

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE INGENIERÍA**

### **“ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MOTRIZ PARA BICICLETAS”**

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

**GUANGA HARO JOEL SALOMÓN  
VERA VALLADAREZ JAIRO ALFREDO**

**DIRECTOR: ING. NELSON SOTOMAYOR**

**Quito, MARZO 2004**

## DECLARACIÓN

Nosotros, JOEL SALOMÓN GUANGA HARO y JAIRO ALFREDO VERA VALLADAREZ, 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.



---

Joel Guanga Haro



---

Jairo A. Vera V.

## AGRADECIMIENTO

Sobre todo a Dios, por sus bendiciones en todo y en cada instante de mi vida. A mi padre por haber estado a mi lado hasta su ultimo momento guiándome y apoyándome, de todo corazón a mi madre que siempre está con migo, a mis hermanos por su apoyo incondicional, inmedible y su gran amistad.

A mis amigos y compañeros de la carrera que de alguna forma colaboraron con este proyecto, en especial a Cynthia por su constante y desinteresada compañía hasta en momentos difíciles.

Al Ing. Nelson Sotomayor por su gran apoyo e incomparable guía en el desarrollo del proyecto.

**JOEL**

## DEDICATORIA

Con mucho amor a mi padre Aurelio, que en paz descansa, el mejor padre que Dios me pudo haber dado, me acompañó hasta días antes de culminar esta meta. Con el mismo amor a mi madre Marujita que tanto me a protegido y enseñado a vivir correctamente; a mis hermanos que nombrarlos sería redundar lo que son; amistad, cariño, ayuda y sobre todo amor. Todos ellos hicieron más que posible cumplir esta meta en mi vida, culminando este proyecto.

A todos mi amigos, seres queridos, en especial a Jairo por compartir esta grandiosa experiencia y privilegio de haber sido y ser para siempre parte de esta incomparable Universidad.

**JOEL**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por brindarme salud, bienestar, sabiduría y sobre todo amor en los momentos difíciles. A mis padres por guiarme y estar a mi lado en todo momento, a mis hermanos por su apoyo constante y por ser mis mejores amigos.

A todos los ayudantes de laboratorio del Departamento de Automatización y Control que hicieron que este proyecto sea una realidad, en especial al Laboratorio de Sistemas y Control y a la Ing. Yadira Bravo, encargada de dicho laboratorio.

Al Ing. Nelson Sotomayor , por su ayuda desinteresada y acertada conducción en el desarrollo del proyecto.

**JAIRO**

## DEDICATORIA

Con mucho cariño a mis padres: Alfredo y Rosita, por ser los mejores padres que alguien puede pedir, por su amor, comprensión, apoyo y consejos que han hecho de mí una mejor persona; a mis hermanos: Jemmy, Deibby y Juan Diego por ser mis mejores amigos y darme apoyo en los momentos de flaqueza y a todos mis amigos que de alguna u otra forma contribuyeron al desarrollo del proyecto.

A la memoria del padre de Joel, compañero de tesis, que mas que un compañero es un amigo.

