricas del sistema.

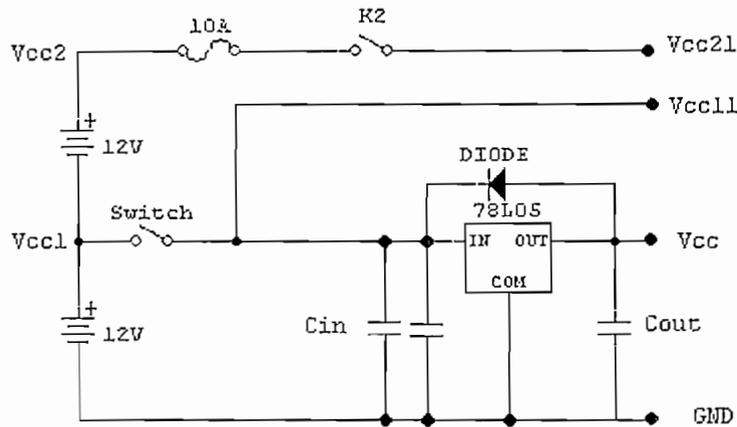


Figura 2.38 Fuentes de alimentación

La tensión de +5 V es implementada mediante el regulador LM7805 con capacidad máxima de corriente de 1 A, para alimentar los circuitos digitales.

Los valores de los capacitores son los recomendados por el fabricante del regulador, que se encuentran en los catálogos u hojas de especificaciones del elemento, el diodo se usa como protección contra cortos en la entrada, de lo contrario la capacitancia de carga puede enviar corriente hacia su salida y destruirlo, también es una recomendación del fabricante.

Las tensiones de +24 y +12V son utilizadas para la electrónica analógica y la electrónica de potencia, las tensiones necesarias para los motores, son generadas por el conversor DC/DC de tamaño reducido, con una buena eficiencia.

### Cargador de baterías

Al considerar que la batería seleccionada, se puede descargar en un máximo de 72 amperios por hora, en un día con movimiento continuo durante 6 horas en línea recta la batería no tendrá la suficiente energía para movilizar la silla, entonces se requiere que en el módulo de alimentación se complemente con un cargador de baterías con la capacidad de recuperar la energía perdida en un tiempo considerable, puede ser el tiempo que el usuario descansa, tomando un lapso promedio de 11 horas para tener un cargador de 12V y 6,5 Ah, el módulo se diseñó para conectarlo a cualquier tomacorriente de 110 V pudiendo ser portátil.

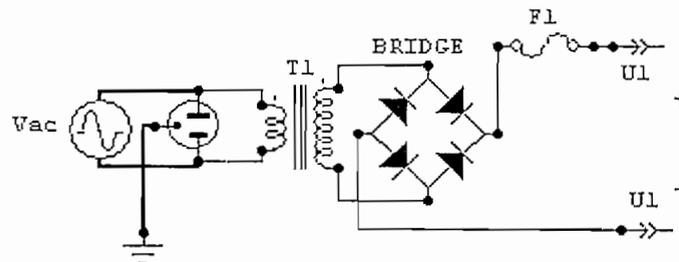


Figura 2.39 Cargador de batería

Se debe especificar que este modelo es el más común y F1 es un fusible tipo bi-metálico que protege de las sobre corrientes.

En el cargador de baterías también se implementa un circuito de supervisión del voltaje en los bornes de la batería que debe desconectar de la red eléctrica si se tiene un voltaje superior a los 13.5 V y la conecta en el caso de tener voltajes menores a los 10.5 V.

### 2.2.2 VENTAJAS ELÉCTRICAS DEL SISTEMA

Utilizar la energía eléctrica de las baterías en lugar de energía humana esto es considerada como una ventaja, ya que no todos los posibles usuarios tendrían la misma capacidad física para poder moverse.

Facilidad de manejar una silla de ruedas solo a través de sencillos movimientos de una palanca o de selectores.

Facilitar en gran manera el modo de transportarse a la persona minusválida por un camino seguro donde la silla asiste al usuario para evadir obstáculos que se puedan atravesar en el trayecto, por medio del sistema electrónico de control.

Disponer de indicadores luminosos y auditivos para seguridad y asistencia (alerta) del usuario

Para una persona que tiene deficiencia física en sus extremidades es imposible reaccionar frente a situaciones inesperadas, es por eso que se coloca luces de señalización para que el resto de personas puedan ver de manera visual si el transporte va a girar a la derecha o izquierda.

### **2.2.3 LIMITACIONES ELÉCTRICAS DEL SISTEMA**

Los precios de las sillas de ruedas eléctricas comerciales, con sistemas de asistencia en la navegación son muy altos, y en nuestro país, esto se convierte en una limitación para la mayoría de usuarios.

En el sistema de sensorización, no se puede tener una respuesta homogénea para todos los tipos de superficie en la cual rebota el ultrasonido, esto ocasiona que se produzca un desajuste en la distancia máxima que la silla debe detenerse antes de impactar en la superficie detectada.

El tiempo de vida útil de las baterías es de aproximadamente dos años, si se tiene el uso continuo, y se debe dar el respectivo mantenimiento de la misma, para no quedarse sin la carga requerida para alimentar a todo el sistema.

Las limitaciones que se presentan en sistemas parecidos son pocas, y se diseñan sistemas más completos para evitar en lo posible cualquier limitación.

## CAPÍTULO 3

### ARQUITECTURA Y PROGRAMAS DE CONTROL

La tecnología avanza y los sistemas aumentan su autonomía utilizando éstas nuevas tecnologías con métodos y dispositivos superiores.

Es así que uno de los dispositivos más utilizados en el control de sistemas tan sencillos como un generador de onda cuadrada o un temporizador hasta sistemas robóticos, son los Controladores Integrados Programables PIC's, que llevan mucha ventaja por la variedad de características que presentan frente a los dispositivos convencionales, entre las características básicas se tiene que son de fácil programación, mayor exactitud, salidas de nivel MOS sin necesidad de poner en el intermedio buffers o elementos que conviertan las señales de nivel TTL a nivel MOS, gran capacidad de procesamiento, entre las más principales.

En cuanto a las características de las pruebas realizadas en el prototipo, hacen que el peso principal en el diseño de la silla de ruedas recaiga sobre el algoritmo de control y el sistema de sensorización, siendo la base sobre la que se realiza el control de la silla, puede resultar con cierto grado de dificultad.

#### 3.1 ARQUITECTURA

El funcionamiento correcto de un sistema autónomo o semi-autónomo depende del programa de control que se encuentra ejecutándose dentro de uno o varios controladores y su respectivo hardware, ambos tiene la misma lógica de funcionamiento y dependen entre si para poder desarrollar el proceso que se requiere, en el presente proyecto se utilizan dos microcontroladores, el PIC16F877A y el PIC 12F675, además se emplea una sencilla arquitectura como la que se muestra en la Figura 3.1 en forma general.

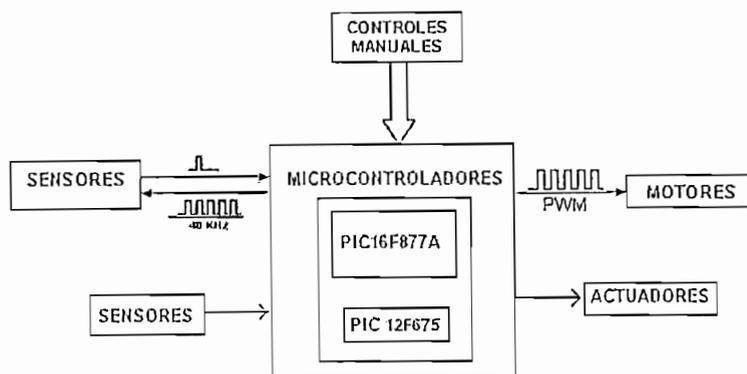


Figura 3.1 Arquitectura Básica

A continuación se presenta una tabla comparativa con las características más relevantes de cada microcontrolador que será utilizado en la arquitectura del sistema de control:

Tabla 3.1 Tabla de características relevantes de los PIC

MODELO	PIC12F675	PIC16F877A
Encapsulados (pines)	8	40
Memoria flash de programa (bytes)	-	14336
Memoria flash de programa (palabras)	1024x14	8192x14
Memoria de datos EEPROM (bytes)	128	256
Memoria de datos RAM (bytes)	64	368
Líneas entrada/salida	5	33
Temporizadores(*bits)	1(*16)	2(*8),1(*16)
Frecuencia máxima (MHz)	20	20
Fuentes de interrupción	1	14
Convertor AD de 10 bits (canales)	4	8
Modo captura, comparación y PWM	No	SI

El PIC 12F765 que se denominará PIC1, se lo utiliza para generar una onda cuadrada de 40 KHz, debido que en el PIC 18F877A (PIC 2), no existen más módulos PWM de los que se utilizan y si se genera por medio de interrupciones, el PIC 2 estaría atendiendo esta interrupción aproximadamente cada 12 microsegundos, que es la mitad del periodo para generar los 40 KHz, por lo que no se tendría un rendimiento óptimo.

El firmware para los microcontroladores se ha creado mediante el programa MPLAB IDE, este programa permite programar en lenguaje de ensamblador directamente.

El programa se puede dividir en 2 grandes partes principales, la de control de los motores mediante el PWM, y la detección de obstáculos con tomas de decisión al respecto.

Para la creación del PWM se escoge la función del microcontrolador que lo realiza teniendo que indicarle solamente el periodo y el ciclo de trabajo de las señales a generar, consiguiendo que los motores se detengan o continúen según se den las necesidades.

Por otra parte, el programa que gestiona el movimiento de la silla de ruedas recoge la información que le llega desde los sensores y con ella trata de reconstruir patrones ya definidos en el propio programa para reconocer el camino alternativo para transitar.

### **3.1.1 FUNCIONAMIENTO NORMAL DE LA SILLA**

El primer paso es revisar que las bandas estén correctamente ajustadas de los ejes de los motores a los ejes de las ruedas posteriores, que las llantas estén en condiciones aceptables para la movilización y luego se energiza el sistema a través del switch tipo llave.

El sistema en la silla de ruedas puede trabajar en dos modos de operación: Modo manual y Modo semiautónomo.

Los modos de operación de la silla de ruedas son escogidos con el selector de MODO DE OPERACIÓN que se encuentra en la parte superior del panel del módulo de mando y dependiendo de la selección se activa el módulo de sensorización o se deja al usuario que tenga completamente el control direccional de la silla de ruedas.

## Modo Manual

En modo manual el usuario a través de dispositivos periféricos de control como es la palanca de mando elige el sentido de dirección en la que desea transportarse sea para adelante, atrás, izquierda, derecha, adelante izquierda, adelante derecha, atrás izquierda, atrás derecha.

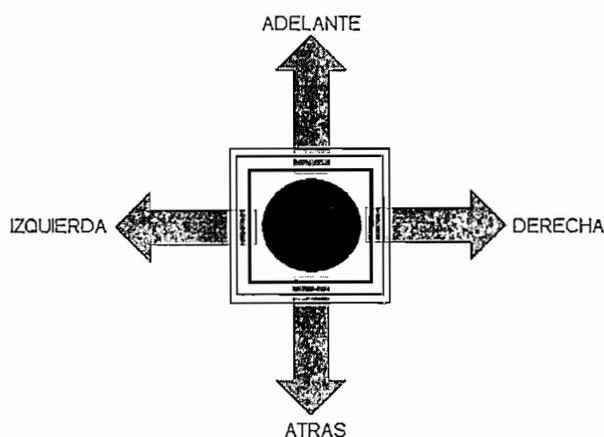


Figura 3.2 Sentidos de Dirección

En el sentido Adelante-Atrás se controla la velocidad de la silla de acuerdo a la presión o movimiento que se le aplique a la palanca, mientras más se mueva hacia delante más rápido se moverá la silla hacia delante y de igual manera hacia atrás, teniendo en cuenta que cuando se mueve para atrás la velocidad variable de la silla no alcanza el 40% de la velocidad máxima que cuando se mueve hacia adelante, por seguridad del usuario.

Cuando el usuario gira hacia la izquierda o derecha, se activan los dos motores pero en sentido contrario, con una velocidad fija aproximadamente un veinte por ciento de la velocidad normal para no tener movimientos bruscos que resultan ser peligrosos en personas minusválidas.

## Modo Semiautónomo

En el modo semi-autónomo la silla debe concebir cierto grado de autonomía con la información que obtiene del sistema de sensores, el microcontrolador PIC 12F675 genera una señal cuadrada de 40 Khz para los emisores de ultrasonido, luego de un tiempo y si existe obstáculos en el camino, los receptores envían señales acondicionadas al PIC 16F877A realizando el control de los dos motores de DC, con velocidad fija de 0.7 m/s e inversión de giro de los motores nuevamente por medio del mismo sistema de potencia.

### 3.1.2 SELECCIÓN DE LOS COMANDOS

Los selectores y pulsantes indican al módulo de control el estado en que se moverá la silla y la respectiva señalización.

En modo manual la señalización se hace directamente desde este pequeño panel de control, se tiene el selector de luces de parqueo o luces delanteras que activa los focos delanteros o traseros de acuerdo a la posición del selector, el selector de luces direccionales que indica la dirección a la que se va a girar, estos tres selectores son de tres posiciones.

El pulsante de inclinamiento arriba, activa el relé que energiza un motor DC acoplado al sistema mecánico de inclinamiento del espaldar de la silla, poniendo el espaldar a un ángulo de 90 grados con el asiento, el pulsante de inclinamiento hacia abajo, de igual manera activa el mismo motor pero esta vez en sentido contrario para que el ángulo entre el espaldar y el asiento se incremente mientras lo tenga pulsado, hasta un máximo de 160 grados.

El pulsante del pito se usa como señal auditiva de presencia en la silla para quienes no se hayan percatado.

En la Tabla 3.2 se presenta la función que realiza cada switch de acuerdo a su estado lógico:

Tabla 3.2 Tabla lógica para los switches y pulsantes

ESTADO	0 LÓGICO	1 LÓGICO
SWITCH MODO OPERACIÓN	MANUAL	SEMI-AUTÓNOMO
SWITCH LUZ DELANTERA/PARKING	DELANTERA	PARKING
SWITCH LUCES DIRECCIONALES	IZQUIERDA	DERECHA
PULSANTE DEL PITO	NO	PITA
PULSANTE INCLINAMIENTO ARRIBA	NO	ACTIVA M3 S.O.
PULSANTE INCLINAMIENTO ABAJO	NO	ACTIVA M3 S.H.

El motor 3 (M3), cumple la función de reclinar el espaldar de la silla, según el tiempo que se tenga presionado el pulsante, y el sentido de giro depende de cual pulsante se active.

Todas las señales del panel de mando van directamente al módulo de control, para que sea este el que determine la actividad que debe realizar cada módulo del sistema eléctrico y electrónico, a continuación se presenta todas las señales que se entrega al módulo de control

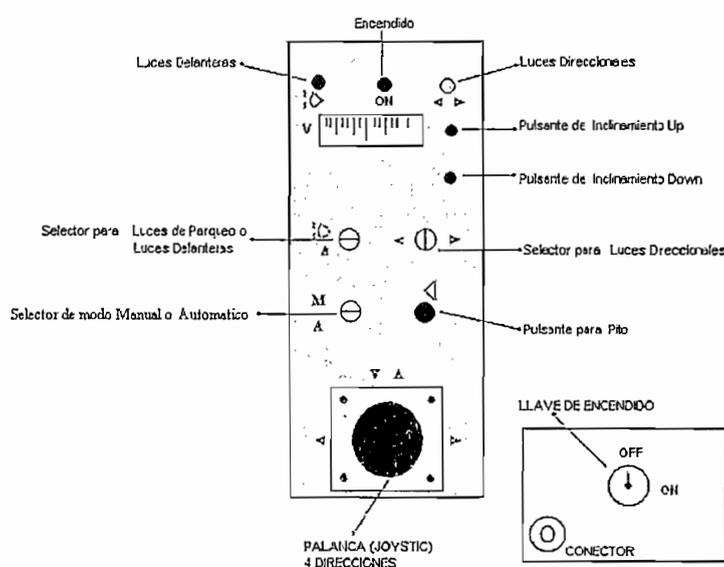


Figura 3.3 Señales de control

La palanca de mando, es la que controla la velocidad de la silla en el sentido adelante-atrás y la dirección de la silla en el sentido izquierda-derecha

Y por último la llave de encendido o llave SWITCH, maneja la energización o desenergización de todo el sistema de transporte.

### 3.1.3 FUNCIONES REQUERIDAS DEL PIC PARA EL CONTROL

- 4 pines para el módulo del conversor A/D para acondicionar digitalmente la señal de la palanca de mando, y de los sensores LM35C.
- 2 pines para los PWM's para el control de la velocidad de los motores.
- 3 pines de salida para el control e inversión de giro de los motores por medio de relés electromagnéticos.
- 10 pines para receptores de ultrasonido debidamente acondicionados.
- 1 pin de Interrupción RB0 para redundancia de seguridad en la evasión de obstáculos.
- 1 pin para leer el modo de operación de la silla de ruedas.
- 2 pines de entrada para verificar el nivel de cada batería.
- 1 pin de emisión para la indicación auditiva.
- 3 pines de salida para la respectiva señalización del sistema de transporte.
- 1 pin para obtener una señal perfectamente cuadrada de 40 KHz para la emisión del ultrasonido, este pin se encuentra en el PIC1 para optimizar el control, el resto de pines antes descritos se encuentran en el PIC2.

## 3.2 LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO

En la lógica de funcionamiento se desarrollan definiciones de registros auxiliares como variables, y tiene como fundamento la idea general de cómo funciona el sistema en su totalidad, teniendo en cuenta todos los casos que se han propuesto para el diseño del prototipo, así se tiene:

- Definición de interrupciones
- Definición de rutinas y subrutinas a realizarse
- Inicialización de los registros utilizados para el control del PIC
- Lee el modo de operación
  - Modo Automático
    - Espera señal de la palanca de mando
    - Lectura del puerto que recibe información de los sensores
    - Lectura polling de los sensores en forma continua
    - Lectura en las cuatro direcciones y la velocidad de la silla
    - Selecciona el caso de dirección
    - Activación de motores y control de potencia según cada caso de dirección
    - Activación de dispositivos de señalización o indicación
    - Revisa el modo actual
    - Finalización
  - Modo Manual
    - Lectura del Conversor A/D (Palanca de mando)
    - Espera la conversión
    - Lectura en las cuatro direcciones y la velocidad de la silla
    - Acondicionamiento digital de la señal de la palanca de mando
    - Activación de motores y control de potencia según lectura de dirección
    - Activación de dispositivos de señalización o indicación
    - Revisa el modo actual
    - Finalización

### 3.2.1 ACTIVACIÓN DE MOTORES

Con ayuda de señales digitales del puerto C que actúan sobre configuraciones de bobinas para los relés electromagnéticos que forman el sistema de potencia, se controla la dirección de la silla.

R<sub>C7</sub>: Pin 7 Puerto C que activa Q<sub>1</sub>, Bobina de Relé para los dos Motores

R<sub>C6</sub>: Pin 6 Puerto C que activa Q<sub>2</sub>, Bobina de Relé del Motor 2

R<sub>C5</sub>: Pin 5 Puerto C que activa Q<sub>3</sub>, Bobina de Relé del Motor 1

Tabla 3.3 Tabla Booleana de activación de Motores

Q <sub>1</sub> /R <sub>C7</sub>	Q <sub>2</sub> /R <sub>C6</sub>	Q <sub>3</sub> /R <sub>C5</sub>	MOVIMIENTO DE LA SILLA
General	MOTOR2	MOTOR1	
0	X	X	APAGADO
1	0	0	ADELANTE
1	0	1	IZQUIERDA
1	1	0	DERECHA
1	1	1	ATRÁS

*Para activación del motor 1 y 2 se tiene:*

X = Estado OFF de los motores

0 = Sentido de giro horario del motor (S.H.)

1 = Sentido de giro anti-horario del motor (S.A.)