**JAIRO**

<b>CONTENIDO,</b>	<b>i</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>v</b>
<b>PRESENTACION</b>	<b>vi</b>
<b>CAPÍTULO 1.</b>	<b>1</b>
<b>ESTUDIO DE SISTEMA MOTRIZ PARA BICICLETAS</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción	1
1.2 Bicicleta eléctrica	2
1.2.1. ¿Porqué utilizar la bicicleta eléctrica?	2
1.2.2. ¿La bicicleta eléctrica es igual a una moto?	3
1.2.3. Normas legales	4
1.2.4. La bicicleta eléctrica y la movilidad sostenible	5
1.2.5. Las bicicletas eléctricas actuales	6
1.3 Mecanismos que disminuyen el esfuerzo del ciclista al pedalear y permiten recorrer mayor distancia.	7
1.3.1. Sistemas parecidos	7
1.3.1.1 Equipo para bicicleta que duplica la velocidad pedaleando.	7
1.3.1.2 La transmisión automática para bicicletas de ciudad	8
1.4 Sistema de sensores	9
1.4.1 Sensores para medir el esfuerzo del ciclista	10
1.4.1.1 Medidor de pulso cardiaco	10
1.4.1.1.1 Electrónica y medicina	10
1.4.1.1.2 En búsqueda del pulso.	11
1.4.1.1.3 Procesamiento de la señal	11
1.4.1.1.4 Análisis del método de medición de esfuerzo muscular en base al pulso cardiaco.	12
1.4.1.2 Sensor en base a una celda de carga	13
1.4.1.2.1 Galgas de extensión (strain gauges)	13
1.4.1.2.2 Celda de carga unipunto	14
1.4.1.2.3 Análisis del método de medición de esfuerzo muscular en base a una celda de carga.	16
1.4.2 Sensores para medir la velocidad de giro.	17

1.4.2.1	Sensor magnético para la medición de velocidad	18
1.4.2.1.1	Principio de funcionamiento	18
1.4.2.2	Encoders incrementales	19
1.4.2.3	Encoder absoluto	20
1.4.2.4	Potenciómetro	21
1.4.2.5	Transformador diferencial de variación lineal (lvdt)	21
1.4.2.6	Análisis del método de medición de velocidad en base un sensor magnético.	22
1.5	Selección de la fuente motriz	23
1.5.1	Motor-reductor o caja reductora	24
1.5.1.1	Engranajes	24
1.5.1.2	Generalidades	25
1.5.1.3	Clasificación de los engranajes	26
1.5.1.3.1	Engranajes cilíndricos	27
1.5.1.3.2	Engranajes cónicos	28
1.5.1.3.3	Tornillo sin fin y rueda helicoidal	29
1.5.1.3.4	Cremallera	30
1.5.1.4	Cajas reductoras	30
1.5.1.5	Diseño de engranajes	32
1.6	Alimentación de la fuente motriz	34
1.6.1	Recarga de Batería	35
1.6.2	Características de algunos tipos de batería	36
<b>CAPÍTULO 2.</b>		<b>43</b>
<b>DISEÑO Y DESARROLLO DEL HARDWARE</b>		<b>43</b>
2.1	Consideraciones generales	43
2.1.1.	Requerimientos mecánicos	44
2.2	Diseño mecánico	45
2.2.1	Descripción de la bicicleta	45
2.2.1.1	Cuadro	46
2.2.1.2	Bielas o brazos	48
2.2.1.3	Rueda dentada o catalina	48
2.2.2	Dimensionamiento de la celda de carga	49

2.2.3	Diseño y construcción del brazo mecánico para realizar la medición del torque	51
2.2.4	Construcción de escobillas y anillos deslizantes	52
2.2.5	Dimensionamiento de la potencia del motor	53
	2.2.5.1 Medición del dominio de la velocidad de pedaleo	57
	2.2.5.1.1 Determinación de la mínima velocidad	57
	2.2.5.1.2 Determinación de la máxima velocidad	59
	2.2.5.2 Cálculo de la potencia	60
2.2.6	Dimensionamiento del moto-reductor	62
2.3	Diseño eléctrico y electrónico	64
2.3.1	Circuitos del sistema	65
2.3.2	Selección del microcontrolador	66
2.3.3	Parámetros eléctricos del motor	70
	2.3.3.1 Procedimiento	70
	2.3.3.1.1 Parámetros eléctricos	70
	2.3.3.1.2 Parámetros mecánicos	72
	2.3.3.1.3 Tipo de conducción del motor	76
2.3.4	Circuito electrónico	76
	2.3.4.1 Circuito principal de control	76
	2.3.4.2 Circuito de acondicionamiento de la señal procedente de la galga	78
	2.3.4.3 Circuito de acondicionamiento de la señal procedente del sensor magnético	83
	2.3.4.4 Circuito para sensar la carga eléctrica del motor	85
	2.3.4.5 Circuito de acondicionamiento de la señal de control para motor	90
2.3.5	Circuito eléctrico	92
	2.3.5.1 Circuito de potencia	93
2.3.6	Alimentación de los circuitos	95
	2.3.6.1 Dimensionamiento de la batería	98
	2.3.6.2 Circuito para verificar el voltaje de la batería	102
	2.3.6.3 Protecciones	103