### 3.2.2 CONFIGURACIÓN DE REGISTROS, MODOS Y MÓDULOS

Para la configuración del microcontrolador se considera las funciones requeridas del PIC para el sistema en su totalidad.

## Configuración de puertos

Puerto A, todo el puerto es configurado como un puerto de entradas analógicas. Donde se distribuyen las entradas analógicas de la palanca de mando y de los sensores de temperatura LM35C, excepto RA4 que se configura como entrada digital para indicar el modo de operación de la silla.

Puerto B, los 4 bits menos significativos son configurados como entradas de la interrupción externa y de dos receptores de ultrasonido y los 4 restantes como salidas digitales para controlar las indicaciones luminosas.

Puerto C, todo el puerto es configurado como puerto de salidas digitales, RC1 y RC2 se configuran en modo PWM y el resto de pines se usan para el control de activación de los relés que manejan la alimentación de los motores y para emitir una señal que va al audio-indicador.

Puerto D, todo el puerto es configurado como puerto de entradas digitales para permitir ingresar las señales acondicionadas de los receptores.

Puerto E, se configura como puerto de entradas digitales utilizadas para recibir las señales de monitoreo de nivel bajo de baterías.

## Configuración de Timers

Timer 0 (TMR0), temporizador que oscila con reloj interno a un cuarto de la frecuencia de oscilación ( $F_{osc}/4$ ), pre-escalamiento 1:1, habilitación de interrupción de desbordamiento del registro TMR0, para generar una frecuencia de 40 KHz para los emisores.

Timer 1 (TMR1), temporizador asincrónico de 16 bits con reloj interno a frecuencia de trabajo de un cuarto de la frecuencia de oscilación, utilizado para retardos utilizados en subrutinas, habilitada la interrupción por desbordamiento de los registros TMR1H:TMR1L.

Timer 2 (TMR2), temporizador de 8 bits que se usa para dar el tiempo base para el PWM cuando el valor del registro PR2 coincide con la parte alta del TMR2, este toma el valor de 00H y se especifica el periodo o frecuencia de trabajo, se realiza un pre-escalamiento de 1:4, habilitación de interrupciones por desborde del registro TMR2.

### Configuración del Conversor A/D

A través de un nivel análogo que viene del acondicionamiento de la palanca de mando se carga al capacitor de retención (sample & hold) del microcontrolador por la entrada analógica RA0/AN0, luego se utilizan 4 de los 5 canales configurados del conversor en forma secuencial, la resolución que tiene cada bit procedente de la conversión tiene un valor que es función de la tensión de referencia Vref, de acuerdo con la formula siguiente:

$$\text{Resolución} = \frac{(V_{ref+} - V_{ref-})}{1.024} \quad 3.1$$

Si la referencia positiva es la de alimentación del PIC1  $V_{ref+}=V_{cc}$  y el voltaje de referencia negativo es tierra con ocho bits de conversión se tiene una resolución de:

$$\mathfrak{R} = \frac{V_{cc}}{256} \quad 3.2$$

Por tanto la resolución exacta es de 19.53 mV/bit, y el voltaje mínimo diferencial es de 2 V.

A continuación, se indican los pasos que hay que efectuar para realizar una conversión A/D [13]:

- 1) Configurar el módulo C A/D
  - Configurar los pines que actuarán como entradas analógicas, las que trabajan como E/S digitales y las usadas para la tensión de referencia (ADCON 1)
  - Seleccionar el reloj de la conversión (ADCON 0)
  - Seleccionar el canal de entrada A/D (ADCON 0)
  - Activar el módulo A/D (ADCON 0)
  
- 2) Activar si se desea, la interrupción escribiendo sobre PIE1 y PIR1
  - Borrar la bandera ADIF
  - Poner en 1 el bit ADIE
  - Poner en 1 los bits de habilitación GIE y PEIE
  
- 3) Tiempo de espera para que transcurra el tiempo de adquisición
  
- 4) Inicio de la conversión
  - Poner en 1 el bit  $\overline{\text{GO/DONE}}$  (ADCON 0)
  
- 5) Tiempo de espera para completar la conversión A/D que puede detectarse
  - a. Por la exploración del bit  $\overline{\text{GO/DONE}}$ , que al completarse la conversión pasa a valer 0
  - b. Esperando que se produzca la interrupción si se ha programado, al finalizar la conversión
  - c. Aunque no se permita interrupción, el señalador ADIF se pondrá a 1 al finalizar la conversión
  
- 6) Leer el resultado en los 10 bits válidos del ADRESH:L y borrar la bandera
  
- 7) Para una nueva conversión regresar al paso 1) o al 2).
  - El tiempo de conversión por bit está definido por  $T_{AD}$ .
  - Se exige esperar un mínimo de  $2 T_{AD}$  para reiniciar una nueva conversión.

La justificación se realiza hacia la izquierda para desprestigiar los dos bits menos significativos; cinco canales analógico desde AN0 hasta AN4; voltaje de referencia positivo es VDD y voltaje de referencia negativo es Vss, el reloj de conversión con frecuencia de  $F_{osc}/8$  según las especificaciones indicadas en la Tabla 3.4, se habilita el conversor y se da la señal de encendido del módulo.

Tabla 3.4 Tiempos de adquisición vs frecuencia de operación del PIC1

AD Reloj (TAD)		Frecuencia del Dispositivo			
Operación	ADCS1:ADCS0	20 MHz	5 MHz	1.25 MHz	333.33 KHz
2 Tosc	00	100 ns	400 ns	1.6 us	6 us
8 Tosc	01	400 ns	1.6 us	6.4 us	24 us
32 Tosc	10	1.6 us	6.4 us	25.6 us	96 us
RC	11	2-6 us	2-6 us	2-6 us	2-6 us

Para poder obtener los resultados de las diferentes conversiones en cada canal, se espera que termine la conversión de un canal se apaga el conversor, se guarda este valor en un registro auxiliar y nuevamente se prende el conversor pero antes se desactiva el canal por el que se hizo la anterior conversión y activando el canal por donde se realizara la siguiente conversión, de esta manera no se tiene conflicto en los resultados y se multiplexa el conversor a los cinco canales.

### Configuración del módulo PWM

Obteniendo un número digital de ocho bits que se cargan al registro que determina el ancho de pulso (10 bits) del módulo del PWM y se ignoran los 2 bits menos significativos, sacando un PWM variable por RC2/CCP2 el cual va a las bases de las configuraciones de los transistores de potencia.

Los pasos a seguir para realizar la configuración del modo PWM son los siguientes [13]:

Asignar el período cargando el oportuno valor en el registro PR2

- 1) Asignar el ancho de pulso cargando en el registro CCPR1L
- 2) Configurar la línea RC2-RC1/CCPX como salida
- 3) Asignar el valor del pre-escalador
- 4) Activar el TMR2 escribiendo en T2CON
- 5) Configurar el módulo CCPX en modo PWM

En modo PWM el timer usado es el TMR2, con período ajustable desde un máximo de 256  $\mu$ s hasta un mínimo de 62.5 ns, ancho de pulso variable de acuerdo al registro del conversor A/D, salida por el puerto C, pre-escalamiento de 1:4 de TMR2, modo PWM del registro CCP1, encendido del módulo: **[8]**

$$Periodo_{PWM} = [(PR2)+1] 4 T_{osc} (TMR2_{valor\_pre-escalador}) \quad 3.3a$$

$$PR2 = \left( \frac{f_{osc}}{4 f_{PWM}} * \frac{1}{TMR2_{valor\_pre-escalador}} \right) - 1 \quad 3.3b$$

Para una frecuencia de oscilación del cristal de 4 MHz, con un valor de pre-escalamiento del TMR2 igual a 1:4 y si se quiere obtener una frecuencia de 1.1KHz para el PWM de los motores, en el registro PR2 se coloca el valor de 226 en sistema decimal.

Para el ancho de pulso se utiliza solamente el registro con los bits más significativos que se encuentran en el registro CCPR1L, que es el registro donde se carga el valor digital de la conversión A/D de la palanca de mando, en la ecuación (3-4), se indica como calcular el ancho de pulso **[8]**:

$$ancho_{Pulso} = (CCPR1L : CCP1CON < 5 : 4 >) T_{osc} (TMR2_{valor\_pre-escalador}) \quad 3.4$$

### 3.3 PROGRAMA DE CONTROL

El programa es realizado en el software MPLAB, seleccionando el dispositivo en el que se va a trabajar, después de compilarlo para obtener un archivo que sea ejecutable se puede escribirlo en el PIC en el lenguaje de máquina.

#### 3.3.1 PROGRAMA PRINCIPAL Y SUBROUTINAS

Luego de configurar los registros de control que se utilizarán en el programa de control; se cargan valores predeterminados en registros auxiliares utilizados como variables de control.

Se realiza un polling del pin RA3 que indica el estado del MODO DE OPERACIÓN del sistema, dependiendo de la elección se tiene:

En modo MANUAL espera un tiempo de adquisición ( $T_{adq}$ ) o muestreo para que el valor análogo se cargue en el capacitor ( $C_{hold}$ ) del módulo de conversión A/D mediante la subrutina ESPERAR, luego enciende el módulo esperando que finalice la conversión, una vez terminada la conversión se apaga el módulo de conversión y se llama a la subrutina CANAL0 la cual se encarga de realizar la conversión del canal 0 acondicionarla dentro del microcontrolador y cargar el valor digital convertido en el respectivo registro de ancho de pulso del modo PWM luego se activan los motores según la lógica entregada por las señales del palanca de mando y nuevamente va al inicio del bucle PROGRAM.

En modo SEMI-AUTONOMO se llama a la subrutina LEER encargada de leer el estado de los sensores y en donde se realiza un barrido de los receptores y de acuerdo al estado de estos se realiza el control de las bobinas de los relés que actúan sobre la activación de los motores, es decir se realiza el control de movimiento de la silla y nuevamente va al inicio del bucle PROGRAM.

## Subrutinas

Las subrutinas son pequeños programas dedicados a realizar una función específica dentro del programa principal, las subrutinas utilizadas son:

### *Subrutina RETARDO*

Se ubica en el banco donde se encuentra el registro auxiliar CONTADOR al cual se le asignan valores decimales de 100, 255 que se decrementa cada dos ciclos de maquina, obteniendo así un retardo de 200 us y 510 us, en la tercera subrutina de RETARDO se utiliza otro registro AUXILIAR al cual se le asigna un valor decimal de 255 que cuenta los 510us 255 veces, obteniendo un retardo de 0.13s luego se regresa de la subrutina. Todas estas subrutinas de RETARDO se utilizan como bases de tiempo que se necesita en el control del sistema.

### *Subrutina ESPERAR*

En esta subrutina se hace la llamada a la subrutina RETARDO2 esperado que transcurra un tiempo de 510 microsegundos para tener un tiempo de adquisición para la conversión A/D, luego se empieza la conversión y se revisa que termine la conversión mediante polling de la bandera ADIF, y cuando ya ha terminado de realizar la conversión regresa al programa principal.

### *Subrutina ANDAR*

Esta subrutina espera una señal del palanca de mando para asistir en la movilidad del usuario. Se carga el valor de la conversión en el registro AUX8, se resta luego el valor decimal 134 que es el límite en el palanca de mando para empezar a mover la silla hacia delante, si el resulta es positivo la silla se mueve hacia delante caso contrario la silla permanece en estado de espera.

### *Subrutina CANAL 0*

Luego de tener el resultado digital de la conversión en el registro ADRESH, este valor se copia en un registro auxiliar AUX1, para luego realizar un acondicionamiento digital de esta señal y poder tener una señal siempre positiva en un rango adecuado, el acondicionamiento digital consiste en encontrar el valor digital del canal análogo cuando el palanca de mando se encuentra en estado de reposo inicial, este valor es 2,5 voltios el cual se refleja en el módulo conversor como una palabra digital de ocho bits de 1000 0000, luego se varía la señal análoga a los valores mínimo de 2 V y máximo de 3 V encontrando los respectivos valores digitales de 0101 0110 en el mínimo y de 1010 1010 en el máximo.

En base a los resultados obtenidos se realiza una operación con el registro AUX1 restando en binario 1000 0000, para tener una señal que empiece de cero, se revisa el signo de la operación a través del bit CARRY, para tener el sentido de dirección de la silla, luego según el resultado del CARRY se realiza o no el *complemento de dos* del registro resultado AUX1, este resultado en módulo se rota tres veces hacia la izquierda lo que significa que se multiplica por ocho que es la relación de ganancia para tener el máximo ancho de pulso y se carga en el registro ancho de pulso del PWM CCPR1L y regresa de la subrutina al programa principal.

El complemento de dos se obtiene complementando AUX1 y luego se suma uno.

### *Subrutina CANAL 1*

Se habilita el canal 1 en la AN1, para convertir la señal del palanca de mando a digital, se resta el valor de 128 en decimal y se saca el signo de la operación, si es positivo se envía a la subrutina IZQUIERDA, en caso de ser negativo se llama a la subrutina DERECHA, que activan las bobinas de manera que la silla de ruedas gire para donde el usuario le indique.

### *Subrutinas CANAL 2 y CANAL 3*

En los canales AN2 y AN3 ingresan las señales de los sensores de temperatura LM35C y se lee la temperatura de los dos ramales de transistores no de forma simultanea sino en forma alternada, se realizan pruebas para tener la temperatura leída por los LM35C a la cual los transistores deben quedar en estado inactivo, para evitar que se destruyan, enviando señales a la bobina que alimenta los dos motores; la temperatura crítica es convertida en una palabra digital de ocho bits y se procede con el método de resta, para determinar el signo y en base a él desactivar los motores.

### *Subrutina LEER*

Aquí se espera una señal para empezar a activar los motores, se revisa el puerto D y dos pines del puerto B, si algún bit se encuentra en 1 L quiere decir que se ha detectado un obstáculo, se determina a que lado de la silla está el objeto y según el caso se activan los motores para evadir dicho obstáculo o esperar una decisión del usuario.

En esta subrutina se tiene los casos donde: el objeto puede presentarse totalmente frontal llamando la subrutina *FRONTAL (FR)*, al lado izquierdo del frente se llama la subrutina *FRONTAL\_IZQUIERDA (FI)*, o al lado derecho del frente la subrutina *FRONTAL\_DERECHA (FD)*, lateral al lado izquierdo la subrutina *LATERAL\_IZQUIERDA (LI)* o lateral al lado derecho la subrutina *LATERAL\_DERECHA (LD)*, posterior al lado izquierdo la subrutina *POSTERIOR\_IZQUIERDA (PI)*, o posterior al lado derecho *POSTERIOR\_DERECHA (PD)*, y finalmente en la parte posterior *POSTERIOR (P)*, en el contorno de la silla, además se tiene dos pares de sensores en la parte frontal hacia el suelo llamando la subrutina *FRONTAL\_ABAJO (FA)*, y dos en la parte posterior hacia el suelo llamando la subrutina *POSTERIOR\_ABAJO (PA)*, que indican la existencia de escalones o gradas.

Si no existe ninguna señal de estos puertos la silla empieza a caminar automática a una velocidad constante y tres veces menor que la velocidad máxima cuando el usuario dé la orden.

En el momento que se detecta un obstáculo o escalón en el camino se apagan los motores, se espera un tiempo y revisa el algoritmo más apropiado para realizar la activación de los motores, llamando las subrutinas pertinentes que se encuentran dentro de la subrutina general.

Se tiene el caso donde la silla este en un camino sin salida, al final del camino cuando se detecta el obstáculo para seguir adelante que es la pared, se apagan los motores y se espera un tiempo de medio segundo para luego encender los motores de tal forma que la silla gire hacia la derecha un ángulo de 180 grados durante un tiempo; esto se realiza en la subrutina SIN\_SALIDA.

También se tiene un algoritmo para el caso donde la silla detecte que hay dos caminos alternativos por donde puede circular y espera que el usuario le indique que camino seguir.

#### *Subrutina USUARIO*

Se desenergizan los motores, revisa si el usuario da un comando de giro de la silla sea a la izquierda o a la derecha a través de la subrutina CANAL1, de no darse la señal se queda esperando y retorna nuevamente a la subrutina LEER.

#### *Subrutinas BATERÍA1, BATERÍA2*

Para revisar el nivel de voltaje en las baterías se realiza un circuito acondicionador el cual entrega un estado lógico, que indica un nivel bajo del voltaje de las baterías, e ingresan por los pines RE0 y RE1, que son revisados continuamente, si algún pin tiene el estado 1L se tendrá una señal cuadrada de período igual a 0.5 s en RC3

### 3.4 DIAGRAMAS DE FLUJO

En cuanto a los diagramas de flujo, se tienen los caminos lógicos para que el PIC desarrolle el control del sistema en integridad, a continuación se indican las subrutinas utilizadas:

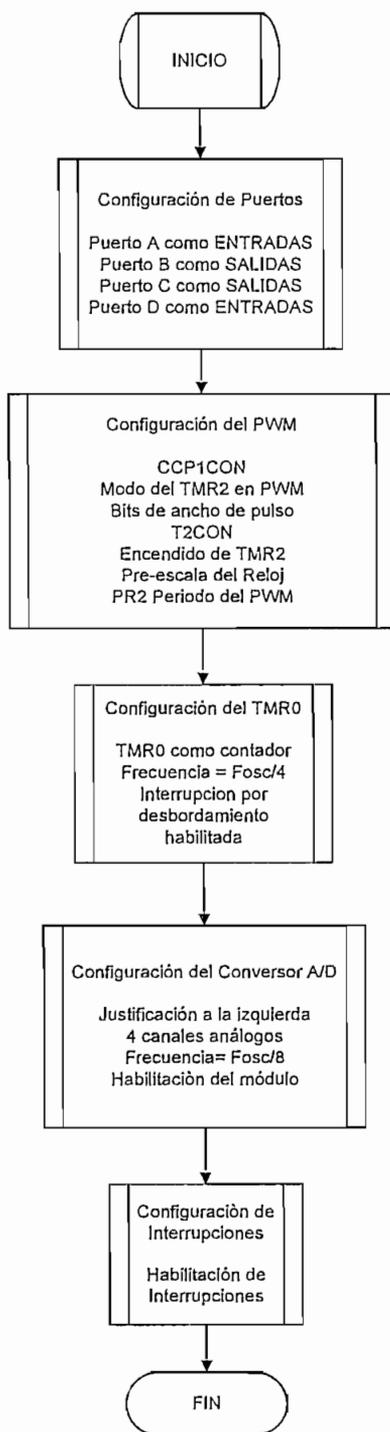


Figura 3.4 PROGRAMA PRINCIPAL

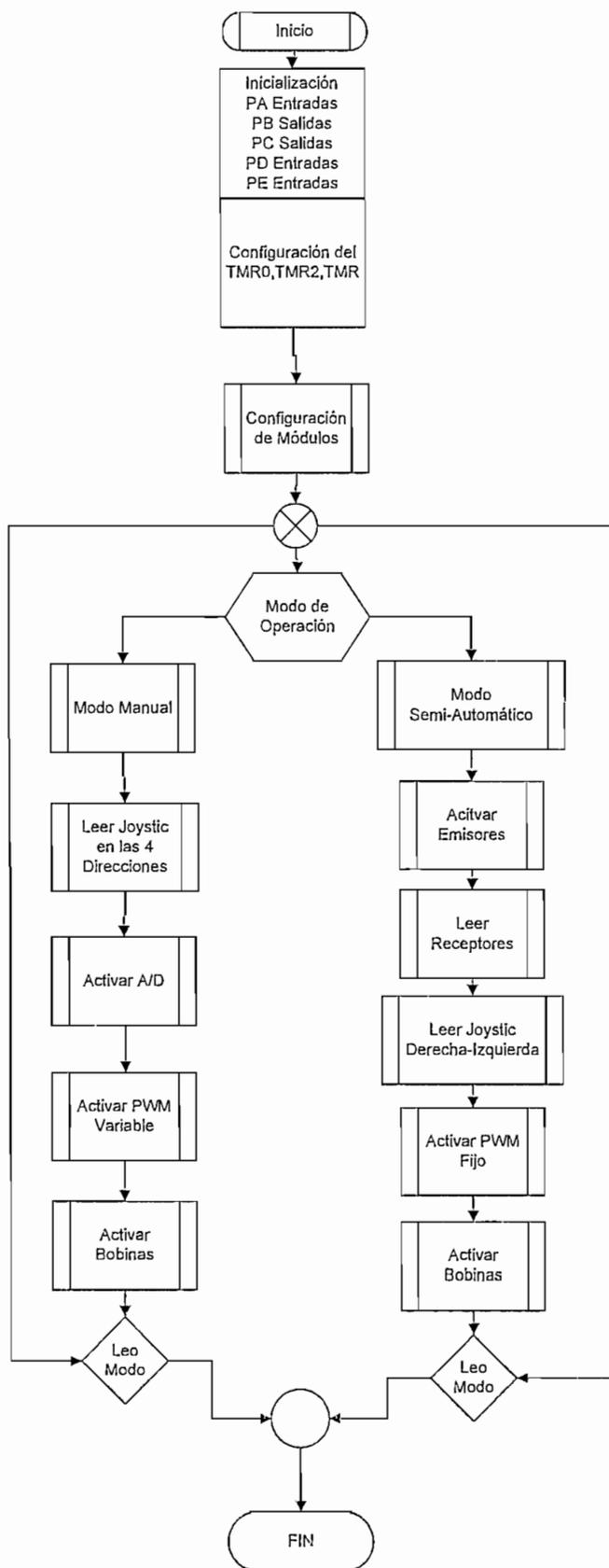


Figura 3.5 INICIO del Programa

La variación de RETARDO 1 es que el CONTADOR toma un valor de 100 en lugar de 250.