<b>CAPITULO 3</b>	<b>105</b>
<b>DESARROLLO DEL SOFTWARE</b>	<b>105</b>
3.1 Programación del microcontrolador PIC16F873.	105
3.1.1 Flujograma general de trabajo	106
3.1.2 Configuración del microcontrolador pic16f873 para manejo de periféricos	110
3.1.3 Configuración del microcontrolador pic16f873 para manejo de interrupciones	111
3.1.4 Test del sensor	112
3.1.5 Control del motor	112
3.1.5.1 Análisis de las curvas de potencia humana y del motor	114
3.1.5.2 Alimentación del motor	123
<b>CAPITULO 4</b>	<b>128</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>128</b>
<b>CAPITULO 5</b>	<b>-</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>133</b>
<b>REFERENCIA BIBLIOGRAFICA</b>	<b>137</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>139</b>

## RESUMEN

En este proyecto se presenta el estudio e implementación de un sistema motriz para bicicletas, que contribuye al desarrollo de la bicicleta como medio alternativo de transporte, disminuyendo el esfuerzo de pedaleo del ciclista en su desplazamiento.

Para la elaboración de este proyecto se hizo una investigación de sistemas similares comerciales, y las bases legales que la ley exige, como es que la parte predominante de la tracción de una bicicleta sea de origen muscular, por lo tanto una bicicleta eléctrica tiene que estar construida de modo que el esfuerzo de tracción del motor no llegue nunca a sobrepasar el 50% del total. Asimismo se exige que su conducción sea idéntica que la de una bicicleta convencional.

En la actualidad, sistemas motrices no se comercializan de forma independiente sino que se incorporan a la bicicleta desde su fabricación y posteriormente se consiguen como parte de modelos exclusivos de bicicletas. En Ecuador no se ha desarrollado este tipo de tecnología y cuando se logra importar resulta costosa, con ausencia total de soporte técnico y de mantenimiento.

Con toda la información recopilada se diseñó, construyó e implemento dos módulos, totalmente extraíbles y adaptables a cualquier vehículo sin motor de dos ruedas, uno electromecánico que transforma las acciones de control en movimiento por medio de un motor de DC que va montado directamente en el eje de los pedales y actúa sobre la rueda a través de la misma cadena, y otro electrónico que controla la velocidad del motor dependiendo del esfuerzo ejercido en los pedales y la velocidad de pedaleo.

Los resultados de las pruebas demuestran que el hardware y el software diseñados combinan y aprovechan al máximo las dos fuentes de energía, muscular y eléctrica en una bicicleta.

## PRESENTACIÓN

Existen una serie de ventajas en el uso de la bicicleta como medio de transporte y que por tanto deben ser consideradas a la hora de tomar la decisión de andar en bicicleta, las ventajas pueden ser clasificadas en dos grupos: aquéllas que redundan directamente en cada uno de los usuarios de la bicicleta y aquéllas de las que se beneficia el colectivo social. Como alternativa y sustituto ideal de los transportes urbanos se diseñó el sistema motriz para bicicletas, basado en un microcontrolador, que mejora aun estas ventajas, logrando mejorar el rendimiento de la bicicleta, minimizando el nivel de esfuerzo del ciclista y aumentando las distancias recorridas.

La parte escrita del proyecto se estructura de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se realiza el Estudio del Sistema Motriz para bicicletas, citando algunos términos relacionados con “Bicicleta Eléctrica”, analizando sistemas similares y seleccionando la mejor opción de sensores y actuadores que intervienen en el diseño e implementación.

El diseño del Hardware mecánico y eléctrico que se adapten satisfactoriamente a la estructura de la bicicleta y a las necesidades de control que se requiere, respectivamente, como el dimensionamiento de los sensores y el actuador, son detallados en el Capítulo 2.

En el Capítulo 3, se realiza el software que permite que el sistema motriz trabaje de una manera eficiente, para diferentes recorridos.

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos después de la implementación física del sistema, se detallan en el Capítulo 4.

Las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó después de estudiar la viabilidad de desarrollar e implantar un sistema motriz automático de reducción de los esfuerzos de pedaleo en bicicletas se exponen en el Capítulo 5.

Finalmente en los anexos se adiciona el manual del usuario del sistema motriz, los esquemáticos y el circuito impreso del hardware implementado, como las hojas técnicas (datasheet) de los elementos electrónicos utilizados.

## **CAPITULO 1**

# **ESTUDIO DEL SISTEMA MOTRIZ PARA BICICLETAS**

# CAPÍTULO 1

## ESTUDIO DE SISTEMA MOTRIZ PARA BICICLETAS

### 1.1 INTRODUCCION

La bicicleta es uno de los medios de locomoción más eficientes que existen. Con una fuerza motriz muy reducida en comparación con otros vehículos mecánicos, logra una capacidad de desplazamiento notable. Con el mismo esfuerzo que un peatón hace para caminar, un ciclista recorre el triple de distancia. La energía necesaria para el desplazamiento en bicicleta es renovable y no consume recursos naturales, además contribuye, a la salud del ciclista (utilizada con moderación), y es el vehículo más silencioso que existe.

El uso generalizado de la bicicleta en recorridos urbanos mejoraría muchísimo la calidad de vida de la sociedad: se evitaría el ruido, la contaminación ambiental y la congestión de las calles, solucionaría los problemas de aparcamiento y sería una gran contribución a la salud individual y pública, es decir, es una solución ideal.

Hay diversos motivos por los que no se usa una bicicleta, por ejemplo: La comodidad del coche es una de las más importantes, pero es una comodidad relativa. La gran cantidad de motocicletas que circula demuestra que los vehículos de dos ruedas tienen grandes ventajas a la hora de circular por aglomeraciones: velocidad, maniobrabilidad en las congestiones de tránsito y facilidad para aparcar.

La bicicleta tiene en principio también todas estas ventajas (a menudo es en la ciudad más rápida que el coche), pero conlleva algunas limitaciones en cuanto a la velocidad, el radio de acción y los trayectos con fuertes pendientes. Pero estos inconvenientes quedan paliados con un nuevo tipo de vehículo, que en algunos países como Japón y Suiza se están utilizando cada vez más con éxito considerable<sup>[1]</sup>: la bicicleta eléctrica.

## 1.2 BICICLETA ELÉCTRICA

La bicicleta eléctrica es, sobretodo, una bicicleta y, como tal, una máquina pensada para desplazarse mediante el esfuerzo muscular de las piernas con la mayor eficiencia posible. Además de pedales, la bicicleta eléctrica lleva un motor eléctrico que añade una fuerza adicional a la que hace el ciclista.

El motor eléctrico no tiene la misión de sustituir la fuerza muscular, sino de complementarla, si no fuera así se estaría hablando de una motocicleta eléctrica, un vehículo que también existe pero que no es el que nos ocupa.

La ley exige que la parte predominante de la tracción de una bicicleta sea de origen muscular, por lo tanto una bicicleta eléctrica tiene que estar construida de modo que el esfuerzo de tracción del motor no llegue nunca a sobrepasar el 50% del total (basándose en normas internacionales)<sup>[2]</sup>. Asimismo se exige que su conducción sea idéntica que la de una bicicleta convencional.

No se trata pues de un vehículo asistido, sino de un híbrido con predominancia de la fuerza muscular.