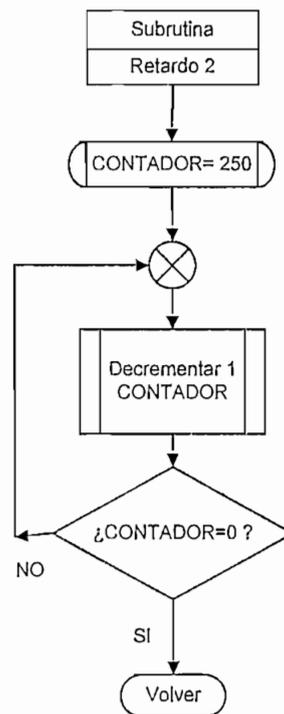


Figura 3.6 Subrutina RETARDO 2

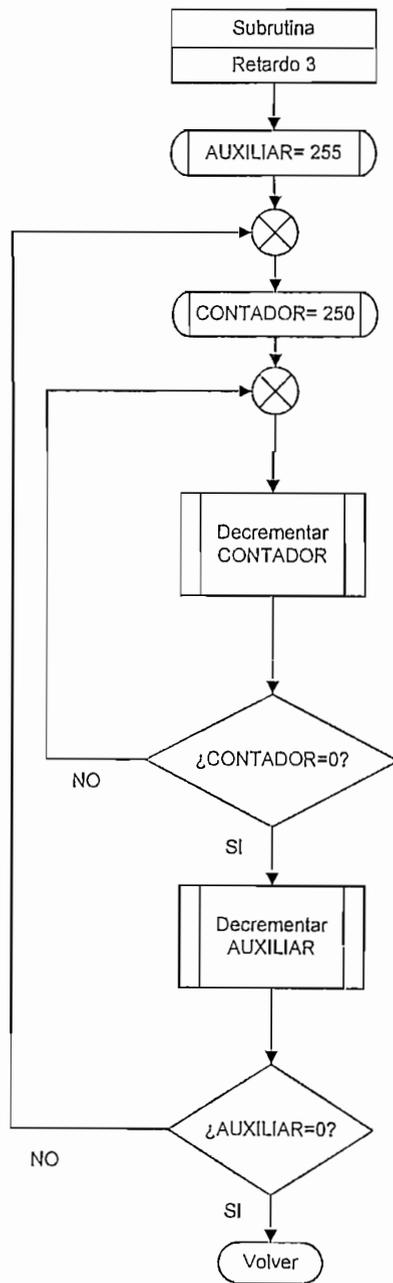


Figura 3.7 Subrutina RETARDO 3

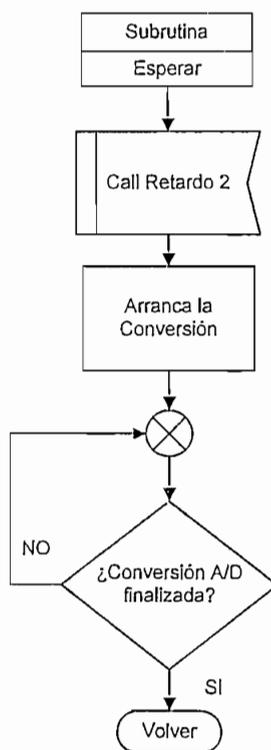


Figura 3.8 Subrutina ESPERAR

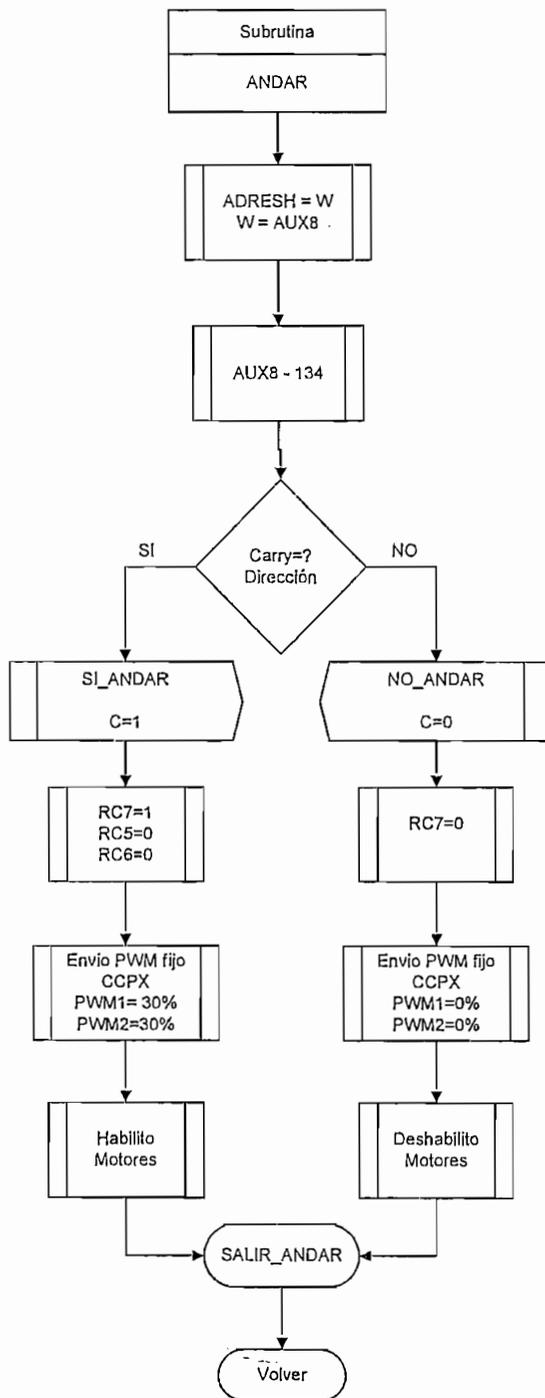


Figura 3.9 Subrutina ANDAR

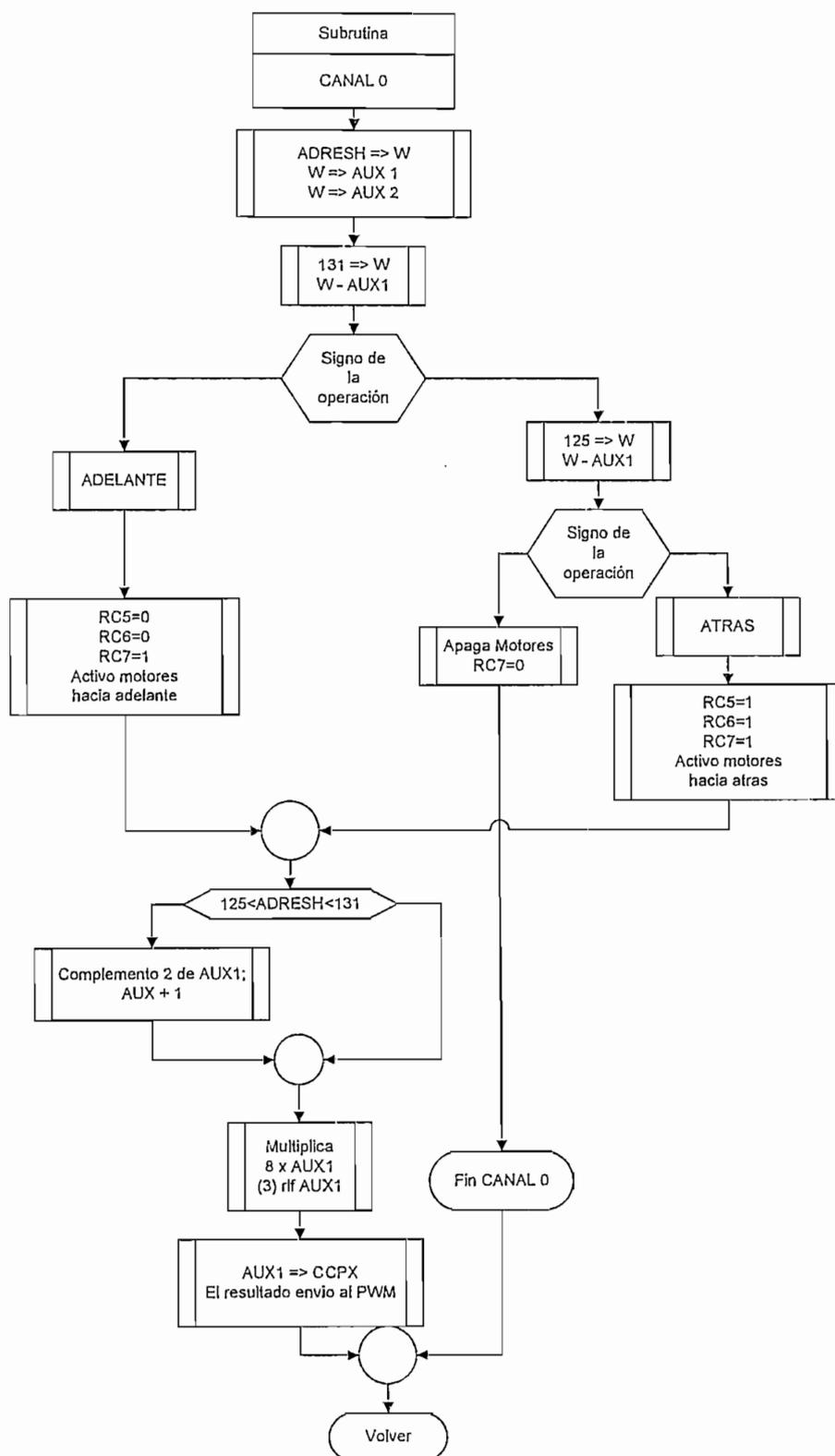


Figura 3.10 Subrutina CANAL 0

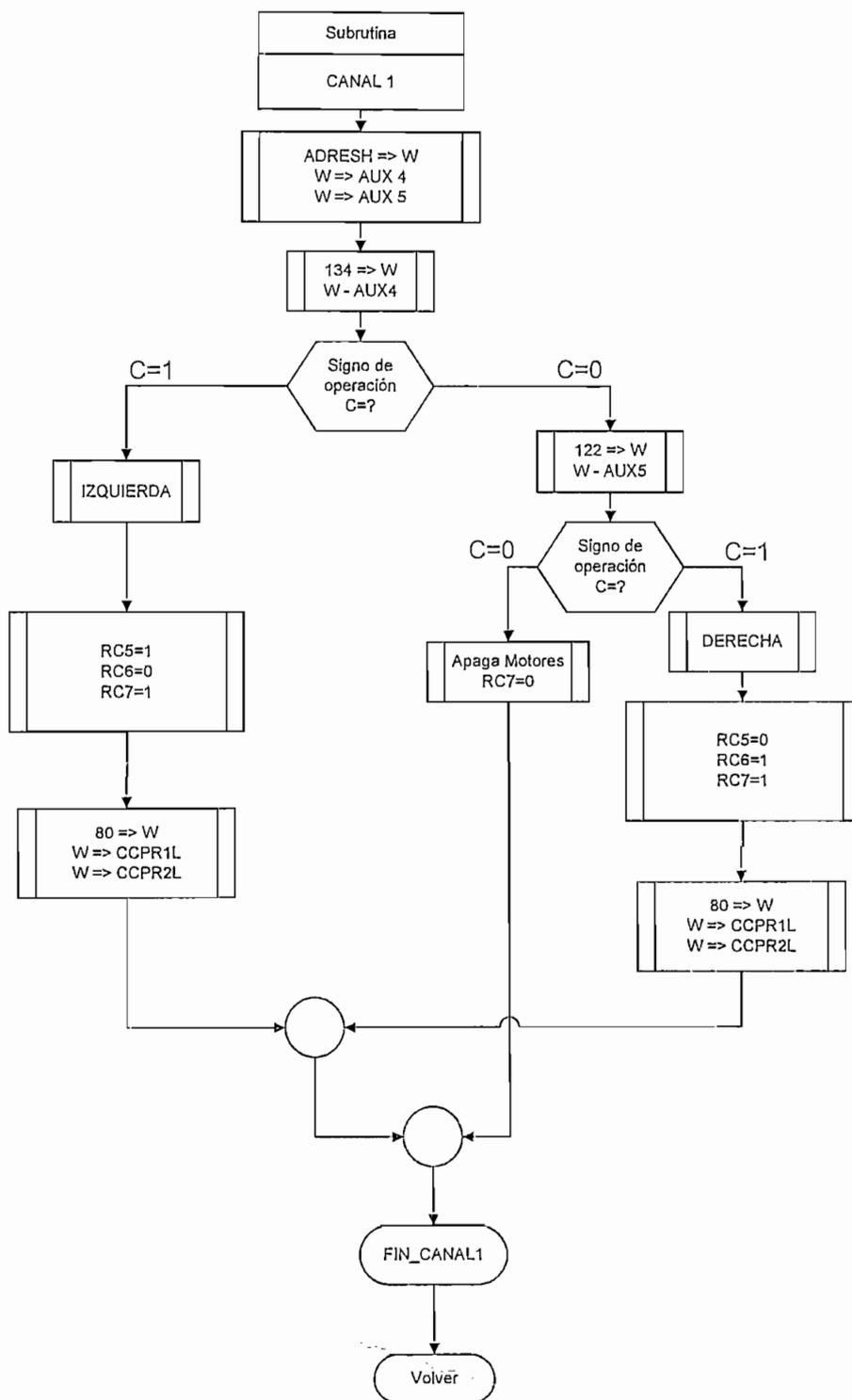


Figura 3.11 Subrutina CANAL 1

La subrutina CANAL3 es idéntica.

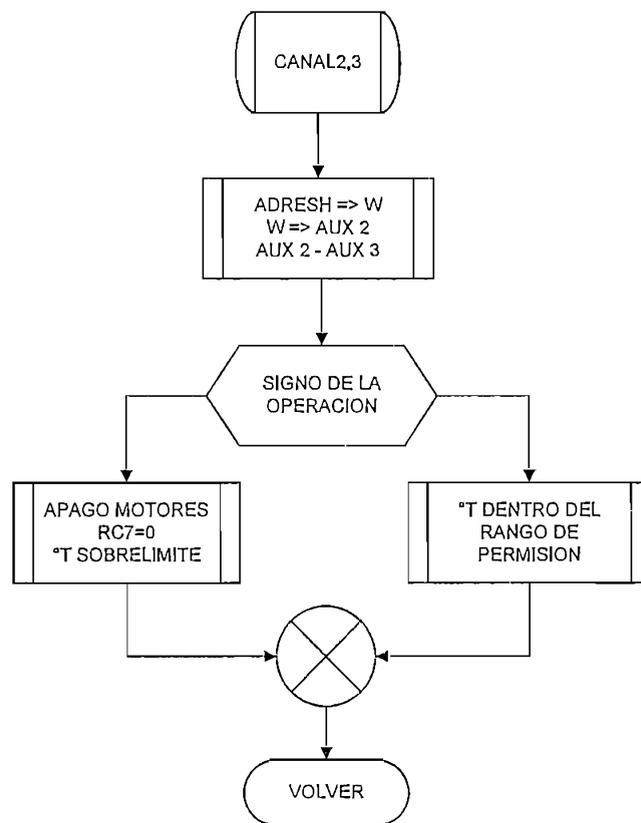


Figura 3.12 Subrutina CANAL 2



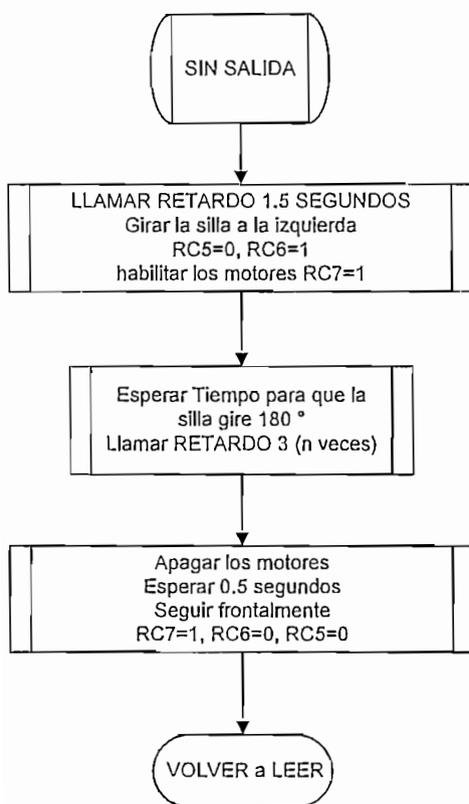


Figura 3.14 Subrutina SIN SALIDA

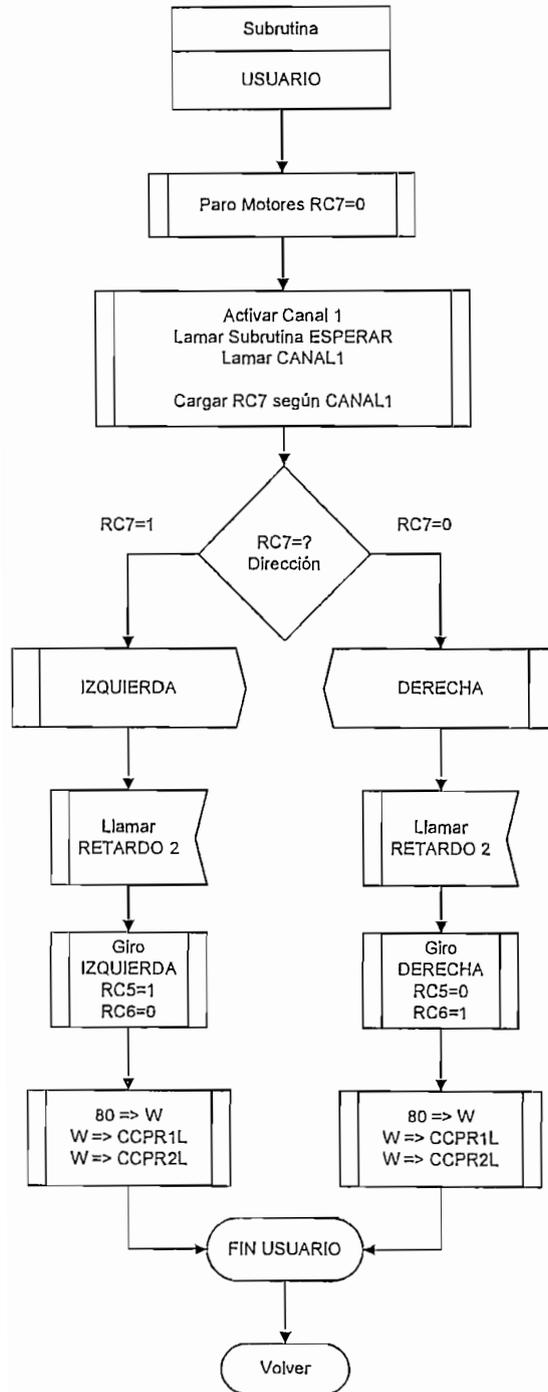


Figura 3.15 Subrutina USUARIO

La subrutina BATERÍA 2, es idéntica.