### 1.2.1. ¿PORQUÉ UTILIZAR LA BICICLETA ELÉCTRICA?

Con una bicicleta eléctrica hay que hacer un esfuerzo físico comparable al necesario con una bicicleta normal, pero las prestaciones aumentan de modo substancial dejándolas al nivel de las de una motocicleta y permitiendo su uso en casos en que el trayecto en bicicleta convencional sería demasiado largo y/o duro. Pero se diferencia de una motocicleta en el hecho de que el esfuerzo del conductor es indispensable para su funcionamiento, lo que por otra parte le da una autonomía considerable. Tiene además una ventaja importante por encima de todos los otros vehículos eléctricos: en caso de agotar la batería se puede continuar el trayecto sólo pedaleando; eso sí, con un poco más de esfuerzo.

Esto conlleva algunas ventajas:

- Debido a la adición de dos fuentes de energía, la velocidad y la autonomía son considerables.
- El hecho de estar construida de modo que se aproveche al máximo la energía muscular permite igualmente circular con el motor desconectado.
- Se pueden abordar trayectos que por sus características (longitud y/o pendientes) no serian apropiados para bicicletas normales.
- Se pueden transportar cargas importantes debido a la fuerza de tracción incrementada.

Una buena bicicleta eléctrica tendrá que ser en primer lugar una buena bicicleta mecánicamente, que permita pedalear cómodamente, y además disponer de un motor eficiente con un sistema de control inteligente. El hecho de llevar un motor eléctrico no tendría que significar nunca un detrimento de las cualidades mecánicas y ergonómicas del vehículo, a fin de que la aportación y el aprovechamiento de energía muscular sea lo mas elevada posible.

### 1.2.2. ¿LA BICICLETA ELÉCTRICA ES IGUAL A UNA MOTO?

No hay que confundir la bicicleta eléctrica con la motocicleta eléctrica. Las características de ambos vehículos presentan claras diferencias en muchos aspectos. Así como una motocicleta eléctrica es prácticamente una motocicleta convencional, con la única diferencia que lleva un motor eléctrico en vez de uno de gasolina con las ventajas e inconvenientes que eso conlleva (sobre todo el radio de acción bastante reducido con la tecnología actual), una bicicleta eléctrica es, básicamente, una bicicleta diseñada de modo que se optimiza el rendimiento del esfuerzo muscular, el cual es y sigue siendo el componente principal de tracción. El motor eléctrico que lleva, más que ayudar, añade una fuerza adicional

que permite que con un menor esfuerzo muscular se recorra la misma distancia en menos tiempo.

La conducción es idéntica a la de una bicicleta convencional, pero lleva un controlador que se encarga de la gestión del motor. Por eso la bicicleta eléctrica lleva unos sensores que miden permanentemente la velocidad de los pedales y el esfuerzo que el ciclista hace. Según estos datos el motor, en caso de estar conectado (también se puede circular perfectamente por ejemplo en tramos llanos, en bajada o cuando no sean necesarias grandes velocidades con el motor desconectado) añadirá una fuerza adicional al movimiento de los pedales, que en ningún caso sobrepasará el 50% del total.

### 1.2.3. NORMAS LEGALES

No en todas partes una bicicleta eléctrica es considerada como una bicicleta por la ley, a veces este tipo de vehículo cae dentro de un vacío legal.

En principio si el motor se desconecta cuando se alcanzan los 24 Km/h (según normas internacionales)<sup>[2]</sup> y que sólo funciona mientras se pedalea activamente, el vehículo se puede considerar a todos los efectos como una bicicleta convencional y puede ponerse en circulación sin más, si se llega a velocidades superiores, estos modelos están hasta el momento homologados sólo en Suiza<sup>[1]</sup>, donde forman una clase de vehículo especial para la que se precisa seguro obligatorio y matrícula, se pueden conducir con permiso de coche o moto, no están sujetos a ninguna limitación genérica de velocidad y sin obligación de llevar casco, estando en algunos cantones libres de impuestos o incluso subvencionados; este conjunto de medidas hace que esos vehículos formen ya parte de la vida cotidiana de aquel país.