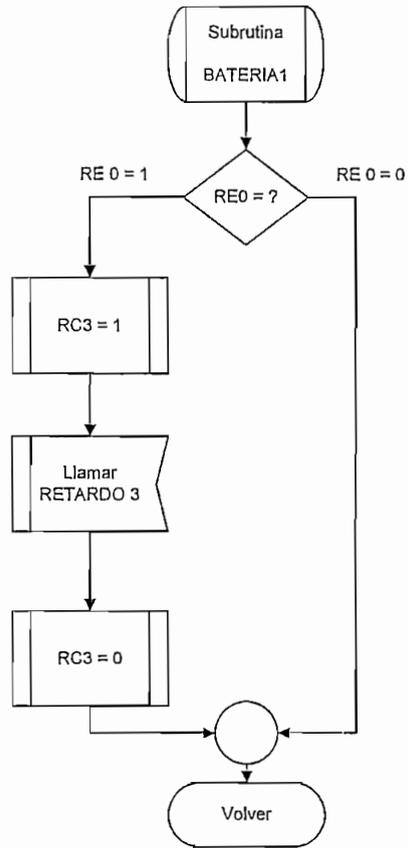


Figura 3.16 Subrutina BATERÍA 1

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Hoy en día se desarrollan ayudas para la movilidad y orientación, basadas en soluciones tecnológicas avanzadas con origen en la robótica, automatización, electrónica e informática aplicadas, pero integrando estrategias específicas de funcionamiento, basadas en la investigación de los aspectos humanos y psicosociales de la comunicación hombre-máquina, de modo de permitir que estas técnicas de rehabilitación desarrolladas puedan contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas con deficiencias.

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas a los sensores usados en la construcción del prototipo, como son pruebas de: separación entre sensores, ubicación de sensores, distancias a objetos de distintos materiales, también las pruebas realizadas a los motores y los resultados obtenidos de dichas pruebas, así mismo se presenta un listado de los elementos y materiales eléctricos y electrónicos usados en la fabricación del prototipo con sus respectivos costos.

#### 4.1 PRUEBAS DE LOS SENSORES DE ULTRASONIDO

Hoy en día se trabaja en el desarrollo de sensores de proximidad ultrasónicos, los que son aplicados en la fabricación de vehículos que facilitan el desplazamiento de personas con discapacidades motoras.

Básicamente se trata de lograr que el sensor se desempeñe como un buen aparato sonar, de un modo similar al de los empleados para la navegación. La recepción de la señal, una vez producido el impacto con el objeto, permite conocer la magnitud de la distancia, así como las características de los objetos próximos (si la superficie es lisa o rugosa, cuales son sus dimensiones, etcétera), ya que dependiendo de estas características el objeto tendrá diferente índice de refracción.

La elección de sensores de ultrasonido para la detección y medición de la distancia de los objetos del entorno se basa tanto en su bajo costo como en sus características técnicas suficientemente probadas en sistemas de guía para robots aplicados a procesos industriales.

Por tal motivo el par emisor - receptor de ultrasonido, utilizado en este trabajo es de la línea Jameco ya que han sido probados y utilizados en proyectos anteriores, estos sensores presentan las siguientes características:

Frecuencia de operación: 40KHz  $\pm$  1.0KHz

Capacitancia: 2000pF  $\pm$  30%

**Transmisor:**

Ancho de banda: 4.0KHz/112dB

Nivel de presión de sonido: 119dB/40  $\pm$  1.0KHz

**Receptor:**

Ancho de banda: 3.5KHz/-71dB min.

Sensibilidad: 65dB/40  $\pm$  1.0KHz (0dB vs. 1V  $\mu$ bar) R= 3.9K $\Omega$

Debido a que el fabricante proporciona muy pocos datos acerca de los sensores, se procede a realizar pruebas para determinar los niveles de voltaje que entrega el receptor y en base a estos resultados se realizó el acondicionamiento de la señal, los resultados se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados experimentales

Separación entre sensores	Amplitud del receptor obstáculo a 30cm	Amplitud del receptor obstáculo a 50cm
3 cm	72 mV	32 mV
4 cm	74 mV	34 mV
5 cm	85 mV	36 mV
6 cm	93 mV	40 mV
6.5 cm	87 mV	38 mV
6 cm	85 mV	36 mV

De estas pruebas, se puede ver que la distancia óptima de separación entre el par emisor - receptor es de 6cm, medidos desde la parte central tanto del emisor como del receptor, obteniendo una mayor amplificación y sensibilidad.

El ángulo de visión varía con la distancia, esto es bien sabido ya que todo sensor de ultrasonido tiene una emisión de tipo lobular, los resultados de esta prueba se muestran en forma gráfica en la Figura 4.1.

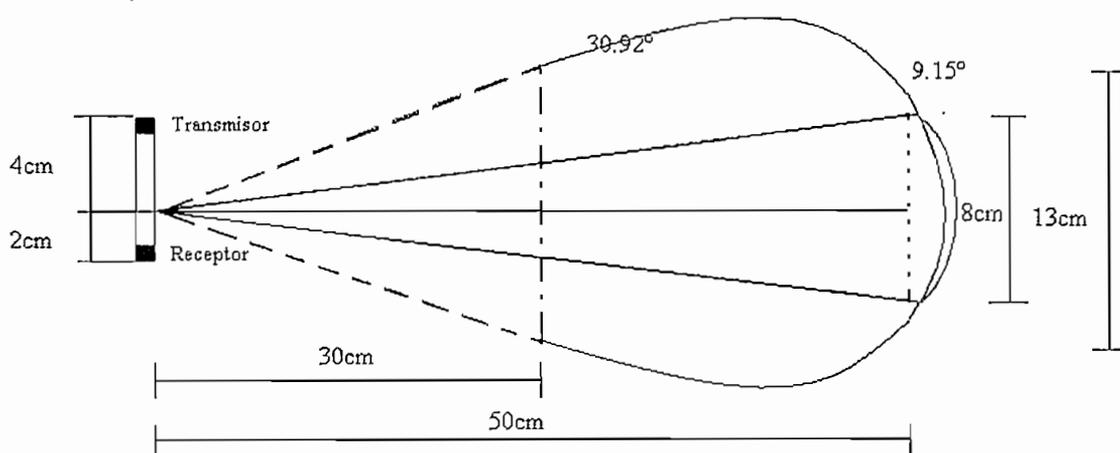


Figura 4.1 Ángulo de visión de los sensores

## 4.2 UBICACIÓN EXPERIMENTAL DE SENSORES

Un conjunto de sensores de proximidad podrían detener o reducir la velocidad del vehículo frente al peligro de una colisión, o brindar asistencia en el desplazamiento por lugares estrechos u obstaculizados. Por otra parte, se debe tomar en cuenta que el número de sensores a utilizarse no sean demasiados, estos deben estar en función de las características propias del destinatario, evitando de esta manera la sobrecarga de información.

Luego de colocar varios pares de sensores y de probar algunos tipos de distribución en la periferia de la silla de ruedas, se llega a la siguiente conclusión:

La disposición del cinturón de sensores en la periferia de la silla de ruedas es la que muestra la Figura 4.2, hallando que ocho es un número óptimo de sensores para cubrir aceptablemente la zona circundante, esta es dividida en ocho sectores angulares diferentes.

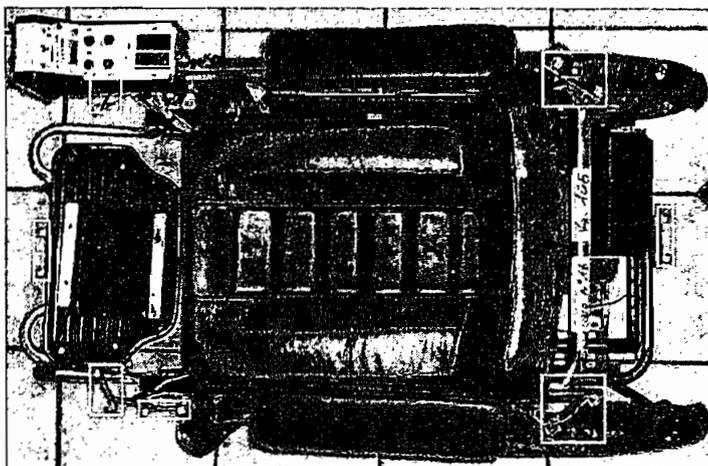


Figura 4.2 Ubicación de los sensores

Los ocho pares de sensores informan del contorno a la silla de ruedas, pero en caso de gradas o desniveles tanto en el frente como en la parte posterior, se experimentaron algunas formas de disposición de los sensores encontrando que para mayor seguridad, se colocan un par de sensores en cada llanta dirigidos hacia el suelo en forma perpendicular.

### 4.3 DETECCIÓN DE DIFERENTES MATERIALES

Debido que la incidencia de la señal emitida depende mucho de la superficie de un objeto y del material del que está constituido, influyendo en las mediciones, se procede a realizar pruebas para determinar la distancia a la que el sensor reconocerá un objeto, para ello se emplean superficies planas de distintos materiales y superficies irregulares.

Para estas pruebas se consideran materiales con los que comúnmente se encontrará el prototipo como son: concreto (paredes, pisos), puertas (madera, metal), cartón, telas de ropa, piel, fibra, materiales que tienen diferente índice de refracción.

Cabe recalcar que el material tomado como referencia para el acondicionamiento es una pared de superficie plana, a la que el sensor con su respectivo acondicionamiento detecta a una distancia de 50cm.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Tabla de distancias a objetos de distinto material

Material	Distancia a la que Sensa
Concreto	50cm
Metal	50cm
Madera	45cm
Placa de fibra	40cm
Cartón	30cm
Piel	25cm
Tela	20cm

De los resultados obtenidos se ve que el acondicionamiento de la señal recibida permite registrar distancias en un rango propicio, incluso con materiales como son la piel y las telas usadas como vestimenta, que son materiales con bajo índice de reflexión. También se probó con elementos angostos y algunos pequeños los cuales fueron detectados a una menor distancia y con la limitante de que deben estar ubicados prácticamente enfrente del sensor.

#### 4.4 PRUEBAS EN LOS MOTORES

El prototipo usa dos motores de corriente continua los cuales presentaban ciertas fallas mecánicas, que luego del mantenimiento respectivo fueron reducidas, se procedió a realizar las pruebas respectivas para tener los parámetros eléctricos de los motores, hallándose una gran diferencia entre ambos, estas diferencias se describieron en el Capítulo 2.

Se realizó también pruebas de velocidad en donde se encontró que uno de los motores tenía una velocidad menor a la del otro motor. El problema de tener

velocidades distintas en los motores, es no poder dirigir la silla en una trayectoria recta como el usuario decide, sino que con mayor distancia recorrida la silla tiene un ángulo de desviación, que esta en función de la diferencia de velocidades, en pequeñas distancias recorridas este problema no es muy apreciable.

Una de las opciones para solucionar momentáneamente el problema de la diferencia de velocidades, fue añadir una resistencia de potencia en serie al motor con mayor velocidad, para igualar el valor de las resistencias de armadura de los motores, teniendo mejor respuesta de velocidad, pero con una disminución considerable del torque en el motor al cual se colocó la resistencia y mayor potencia de pérdidas.

Otra opción fue el alimentar a los motores con una señal PWM de igual frecuencia pero de distinta relación de trabajo, reduciendo así el voltaje en la armadura del motor con menor resistencia de armadura, obteniendo el mejor resultado.

La segunda opción fue favorable y por consiguiente se la aplicó como una solución válida para igualar en lo posible las velocidades de ambos motores.

#### 4.5 LISTA DE ELEMENTOS Y PRECIOS

Se presenta a continuación un listado general de los elementos utilizados en el ensamblaje del prototipo, con los costos a los que se hallan en el mercado local, en dólares Americanos.

Tabla 4.3 Lista de elementos y precios

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Silla de ruedas	1	800	800
Motores ruedas	2	150	300
Motor espaldar	1	15	15
Baterías	2	45	90
Sensores	12	12,5	150

<b>Elementos Electrónicos</b>			
Resistencias 1/4 W	181	0,04	7,24
Resistencias 1/2 W	8	0,06	0,48
Capacitores cerámicos	39	0,09	3,51
Capacitores electrolíticos	31	0,08	2,48
Potenciómetros	12	0,75	9
Potenciómetros de precisión	4	1,5	6
Diodos rectificadores	15	0,05	0,75
Diodos de germanio	12	0,14	1,68
Zócalos DIP14	12	0,1	1,2
Zócalo DIP8	1	0,18	0,18
Operacional TL084	12	0,91	10,92
Leds	16	0,08	1,28
PIC16F877A	1	9	9
PIC12F675	1	4,9	4,9
Operacional LM741	3	0,45	1,35
Zócalo DIP40	1	0,25	0,25
Transistores 2N3904	25	0,07	1,75
Optotransistores	2	0,6	1,2
Cristal 4MHz	1	0,15	0,15
Pulsador	2	0,05	0,1
Reguladores 78XX	5	0,55	2,75
Selectores 3 posiciones	3	1	3
Pulsador grande	1	1,5	1,5
Pito	1	7	7
Relés 16A/24V	3	12	36
Relés 10A/24V	2	8	16
Relés 10A/12V	3	3	9
Relés 8A/24V	4	4	16
Transistores TIP 41B	2	0,51	1,02
Transistores MJ15003	8	2,6	20,8
Diodos BYW29	6	1,5	9
Capacitores de alto voltaje	7	1,5	10,5
Disipador	1	30	30
Borneras regleta 11 puntos	3	0,5	1,5
Borneras regleta flexible	1	1,5	1,5
Conectores	6	0,85	5,1
Conectores de potencia	2	3	6
Cable con conectores DB25	1	3,5	3,5
Buses de datos	2	1,5	3
Placas			160
Investigación e ingeniería			1000
<b>Otros Gastos</b>			30
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>DÓLARES</b>	<b>2791,59</b>	

El prototipo está provisto de señalizaciones de parqueo y direccionales, luces frontales y traseras que indican a las personas del entorno acerca de la cercanía o movimientos que hará la silla.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del presente prototipo para ayudas electrónicas de traslado constituye una fuente de asistencia como una nueva herramienta para aumentar la autonomía de determinadas personas que sufren deficiencias sensoriales o motoras.

Se finalizó la elaboración de un vehículo, versátil y configurable en su grado de autonomía, orientado especialmente a personas minusválidas no videntes, que están siendo objeto de atención en algunas instituciones, de un modo especial en la Fundación Ecuatoriana para el No Vidente (FENOVI)

Se pone a disposición de estas personas un medio de desplazamiento que resuelva en cierto grado y de forma personalizada los problemas de traslado en un ambiente doméstico.

Se pretende con ello no sólo resolver el problema físico de acceso a los distintos lugares del entorno sino también y sobre todo conseguir a través de esta actividad, el desarrollo de sus capacidades cognoscitivas, perceptivas y de relación con el entorno tomando actitudes activas frente al medio al poder decidir, seleccionar y ejecutar, con lo que esto supone en el desarrollo global del individuo.

Se cumple en su totalidad los requerimientos de velocidad, peso máximo, maniobrabilidad, seguridad, etc. necesarios para movilizar a personas minusválidas no videntes

La lógica de control asociada al sistema íntegramente es simple y no presenta grandes complicaciones, pudiéndose realizar con cualquier microprocesador o microcontrolador que se tenga a disposición.

Se han indicado brevemente algunos sensores y los métodos más usados para la asistencia en la navegación de robots móviles, además se vio que muchos de estos sensores presentan algunos problemas y requieren de algoritmos más complejos para una óptima navegación.

Se puede tener un mayor campo de actuación (conocimiento del entorno) con un mayor número de emisores, esto es verdad hasta cierto punto pues en la realidad no es tan práctico ya que se produce errores en la lectura de los sensores, debido a la superposición de ondas que se produce.

Los medios refractarios pueden desviar la señal emitida hacia uno de los receptores contiguos y no hacia el emisor requerido.

La detección de objetos con ultrasonido en el presente trabajo, no se lo realizó midiendo el tiempo de vuelo del eco de emisión, sino más bien midiendo la intensidad con la que llega el eco al receptor, pues esta resulta una técnica más sencilla y suficiente para este proyecto.

Los motores son de medio uso, lo cual se supone que su rendimiento útil no es del 100%. Por tal motivo se tuvo problema con los motores por el hecho de que estos tenían diferente inductancia y resistencia interna, esto hace que la velocidad del uno frente al otro sea diferente, aplicando un mismo voltaje de alimentación.

Tabla 5.1 Comparación de inductancia y resistencias interna

Comparación de Rs y Ls		
	Rs $\Omega$	Ls mH
Motor 1	1.5	0.73
Motor 2	0.86	0.39

Un motor al momento de energizarlo tiene un sonido de rozamiento, el cual se debe a:

- Carbones desgastados o mal ajustados
- Eje del tornillo sin fin, descentrado
- Caja de reducción estropeada y golpeada

Para eliminar estos problemas se probó con los siguientes métodos de compensación:

- ✓ Mantenimiento de motores
- ✓ Ajuste y calibración de carbones
- ✓ Colocar resistencia externa de potencia del valor igual a la diferencia que existe entre las resistencias internas de los motores (se probó pero esto reduce potencia al motor en forma significativa).

Tener dos PWM's con la misma frecuencia pero con diferente ancho de pulso, es decir se compensa el valor del voltaje medio de acuerdo con la diferencia de velocidad que tiene en los motores

El cambio de giro en los motores de la silla de ruedas se realiza con relés, para evitar la caída de voltaje  $V_{CEsat}$  de 1V a 2.5 V dependiendo del dispositivo, que se resta del voltaje al motor.

Se debe tener en cuenta que este módulo es un prototipo sujeto a modificaciones y mejoras, el cual se ha construido con elementos que se pueden adquirir en su gran mayoría en el mercado local, con un diseño lo más cercano posible a un diseño comercial.

Algo muy importante que se debe tener en cuenta es que en nuestro medio se pueden desarrollar muy buenos prototipos de ayudas electrónicas de traslado y/o robots móviles, siendo el Internet una excelente herramienta de consulta y ayuda, el diseño de nuevos prototipos dependerá de la iniciativa y creatividad del estudiante

En cuanto a la relación Costo-Beneficio el prototipo realizado en la universidad presenta ventajas frente a módulos comerciales, en una relación promedio de 3:1, considerando que los acabados, estéticamente no son tan finos como los comerciales.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Existen muchos tipos de discapacidades físicas, que una persona pueden tener, motivo por el cual se recomienda diseñar otros tipos de sistemas y dispositivos que puedan ser implementados en sistemas de ayuda de movilización semejantes, para asistir la necesidad específica de esta persona.

Se debe tener en cuenta las normas para la construcción de artefactos o cosas para personas discapacitadas.

Es recomendable tener la facilidad de reconfigurar las señales que controlan a los motores, en caso que existan problemas de orden mecánico, con el propósito de que la silla de ruedas se movilice en línea recta. Específicamente se puede variar el firmware en el microcontrolador para modificar el ancho de pulso en el modo PWM, y compensar de esta manera el problema de orden mecánico.

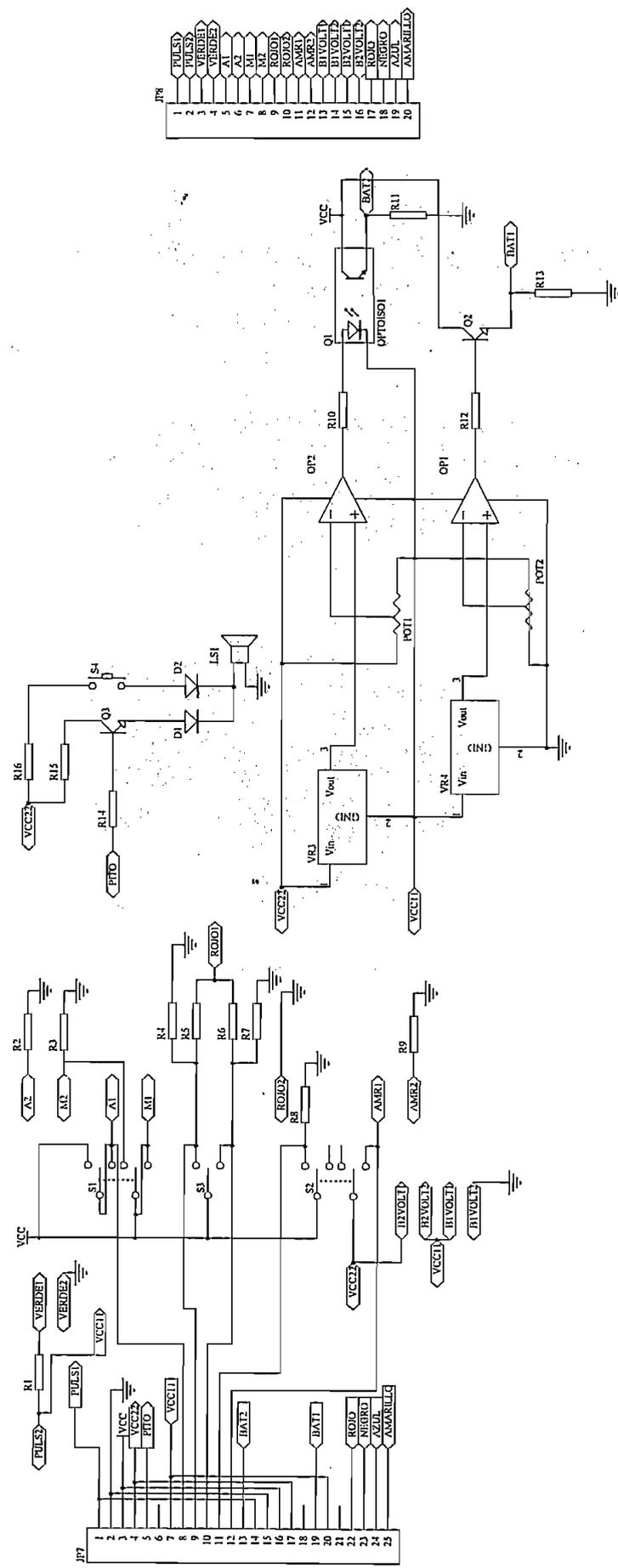
Una recomendación importante es el probar los elementos con los que se va a trabajar, en lo posible trabajar con elementos originales y con una precisión acorde a los requerimientos de trabajo ya que a veces se presentan errores que no dependen del diseño sino más bien de la calidad de los elementos con los que se trabaja.

D

C

B

A



JP8

1	PULS
2	VERDE
3	VERDE
4	VERDE
5	A1
6	A1
7	A1
8	A1
9	ROJO
10	ROJO
11	ROJO
12	AMR1
13	AMR1
14	AMR1
15	BIVOL1
16	BIVOL1
17	BIVOL1
18	BIVOL1
19	ROJO
20	AZUL
	AZUL
	AMARILLO

Title		ESQUEMA DE TABLITA DE MANDO	
Size	Number	Revision	
B			
Date		ESCUELA POLITECNICA NACIONAL	
File		14/02/2005	
		F:\trabajo\esquemas\esquemas\esquema\esquema.dwg	
		Drawn By: Baquero J / Vasquez D	

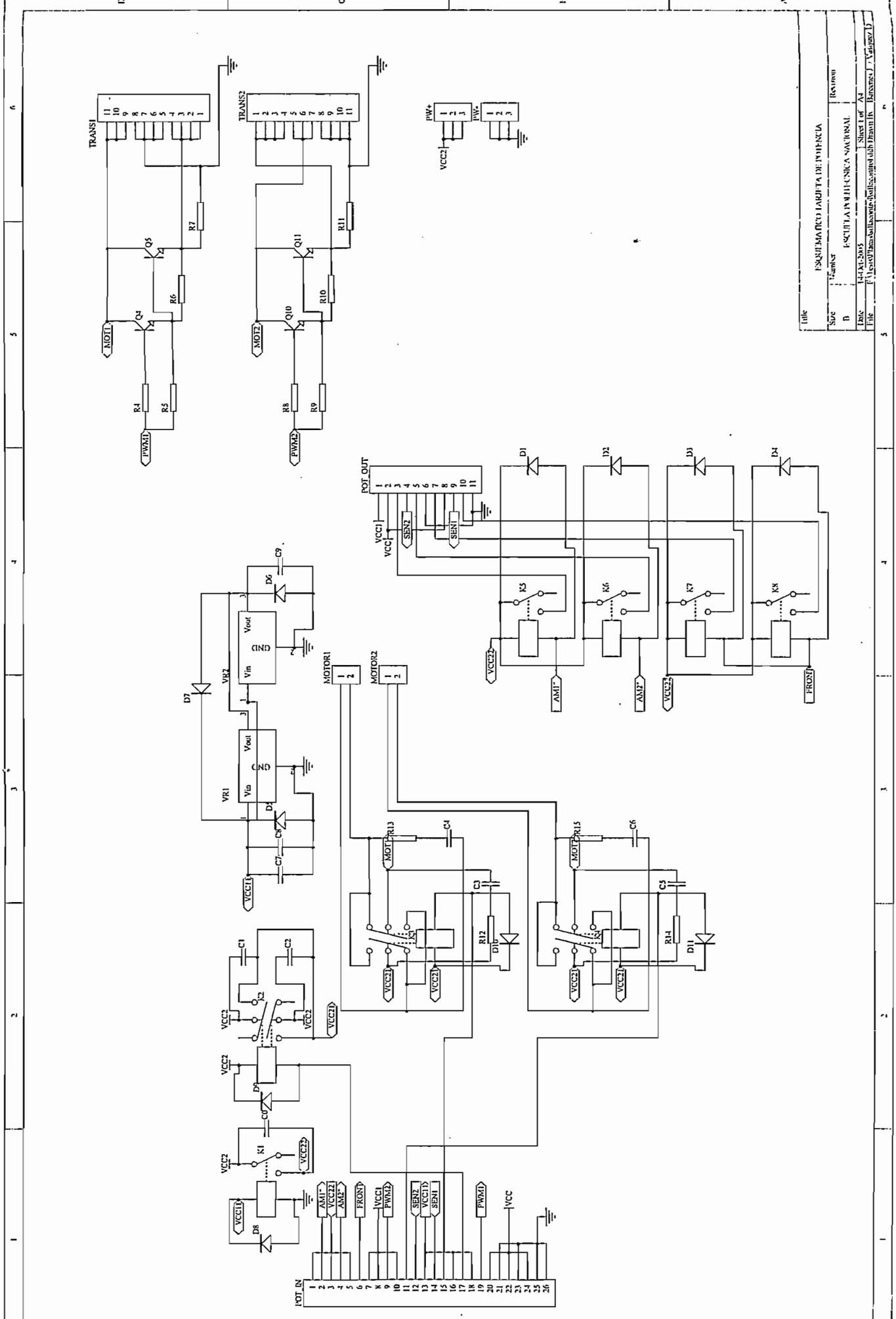
TARJETA ELECTRÓNICA DE MANDO		
2 Amplificadores operacionales	OP1,OP2	LM741
2 Potenciómetros de precisión	POT1,POT2	20K $\Omega$
1 Optotransistor	Q1	PC817
2 Transistores	Q2,Q3	2N3904
2 Reguladores	VR3,VR4	MC7805
16 Resistencias varias de 1/4 de vatio	R1,R2,R3,R5,R6,R9,R10	330 $\Omega$
	R4,R7,R8,R11,R13,	10K $\Omega$
	R12,R14,R15	1K $\Omega$
	R16	560 $\Omega$
2 Diodos rectificadores	D1,D2	1N4007
2 Selectores 3 posiciones doble	S1,S2	
1 Selector 3 posiciones simple	S3	
1 Pulsante grande	S4	
1 Audio indicador	LS1	
1 Espadin hembra 20 pines	JP8	
1 Conector macho	JP7	DB25



TARJETA ELECTRÓNICA DE CONTROL		
1 Microcontrolador, Zócalo DIP40	U1	PIC16F877A
1 Microcontrolador, Zócalo DIP8	U2	PIC12F675
1 Cristal (Oscilador)	XT	4MHz
5 Capacitores varios cerámicos	C1,C2	15pF
	C3,C4,C5	0.1µF
3 Diodos rectificadores	D1,D2,D3	1N4007
2 Pulsador de reset	SW,SW1	
26 Resistencias varias de 1/4 de watio	R1	100Ω
	R2,R3,R4,R15,...R26	10KΩ
	R5,...R11,R14	1KΩ
	R12,R13	330Ω
2 Optotransistores	U3,U4	PC817
19 Transistores	Q1,...Q6,Q8,...Q20	2N3904
Espadines	CONTROL_OUT	26 pines
	TX_ULTR	24 pines
	RX_ULTR	18 pines
	FREE_PIC	8 pines
	VCC21	2 pines
1 Conector macho para placa	CONTROL_IN	DB25



TARJETA ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO		
1x12 Amplificador operacional, Zócalo DIP14	U1	TL084
1x12 Amplificador operacional, Zócalo DIP8	U2	LM358
2x12 Potenciómetros	P1	20K $\Omega$
	R3	500K $\Omega$
10x12 Resistencias varias de 1/4 de vatio	R1,R2,R4...R6,R9	10K $\Omega$
	R7	100K $\Omega$
	R8	1K $\Omega$
	R10	120K $\Omega$
	R11	330 $\Omega$
1x12 Diodos de germanio	D1	
1x12 Leds pequeños	LD1	
3x12 Capasitores cerámicos	C1,C3	1000pF
	C2	0.1 $\mu$ F
2x12 Capasitores electrolíticos	C4	4.7 $\mu$ F
	C5	2.2 $\mu$ F
Espadines	J1	6 pines
	J2	3 pines

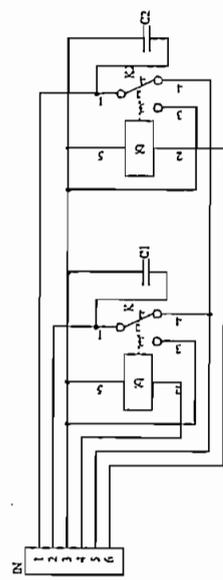


Titolo	ESQUEMA DO LARGA DE VITRICA	
Size	2,4mm	8x10mm
D	ESQUEMA DO LARGA DE VITRICA	
Emis	14-01-2005	
File	V:\proj\Bases\Bases\Killing\proj\largo vitrica (k...)	
	Sheet 1 of 7	Sheet 1 of 7
	Revision 1	Revision 1

TARJETA ELECTRÓNICA DE POTENCIA		
4 Transistores	Q5,Q11	TIP 41B
	Q4,Q10	2N3904
4 Resistencias varias de 1/4 de vatio	R4,R8	1K $\Omega$
	R5,R9	10K $\Omega$
8 Resistencias varias de 1/2 vatio	R6,R10	56 $\Omega$
	R7,R11	15 $\Omega$
	R12,R13,R14,R15	2.7 $\Omega$
1 Relé 10A/12V	K1	
3 Relés 16A/24V	K2,K3,K4	
4 Relés 8A/24V	K5,...K8	
7 Capacitores de alto voltaje	C0,...C6	1nF,1000V
3 Capacitores electrolíticos	C7,C8,C9	100 $\mu$ F
2 Reguladores	VR1,VR2	MC7805
11 Diodos rectificadores 1N4007	D1,...D11	1N4007
3 Borneras regleta 11 puntos	TRANS1,TRANS2	
1 Bornera regleta flexible 11 puntos	POT_OUT	
1 Conector IDC26	POT_IN	

1 2 3 4 5 6

D C B A



Title	ESQUEMA DE TARJETA DE MANDO DE RECIBIMIENTO		
No.	Number	Revision	
II	ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		
Date	Sheet No.	A 3	
File	P. 3 (1947) de control de la central de la Dra. J. A. V. de la U. N. C.		

1 2 3 4 5 6

TARJETA ELECTRÓNICA DEL MANDO DE RECLINAMIENTO		
--	--	--

2 Relés 10A/24V	K1,K2	
2 Capacitores electrolíticos	C1,C2	220μF



TARJETA ELECTRÓNICA DEL CARGADOR DE BATERÍAS		
1 Amplificador operacional	OAMP	LM741
2 Potenciómetros 100 KΩ de precisión	PT1,PT2	20KΩ
1 Transistores	Q	2N3904
1 Regulador	VREG	MC7818
3 Resistencias varias de 1/4 de vatio	R1,R2	330Ω
	R3	560Ω
3 Diodos rectificadores 1N4007	D1,D2,D3	1N4007
1 Puente rectificador 8A	PUENTE	
1 Relé 10A/12V	K1	
2 Capasitores electrolíticos	C1,C2	100μF

**Anexo B**  
**TARJETAS ELECTRÓNICAS**

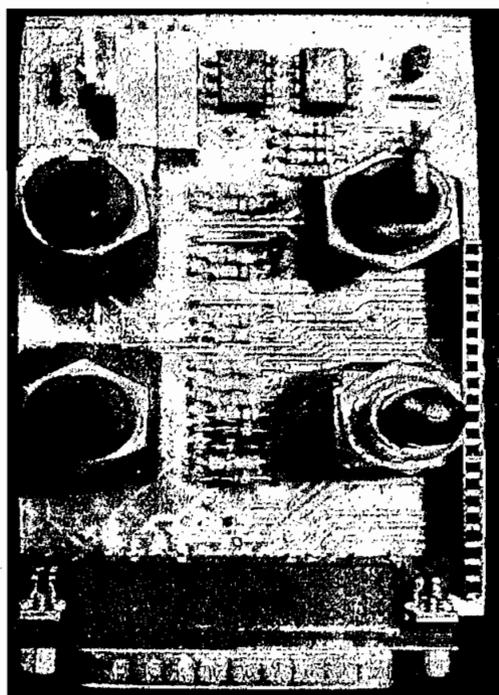
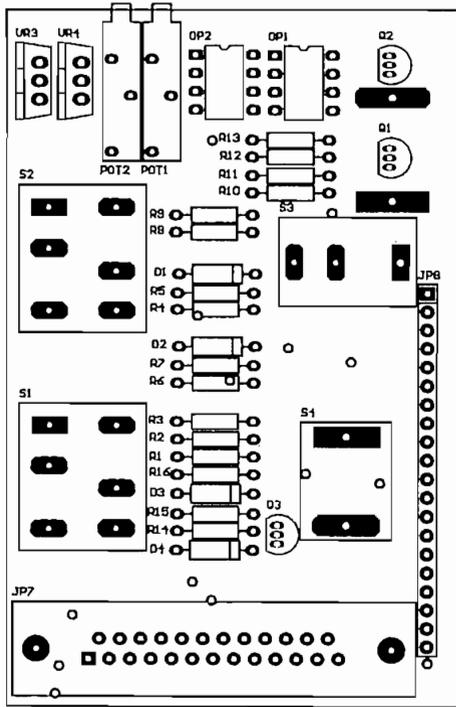
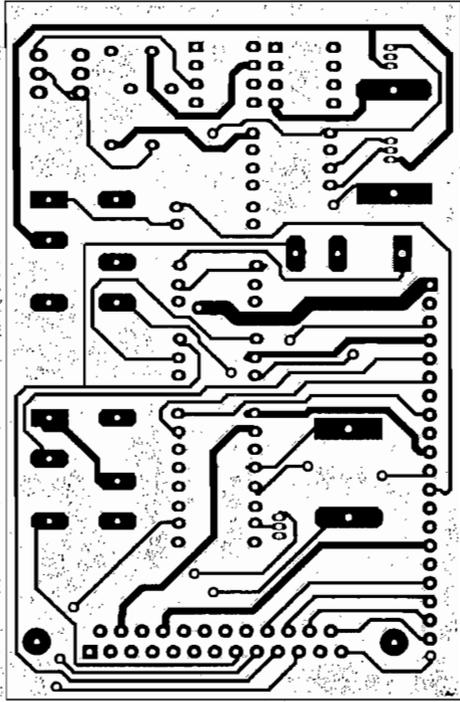