En el estado ecuatoriano no existe ninguna ley especial acerca del uso de una bicicleta eléctrica, como en la mayor parte de los países europeos por ejemplo Francia o Alemania, es decir se basará en estas normas internacionales ( El

Estado Ecuatoriano no las tiene y en caso de crearse dichas leyes para bicicletas deberán ser iguales a las existentes o al menos similares).

En definitiva:

- Se puede circular a más de 24 km/h sin problema. Simplemente la ley obliga a tener un dispositivo que desconecte el motor a esa velocidad, pero con la simple fuerza muscular se puede llegar sin problemas a los 40 km/h.
- Es posible circular a más de 24 km/h con motor en algunos países en que está permitido, como Suiza, Bélgica y Austria<sup>[1]</sup>.
- No se puede circular solo con motor. Como exige la normativa vigente, el vehículo mide permanentemente el esfuerzo del ciclista y regula la potencia del motor de modo que no sobrepase el 50% del total.
- Se puede circular sin motor sin ningún problema. Puesto que el motor no lleva ningún otro elemento móvil, no opone resistencia alguna y el vehículo se comporta como una bicicleta normal. En terreno llano apenas se debería notar diferencia.

#### 1.2.4. LA BICICLETA ELÉCTRICA Y LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

A pesar de ser poca, una bicicleta eléctrica consume también energía eléctrica. Si se quiere que su utilización sea absolutamente sostenible, se tiene que mirar que la energía utilizada para su funcionamiento no sea de origen fósil ni nuclear. Aunque a nivel individual el consumo sea mínimo, una masificación podría causar problemas por eso es deseable que, siempre que sea posible, la energía que se gaste provenga de una fuente limpia, como por ejemplo energía fotovoltaica. Así un solo panel de 110 vatios conectado mediante un adaptador a la red eléctrica producirá diariamente una cantidad de energía superior a la que puede gastar una

bicicleta eléctrica, el excedente de producción vuelve a la red disminuyendo así el consumo doméstico<sup>[1]</sup>.

### 1.2.5. LAS BICICLETAS ELÉCTRICAS ACTUALES

Hay tipos muy diferentes de bicicletas eléctricas, que van desde sencillos kits de adaptación para bicicletas normales con transmisión por fricción directamente sobre un neumático hasta vehículos muy desarrollados con tecnología de punta y altas prestaciones. La fuerte moneda de los países en que se fabrican y usan hace que el precio de estos modelos sea relativamente alto, más que el de una motocicleta, pero los beneficios para el usuario son también importantes: el costo energético por kilómetro es bajo, en Europa se estima que cada 100Km de recorrido tiene un costo energético menor a un cuarto de dólar y una actividad física con clara e inmediata repercusión sobre la salud y el bienestar; a lo que se le añaden valores medioambientales y sociales: se evitan totalmente el ruido y la contaminación.

Dada la utilidad de este tipo de vehículo y la importancia que puede tener para el desarrollo de la sociedad (si la voluntad política le es propicia), la elección de uno de los mejores modelos se impone. Aquí algunos modelos:

- Flyer
- Dolphin velocity
- Heinzmann Estelle
- Yamaha PAS XPC 26
- Aprilia
- Altres

Todos estos modelos tienen básicamente el mismo principio de funcionamiento, la diferencia radica en la forma que se obtienen y se procesan las variables, las

cuales gobiernan el funcionamiento del motor eléctrico, como son la velocidad del pedal y el esfuerzo muscular ejercido por la persona.

Los diseños con mayor demanda en el mercado son los de la Flyer por su alto rendimiento, amplia gama de modelos que se ajustan a los diferentes tipos de personas y necesidades, peso y básicamente por la tecnología que han desarrollado la cual es reconocida a nivel mundial.

### **1.3 MECANISMOS QUE DISMINUYEN EL ESFUERZO DEL CICLISTA AL PEDALEAR Y PERMITEN RECORRER MAYOR DISTANCIA.**

#### **1.3.1. SISTEMAS PARECIDOS**

Existen otros mecanismos que disminuyen el esfuerzo del ciclista al pedalear y le permite recorrer mayor distancia con la misma energía muscular, a continuación se presentan algunas alternativas:

##### **1.3.1.1. EQUIPO PARA BICICLETA QUE DUPLICA LA VELOCIDAD PEDALEANDO.**

###### **Descripción:**

Son un conjunto de dispositivos mecánicos que multiplica la velocidad de las bicicletas, sin que ello suponga mayor esfuerzo del usuario.

El equipo se monta junto a la caja pedalera (figura 1.1) y consiste en una serie de engranajes que, accionados por los pedales, a través de su eje, actúan sobre otra serie de engranajes que transmiten a las ruedas del vehículo mayor fuerza y velocidad.

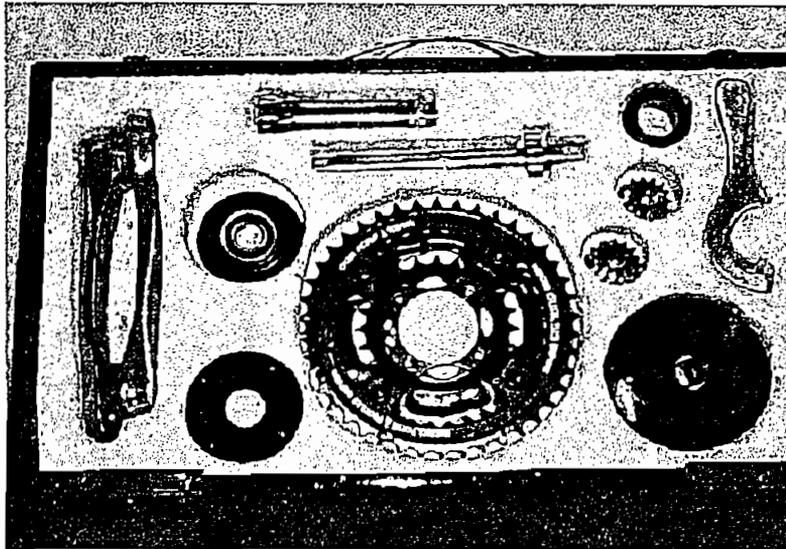


Figura 1.1 Caja Pedalera

### 1.3.1.2. LA TRANSMISIÓN AUTOMÁTICA PARA BICICLETAS DE CIUDAD

La transmisión automática para bicicletas de ciudad (figura 1.2), desarrollada en base a un sistema microcontrolado, opera automáticamente los cambios, el cual contribuye al desarrollo de la bicicleta como medio alternativo de transporte facilitando su manejo por las calles de una ciudad con relieve irregular. Este sistema presenta una transmisión automática, disminuyendo el esfuerzo del ciclista en su desplazamiento por una ciudad.

Esto se logra controlando la relación de piñones según la velocidad y las revoluciones de pedaleo de la bicicleta, con el fin de minimizar el esfuerzo del usuario y aumentar el rendimiento de la marcha.

El sistema se concibe mediante la interacción de dos módulos, uno electromecánico que transforma las acciones de control en movimiento y otro electrónico que controla a un motor por medio de lógica difusa; este último, modifica la relación de marcha de la bicicleta según las condiciones de viaje.

Mediante la interfaz con el usuario, el ciclista puede elegir entre dos posibles modos de trabajo: Un Modo Manual en donde el cambio de marcha se realiza a

través de un teclado o, un Modo Auto, en donde el usuario tiene la posibilidad de escoger una de tres formas de control automático de marcha, según las condiciones en que quiera desarrollar la travesía.