Figura B1 Tarjeta de Mando

121



.GTO



GTL

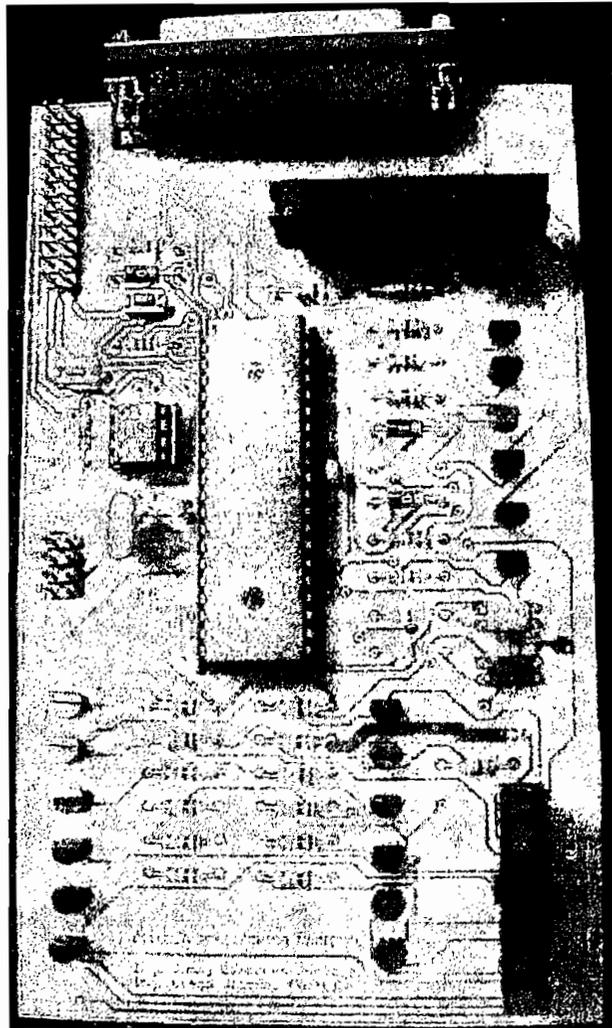
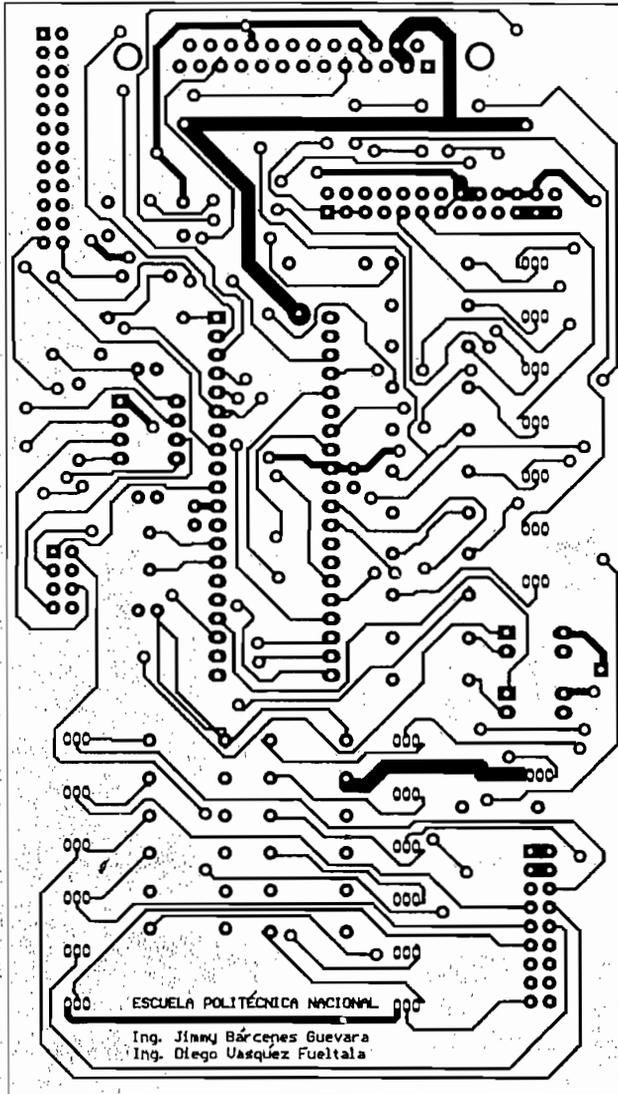
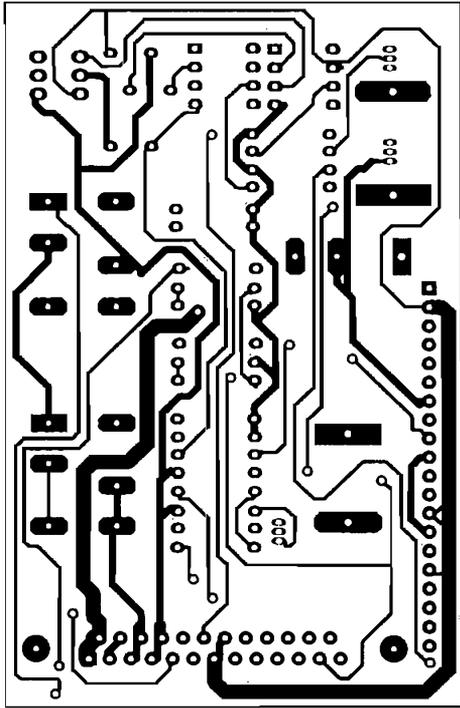
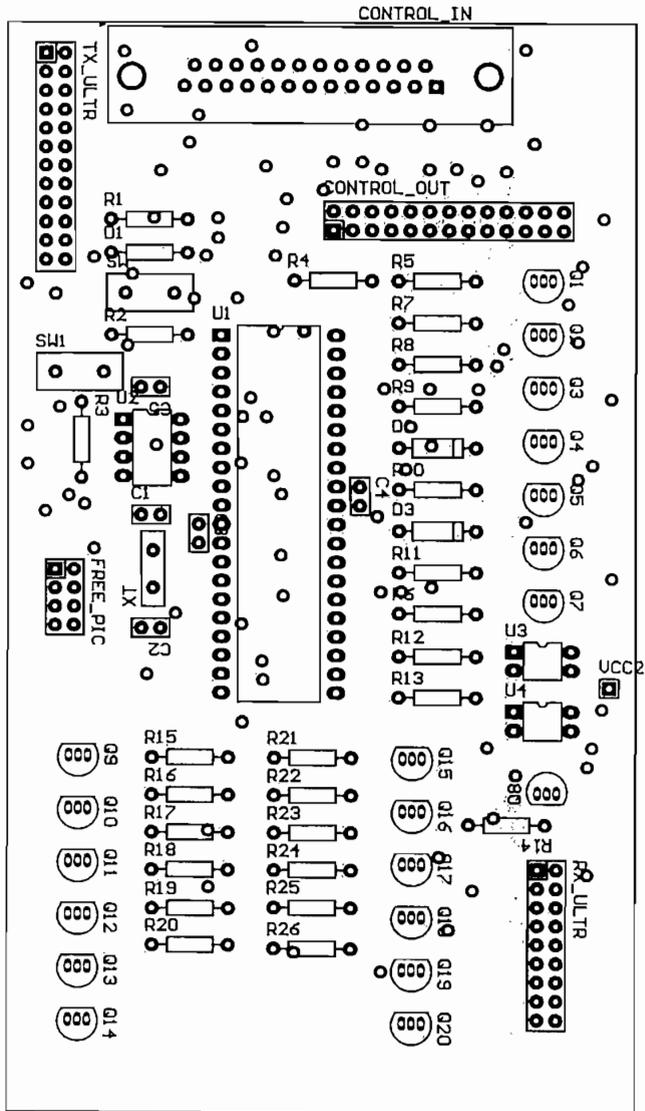


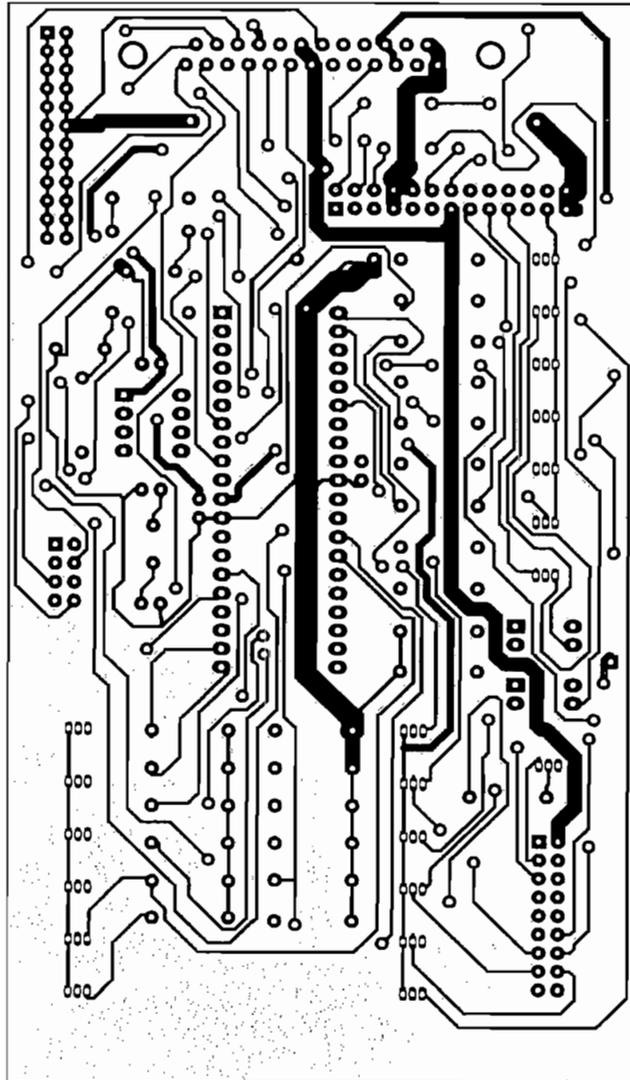
Figura B2 Tarjeta de Control





.GBL





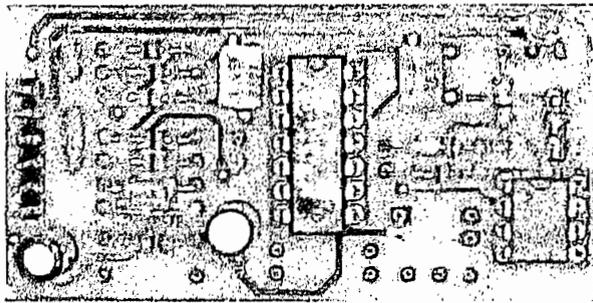
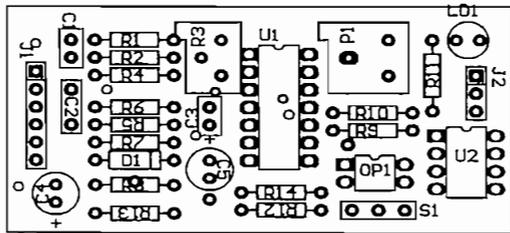
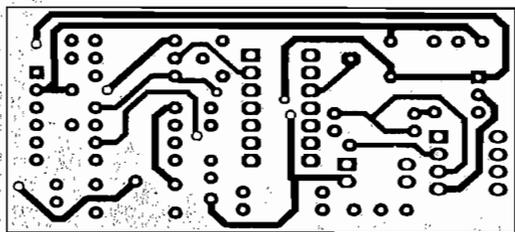


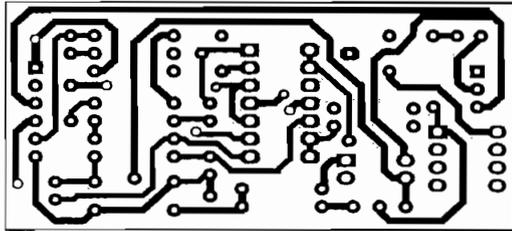
Figura B3 Tarjeta de Acondicionamiento



.GTO



.GTL



.GBL

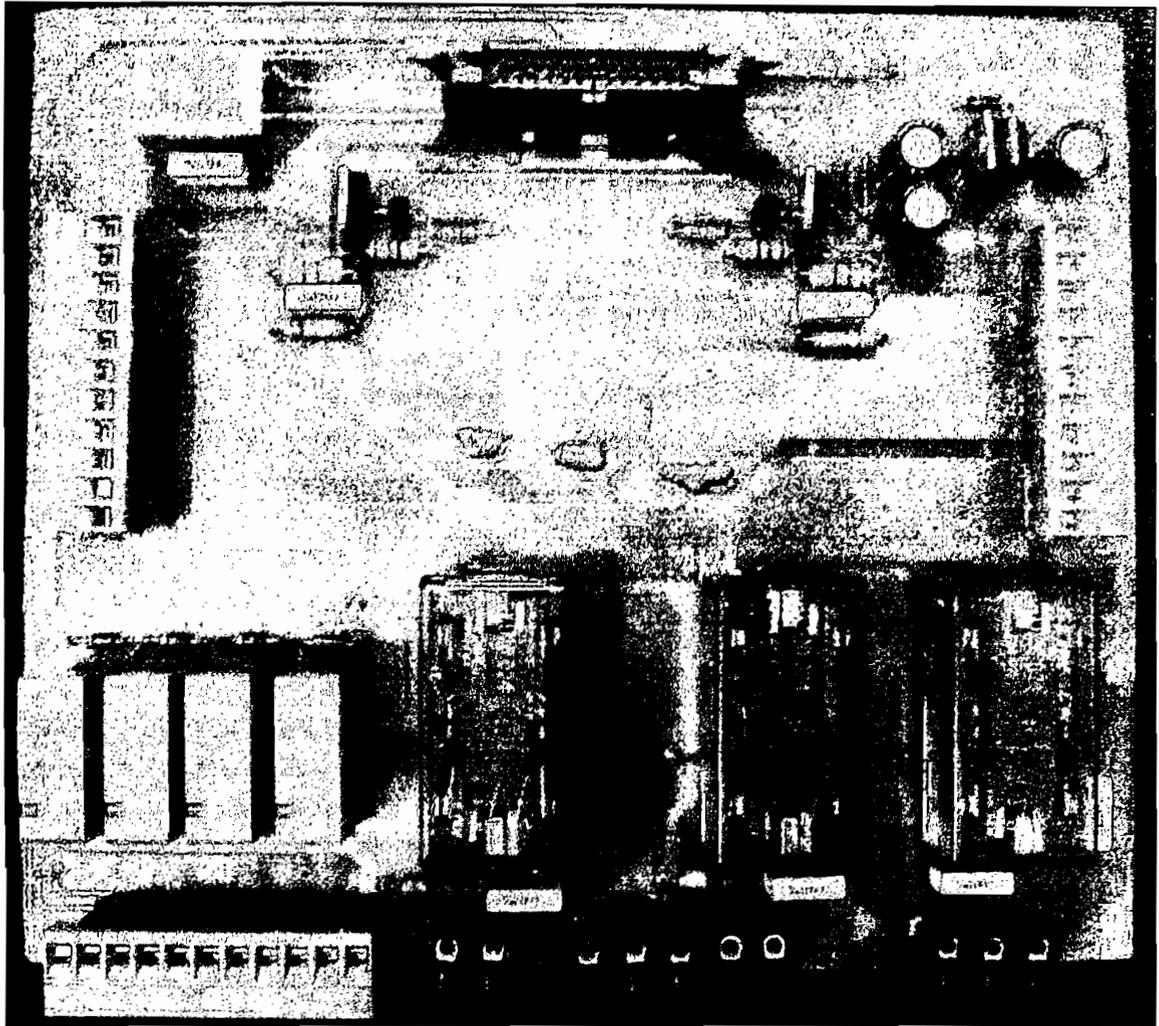
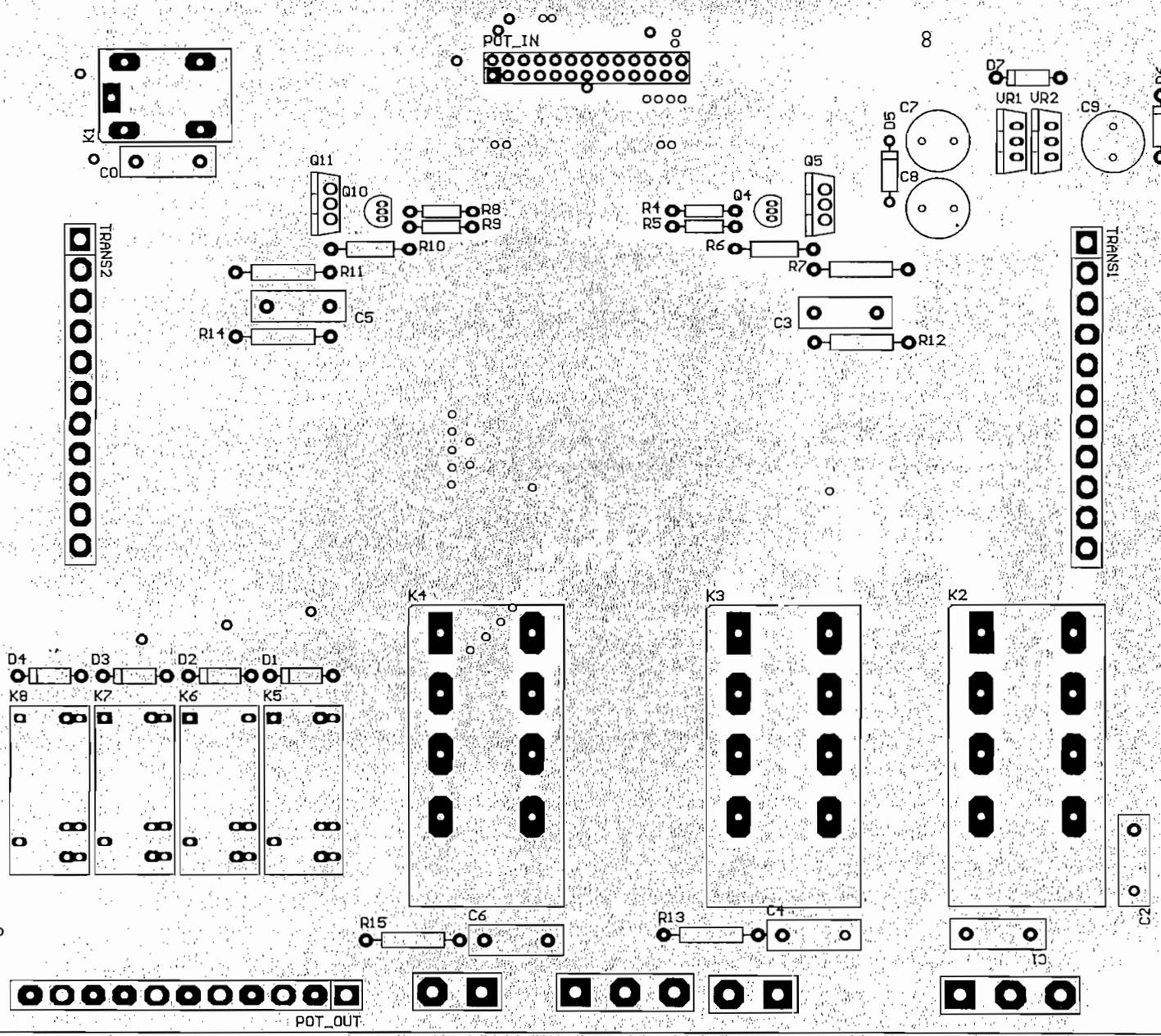


Figura B4 Tarjeta de Potencia



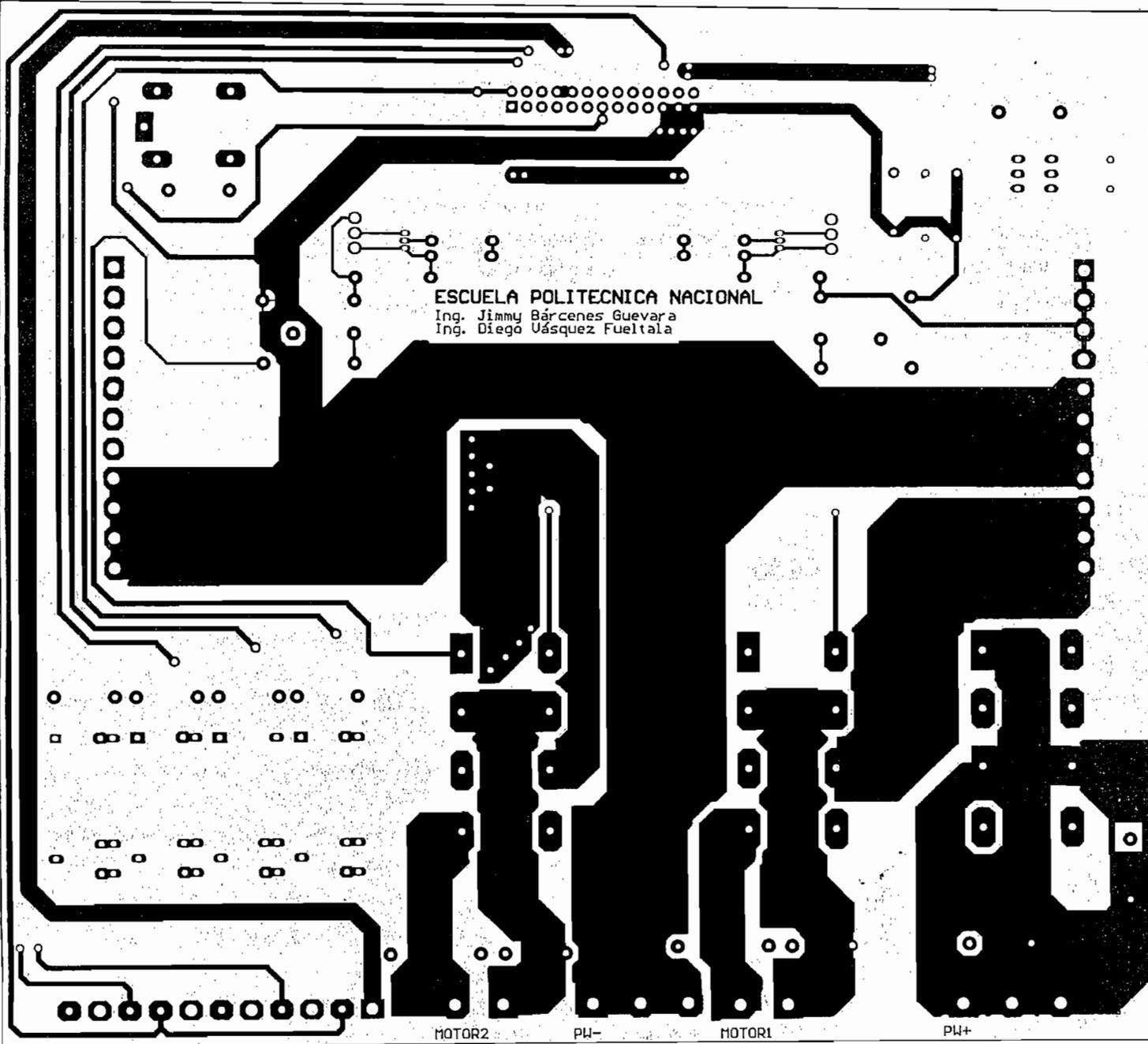
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
Ing. Jimmy Bárcenas Guevara  
Ing. Diego Vásquez Fuentala

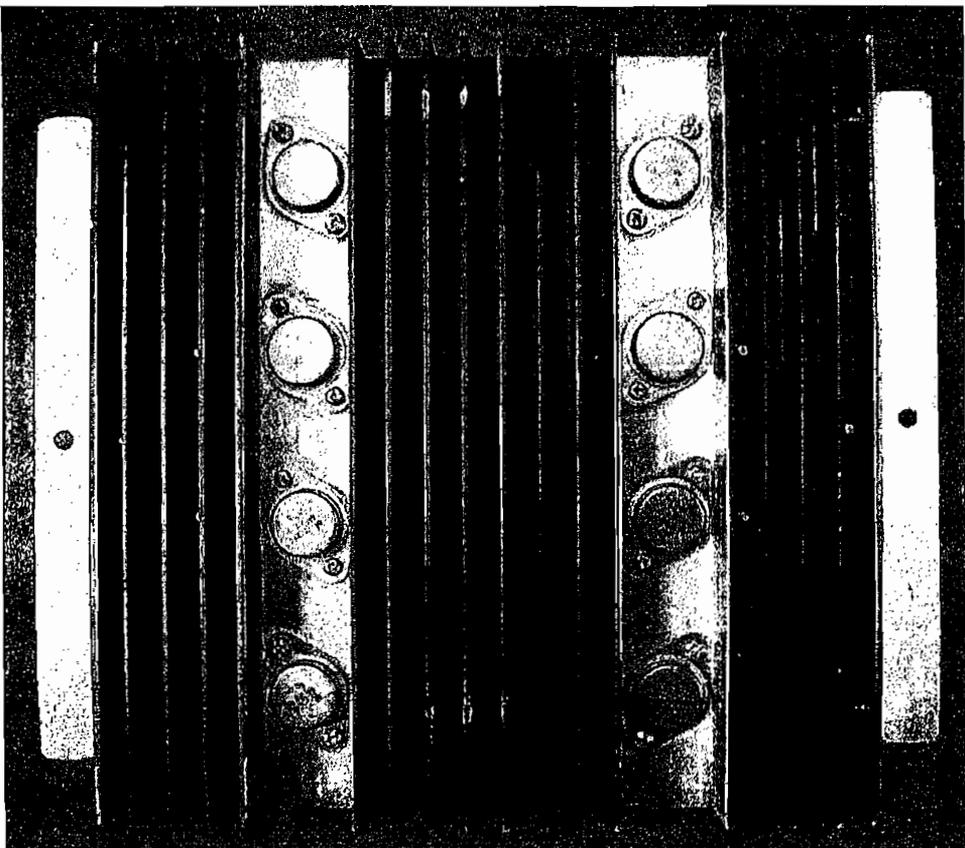
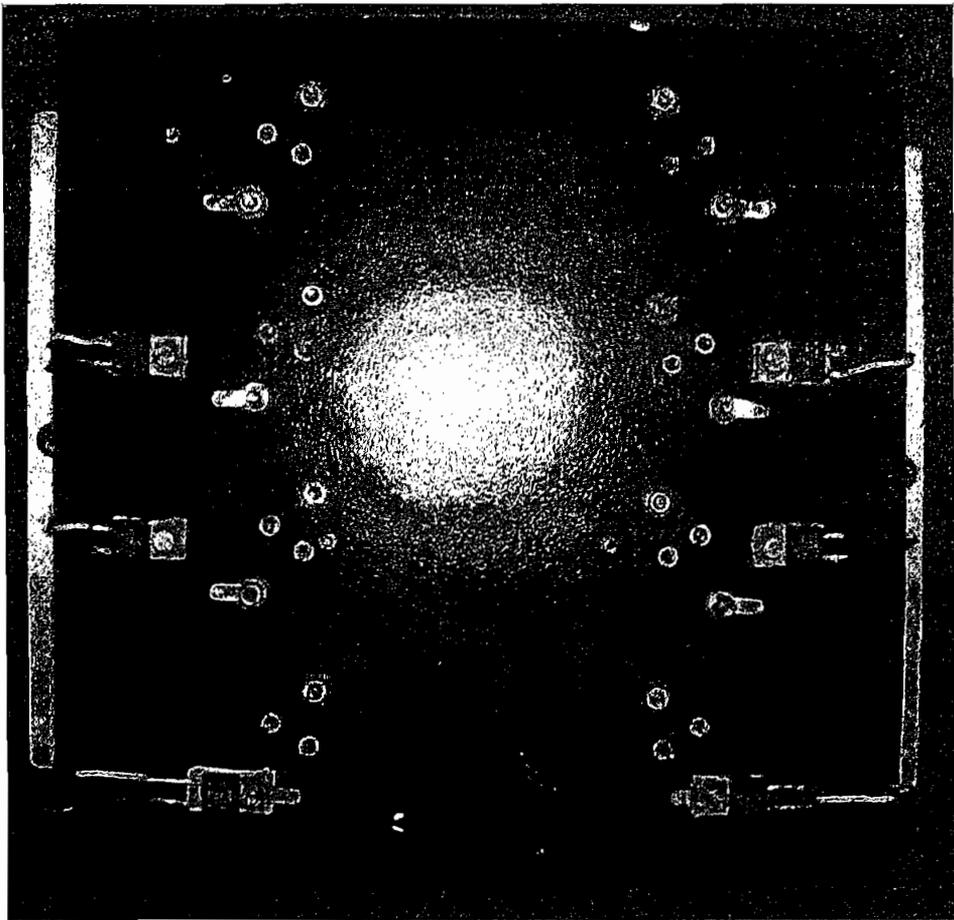
MOTOR2

PW-

MOTOR1

PW+





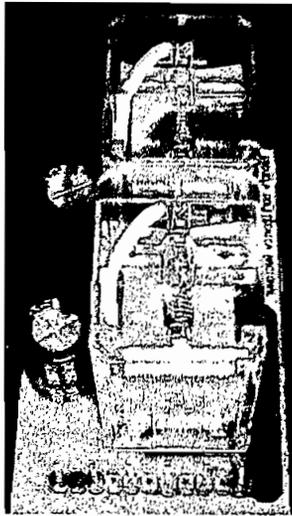
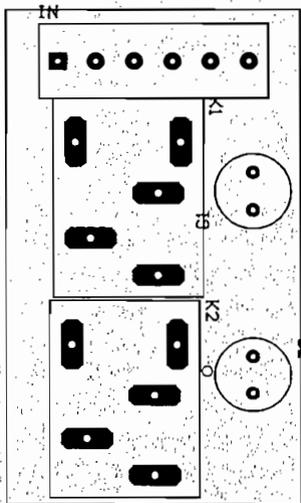
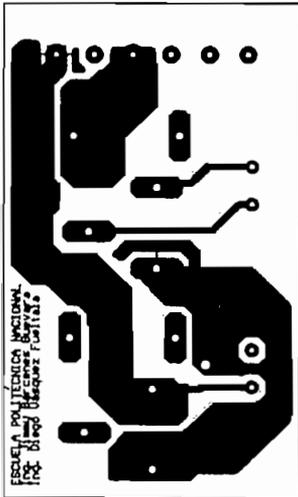


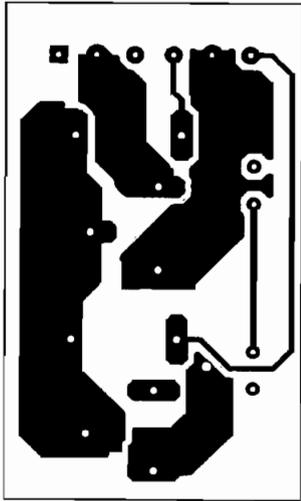
Figura B5 Tarjeta de Mando de Reclinamiento



GTO



.GTL



.GEL

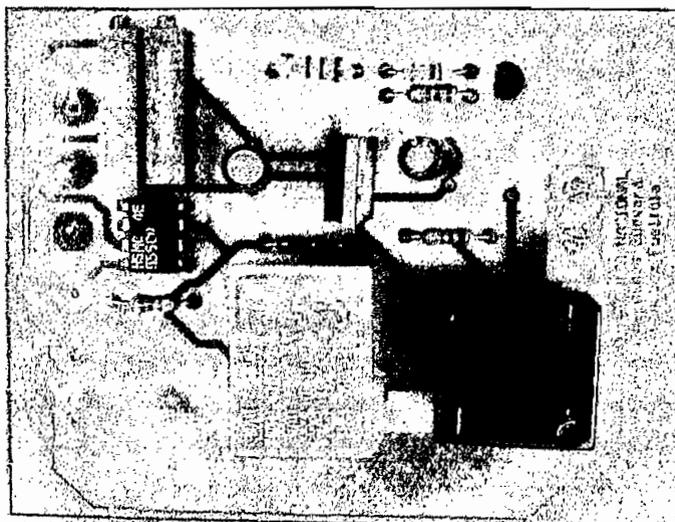
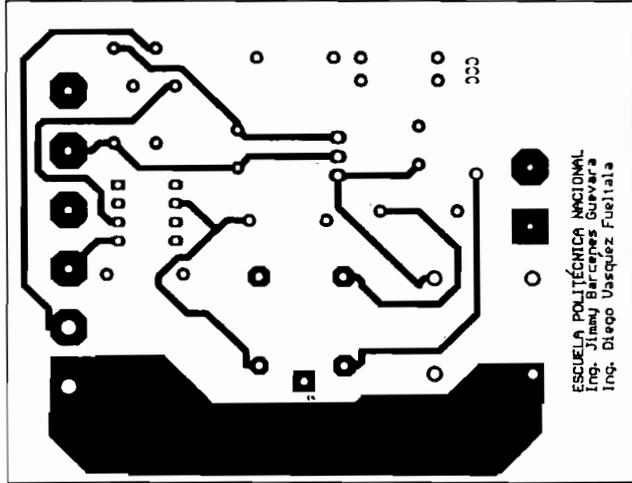
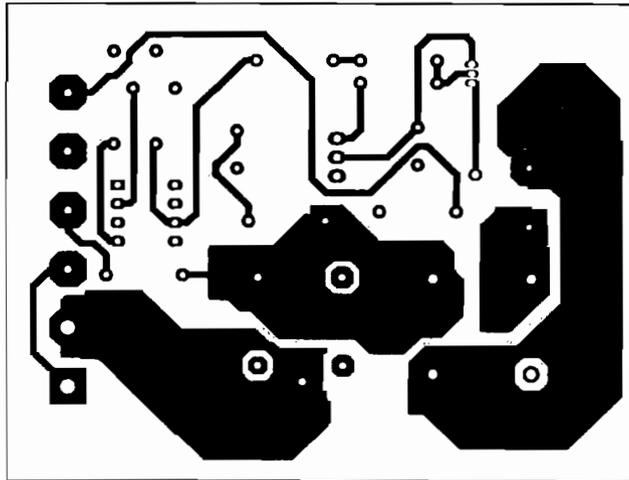


Figura B6 Tarjeta del Cargador de Baterías





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
Inq. Jimmy Barcenos Guevara  
Inq. Diego Vasquez Fuentala



## **Anexo C**

# **HOJAS DE DATOS Y ESPECIFICACIONES DE ELEMENTOS ESPECIALES**

Jameco Part number 136653

ULTRASONIC SENSOR (TRANSMITTER / RECEIVER USE)

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

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

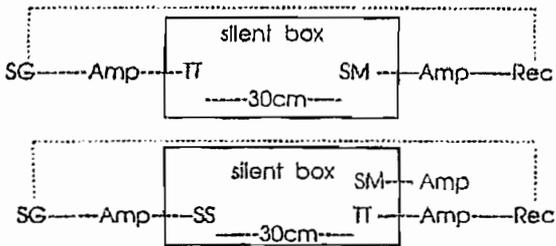
TRANSMITTER UNIT:

. 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%

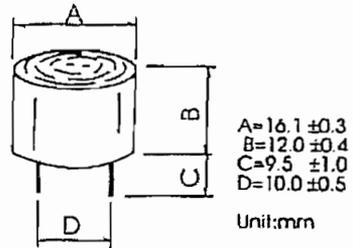
RECEIVER UNIT:

. Center Frequency (KHz)	: 40.0 ± 1.0
. Sensitivity Min. (0 dB vs 1V 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  | TT : test transducer  |
| Rec : recorder        | Rec : recorder        |
| SM : std.microphone   | SM : std.microphone   |
| Amp : amplifier       | Amp : amplifier       |
| SG : signal generator | SG : signal generator |
|                       | SS : std.speaker      |
|                       | R : resistance        |

# PIEZO PANEL MOUNTING INDICATOR

(With Driver Circuit Built-In)

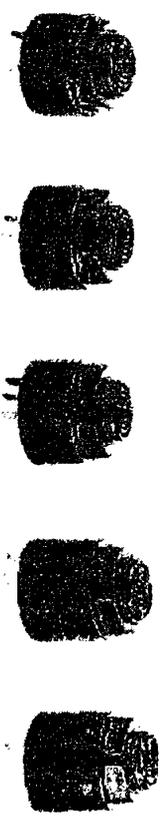
Model No. (Quick disconnected tab)	Rated Frequency +500(Hz)	Tone	Aluminum Sound Pressure Level at 30 cm		Operating Voltage Range +V <sub>DC</sub> Non-satur. All others DC only	Current Consumption (mA)	Case Style		Packing Quantity (Per Box)	
			Al Min V	Al Max V			Side View	Bottom View		
KPE-650	2800	Continuous	84	97	4	22	D	D	3	40
KPE-651	2900	Fast Pulse	70	82	6	11	D	D	4	40
KPE-653	2950	Slow Pulse	71	82	6	11	D	D	4	40
KPE-655	2900	Continuous + Fast Pulse	76/74	88/86	6	4/1	D	D	5	40
KPE-657	2800	Continuous + Slow Pulse	73/71	92/87	6	3/2	D	D	5	40
KPE-650A	2800	Continuous	88	98	5	22	D	D	3	40
KPE-651A	2800	Fast Pulse	80	97	6	12	D	D	4	40
KPE-653A	2800	Slow Pulse	80	92	6	32	D	D	4	40
KPE-655A	2800	Continuous + Fast Pulse	82/76	92/86	6	3/1	D	D	5	40
KPE-657A	2800	Continuous + Slow Pulse	84/77	97/92	6	5/3	D	D	5	40
KPE-650AN	2800	Continuous	70/70	87/87	4	2/1	D	D	3	40
KPE-651AN	2800	Fast Pulse	70/67	85/83	5	5/4	D	D	4	40
KPE-653AN	2800	Slow Pulse	70/67	85/83	5	2/8	D	D	4	40
KPE-650AN	2800	Continuous	79/78	90/89	3	4/3	D	D	3	40
KPE-651AN	2800	Fast Pulse	70/68	86/84	3	5/5	D	D	4	40
KPE-653AN	2800	Slow Pulse	70/68	86/84	3	5/5	D	D	4	40
KPE-648	2800	Continuous	66	86	10	4/8	3	D	3	40
KPE-620AN	2800	Continuous	76/75	87/85	6	2/50	E	E	3	40
KPE-621AN	2800	Fast Pulse	68/68	77/77	6	4/4	E	E	4	40
KPE-623AN	2800	Slow Pulse	71/72	85/85	6	3/4	E	E	4	40
KPE-660	1500 - 4000	Siren	92	99	6	60	E	E	3	40
KPE-690	2000/2800	Hi-Low	74	99	6	15	E	E	3	40

KPE-650 series: #1 1/25 inch, 28 5/7 mm diameter opening in panels to 0 1/25 inch (3 1/7 mm) thick. Pulse Rate at 12 VDC: 3.0 + 20% Hz (Fast pulse) 1.2 - 20% Hz (Slow pulse)

# PIEZO PANEL MOUNTING INDICATOR

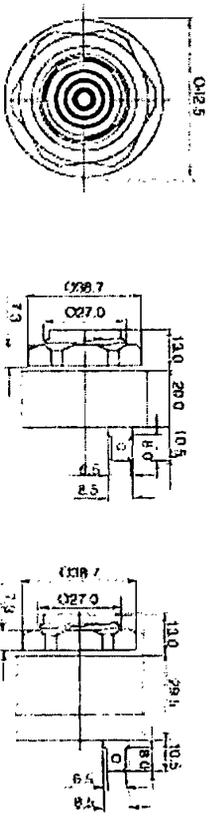
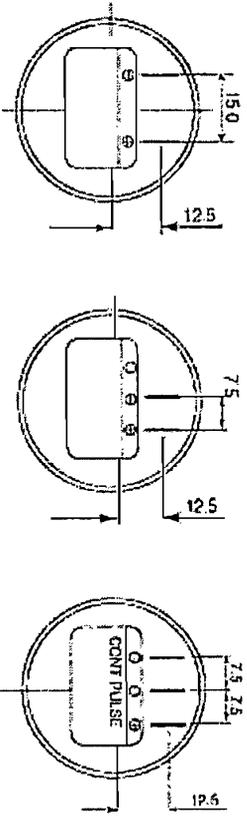
(With Driver Circuit Built-In)

## Shape



- KPE-650/650A
- KPE-651/651A
- KPE-648
- KPE-651/653
- KPE-651A/653A
- KPE-651AN/653AN
- KPE-611AN/613AN
- KPE-655/657
- KPE-655A/657A
- KPE-620AN
- KPE-680/680
- KPE-621AN
- KPE-623AN

## Dimension



Tolerance: ±0.5mm Unit: mm

## COMPLEMENTARY SILICON POWER TRANSISTORS

The MJ15003 and MJ15004 are power base power transistors designed for high power audio, disk head positioners, linear amplifiers, switching regulators, and other linear applications.

### FEATURES:

- High Power Dissipation  
 $P_D = 250 \text{ W (} T_C = 25^\circ\text{C)}$
- High DC Current Gain and Low Saturation Voltage  
 $h_{FE} = 25(\text{Min}) @ I_C = 5.0 \text{ A, } V_{CE} = 2.0 \text{ V}$
- For Low Distortion Complementary Designs

NPN PNP  
 MJ15003 MJ15004

20 AMPERE  
 COMPLEMENTARY SILICON  
 POWER TRANSISTORS  
 140 VOLTS  
 250 WATTS

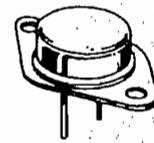
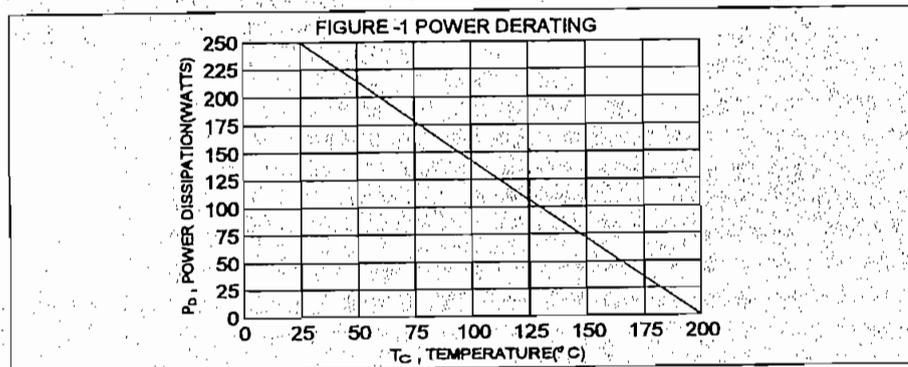
### MAXIMUM RATINGS

Characteristic	Symbol	Rating	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CE(sus)}$	140	V
Collector-Base Voltage	$V_{CBO}$	140	V
Emitter-Base Voltage	$V_{EBO}$	5.0	V
Collector Current-Continuous Peak (1)	$I_C$ $I_{CM}$	20 30	A
Base Current-Continuous Peak (1)	$I_B$ $I_{BM}$	5.0 10	A
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	250 1.43	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{STG}$	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

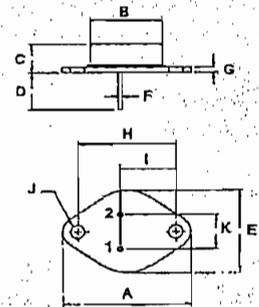
(1) Pulse Test: Pulse width = 5 ms, Duty Cycle < 10%

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta jc}$	0.70	$^\circ\text{C/W}$



TO-3



PIN 1, BASE  
 2, EMITTER  
 COLLECTOR (CASE)

DIM	MILLIMETERS	
	MIN	MAX
A	38.75	39.96
B	19.28	22.23
C	7.96	9.28
D	11.18	12.19
E	25.20	26.67
F	0.82	1.09
G	1.38	1.62
H	29.90	30.40
I	16.64	17.30
J	3.88	4.36
K	10.67	11.18

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS (  $T_c = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted )**

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	------

**OFF CHARACTERISTICS**

Collector - Emitter Sustaining Voltage (2) ( $I_c = 200 \text{ mA}$ , $I_B = 0$ )	$V_{CE(sus)}$	140		V
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 140 \text{ V}$ , $I_B = 0$ )	$I_{CO}$		250	$\mu\text{A}$
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 140 \text{ V}$ , $V_{BE(on)} = 1.5 \text{ V}$ ) ( $V_{CE} = 140 \text{ V}$ , $V_{BE(on)} = 1.5 \text{ V}$ , $T_c = 150^\circ\text{C}$ )	$I_{CEX}$		100 2.0	$\mu\text{A}$ mA
Emitter Cutoff Current ( $V_{EB} = 5.0 \text{ V}$ , $I_C = 0$ )	$I_{EBO}$		100	$\mu\text{A}$

**ON CHARACTERISTICS (2)**

DC Current Gain ( $I_c = 5.0 \text{ A}$ , $V_{CE} = 2.0 \text{ V}$ )	hFE	25	150	
Collector - Emitter Saturation Voltage ( $I_c = 5.0 \text{ A}$ , $I_B = 500 \text{ mA}$ )	$V_{CE(sat)}$		1.0	V
Base - Emitter On Voltage ( $I_c = 5.0 \text{ A}$ , $V_{CE} = 2.0 \text{ V}$ )	$V_{BE(on)}$		2.0	V

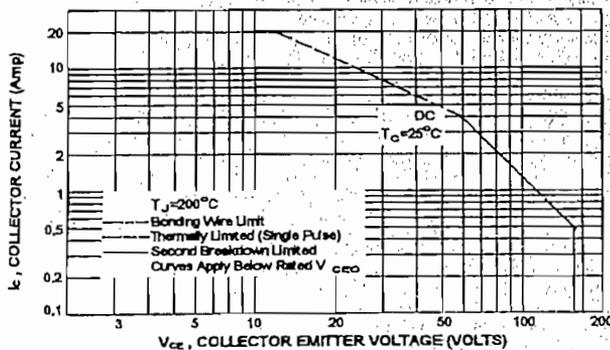
**DYNAMIC CHARACTERISTICS**

Current Gain - Bandwidth Product (3) ( $I_c = 500 \text{ mA}$ , $V_{CE} = 10 \text{ V}$ , $f = 0.5 \text{ MHz}$ )	$f_T$	2.0		MHz
Output capacitance ( $V_{CB} = 4.0 \text{ V}$ , $I_E = 0$ , $f = 1 \text{ MHz}$ )	$C_{ob}$		1000	pF

(2) Pulse Test: Pulse width =  $300 \mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2.0\%$

(3)  $f_T = |h_{fe}| \cdot f_{test}$

FIG-2 FORWARD BIAS SAFE OPERATING AREA



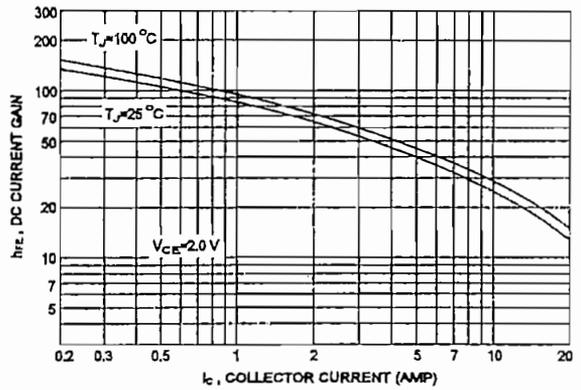
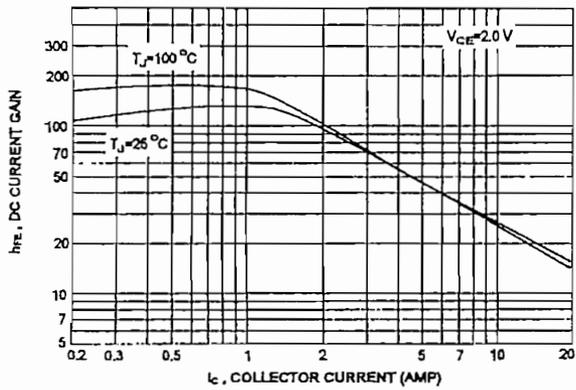
There are two limitation on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown safe operating area curves indicate  $I_c$ - $V_{CE}$  limits of the transistor that must be observed for reliable operation i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than curves indicate.

The data of FIG-2 is base on  $T_{j(P10)} = 200^\circ\text{C}$ ;  $T_c$  is variable depending on conditions. At high case temperatures, thermal limitation will reduce the power that can be handled to values less than the limitations imposed by second breakdown.

MJ15003

DC CURRENT GAIN

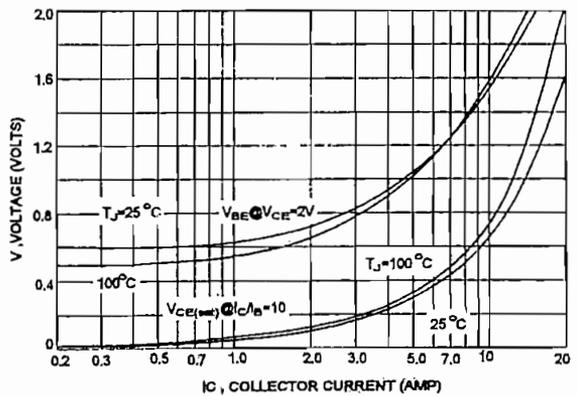
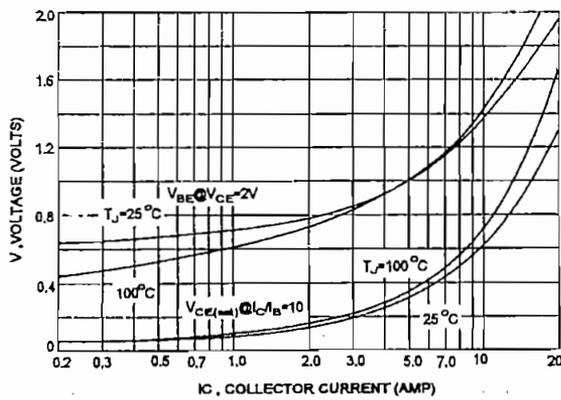
MJ15004



MJ15003

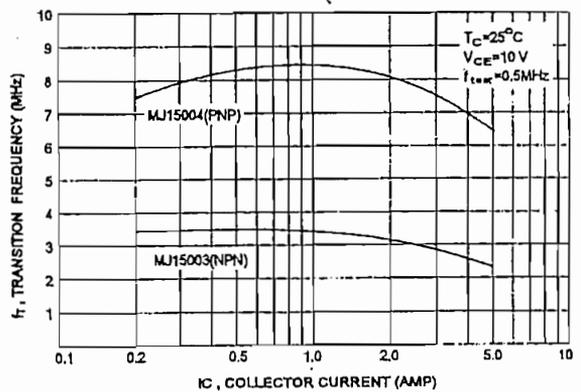
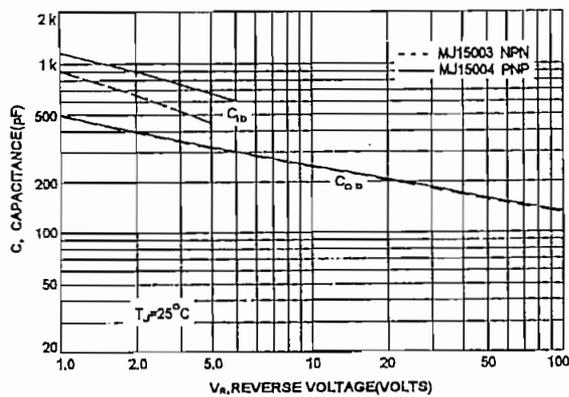
"ON" VOLTAGE

MJ15004



CAPACITANCES

CURRENT GAIN-BANDWIDTH PRODUCT



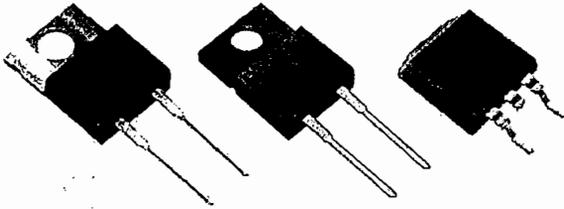


# BYW29, BYWF29, BYWB29 Series

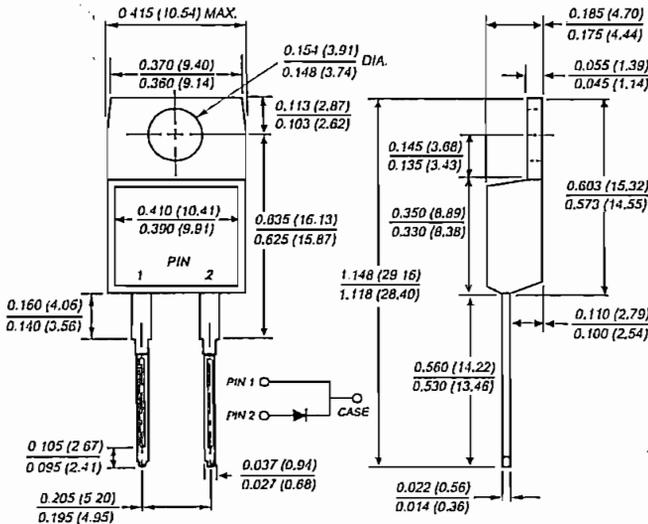
Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

## Ultrafast Rectifiers

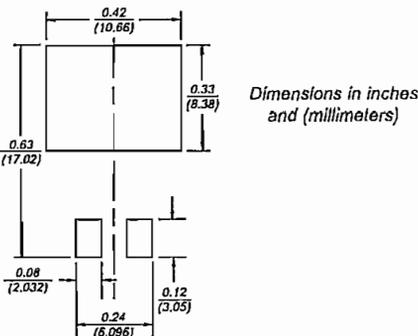
Reverse Voltage 50 to 200V  
Forward Current 8.0A  
Reverse Recovery Time 25ns



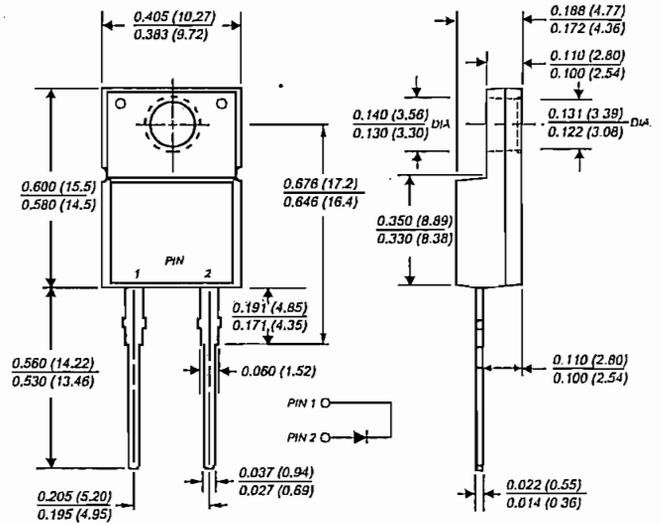
### TO-220AC (BYW29 Series)



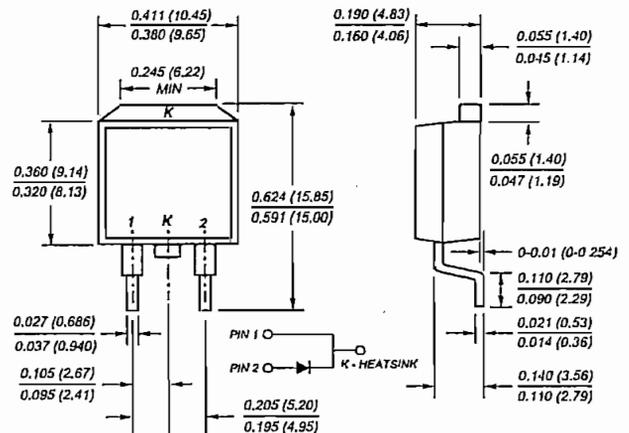
### Mounting Pad Layout TO-263AB



### ITO-220AC (BYWF29 Series)



### TO-263AB (BYWB29 Series)



## Features

- Plastic package has Underwriters Laboratory Flammability Classification 94V-0
- Glass passivated chip junction
- Low power loss
- Low leakage current
- High surge current capability
- Superfast recovery time for high efficiency

## Mechanical Data

**Case:** JEDEC TO-220AC, ITO-220AC & TO-263AB molded plastic body

**Terminals:** Plated leads, solderable per MIL-STD-750, Method 2026

High temperature soldering in accordance with CECC 802 / Reflow guaranteed

**Polarity:** As marked

**Mounting Position:** Any

**Mounting Torque:** 10 in-lbs maximum

**Weight:** approx. 0.05 oz., 1.35 g

# BYW29, BYWF29, BYWB29 Series



Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

## Maximum Ratings (T<sub>C</sub> = 25°C unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	BYW29-50	BYW29-100	BYW29-150	BYW29-200	Unit
Maximum repetitive peak reverse voltage	V <sub>RRM</sub>	50	100	150	200	V
Maximum RMS voltage	V <sub>RMS</sub>	35	70	105	140	V
Maximum DC blocking voltage	V <sub>DC</sub>	50	100	150	200	V
Maximum average forward rectified current at T <sub>C</sub> = 105°C	I <sub>F(AV)</sub>	8.0				A
Peak forward surge current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method) per leg	I <sub>FSM</sub>	100				A
Operating and storage temperature range	T <sub>J</sub> , T <sub>STG</sub>	-65 to +150				°C
RMS Isolation voltage (BYWF type only) from terminals to heatsink with t = 1.0 second, RH ≤ 30%	V <sub>ISOL</sub>	4500 <sup>(1)</sup> 3500 <sup>(2)</sup> 1500 <sup>(3)</sup>				V

## Electrical Characteristics (T<sub>C</sub> = 25°C unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	BYW29-50	BYW29-100	BYW29-150	BYW29-200	Unit
Maximum instantaneous forward voltage at: <sup>(4)</sup> I <sub>F</sub> = 20A, T <sub>J</sub> = 25°C I <sub>F</sub> = 8.0A, T <sub>J</sub> = 150°C	V <sub>F</sub>	1.3 0.8				V
Maximum DC reverse current at rated DC blocking voltage T <sub>C</sub> = 25°C T <sub>C</sub> = 100°C	I <sub>R</sub>	10 500				μA
Maximum reverse recovery time at I <sub>F</sub> = 1A, V <sub>R</sub> = 30V, di/dt = 100A/μs, I <sub>rr</sub> = 10% I <sub>RM</sub>	t <sub>rr</sub>	25				ns
Typical junction capacitance at 4V, 1MHz	C <sub>J</sub>	45				pF

## Thermal Characteristics (T<sub>C</sub> = 25°C unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	BYW	BYWF	BYWB	Unit
Typical thermal resistance from junction to case per leg	R <sub>θJC</sub>	2.5	5.5	2.5	°C/W

- Notes:  
 (1) Clip mounting (on case), where lead does not overlap heatsink with 0.110" offset  
 (2) Clip mounting (on case), where leads do overlap heatsink  
 (3) Screw mounting with 4-40 screw, where washer diameter is ≤ 4.9mm (0.19")  
 (4) Pulse test: 300μs pulse width, 1% duty cycle



Ratings and  
Characteristic Curves ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Fig. 1 – Maximum Forward Current Derating Curve

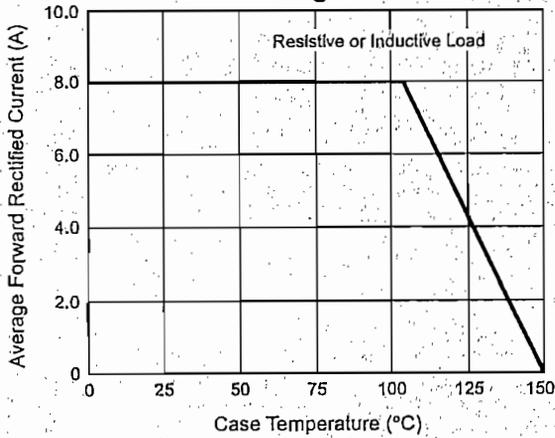


Fig. 2 – Maximum Non-Repetitive Peak Forward Surge Current

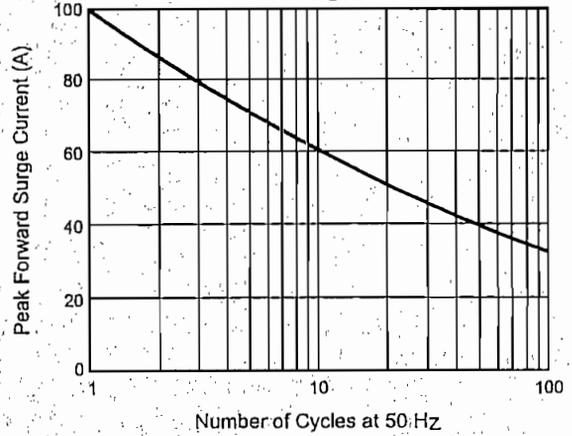


Fig. 3 – Typical Instantaneous Forward Characteristics

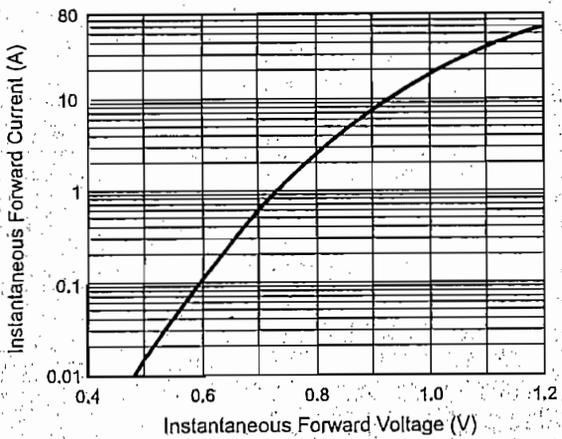


Fig. 4 – Typical Reverse Leakage Characteristics

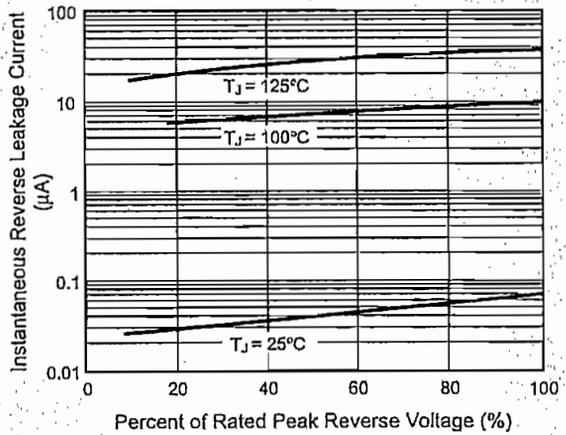


Fig. 5 – Typical Junction Capacitance