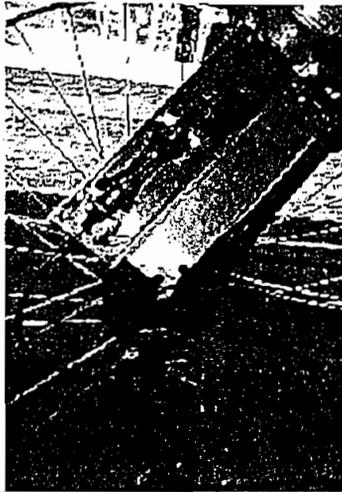


Figura 1.2 Transmisión Automática

#### 1.4 SISTEMA DE SENSORES

Una vez determinado con exactitud que es una bicicleta eléctrica y sus ventajas respecto a las bicicletas convencionales como también con las motocicletas, ahora se tomara en cuenta el sistema de sensores más adecuado que permita determinar el esfuerzo del ciclista y de esta manera el motor añada su potencia, pero en ningún momento sobrepase el 50% de la potencia total (muscular y eléctrica).

El sistema de sensores debe permitir que continuamente se muestren la frecuencia y el momento de torsión ejercido. Los datos deben ser comparados por el controlador que tomará la decisión de alimentar al motor. Así que al pedalear el motor añade su potencia, cuando se deja de pedalear o si se lo hace con poca fuerza el motor reduce la potencia o se desconecta completamente.

## **1.4.1 SENSORES PARA MEDIR EL ESFUERZO DEL CICLISTA**

Las alternativas analizadas para medir el esfuerzo son las siguientes:

### **1.4.1.1 MEDIDOR DE PULSO CARDIACO**

Recientes innovaciones en el campo de la medicina ratifican la importancia de la electrónica en esta área del conocimiento.

#### **1.4.1.1.1 ELECTRÓNICA Y MEDICINA**

Uno de los campos de acción más importante de la electrónica es sin duda alguna la medicina. Es imposible concebir hoy en día un hospital moderno sin unidad de rayos x, electrocardiógrafos, scanner o unidad de resonancia magnética. Las unidades médicas más avanzadas incluyen adelantos como cirugía con láser o neurocirugía virtual asistida por computadora, en donde avanzados sistemas crean modelos tridimensionales del cerebro y planean paso a paso la intervención quirúrgica. Pero no hay que ir tan lejos para encontrar a la electrónica en la medicina, incluso esta se puede encontrar en sencillos aparatos, tal como lo es un medidor de pulso cardíaco.

El pulso, ritmo o frecuencia cardiovascular es un concepto que la mayoría de persona maneja y es asociado con la muerte, con el deporte con la presión arterial e incluso con la taquicardia. Los atletas usan el ritmo cardíaco para evaluar su desempeño y por lo general no necesitan aparatos para esto, ya que conocen técnicas manuales para hacerlo, ellos hablan entonces de pulsos por minuto. Gracias a la estrecha relación que existe entre el pulso y el estado vital del paciente, los médicos lo usan para determinar el estado clínico de una persona, pero hay más. Las señales cardíacas son capaces de informa acerca del estado general del sistema cardiovascular, es posible determinar soplos en el corazón, problemas con la presión arterial y arritmias entre otros. El problema es entonces lograr tomar estas señales. Aquí entra a jugar la electrónica.

#### 1.4.1.1.2 EN BÚSQUEDA DEL PULSO.

Al plantear el objetivo de realizar un medidor de pulso surgió de inmediato la pregunta de como tomar la señal. Los medidores de pulso existen hace tiempo y los hay de variadas formas, los más sencillos usan la presión arterial para determinarlo, son los conocidos tensiómetros. Algunos más sofisticados usan luz infrarroja para determinar el nivel de oxigenación de la sangre y son capaces de determinar la frecuencia cardiaca. A nivel médico es bastante usado el electrocardiógrafo ó ECG<sup>[3]</sup>, que mediante señales eléctricas es capaz de descifrar los complejos movimientos del corazón y de paso su ritmo.

Los principales inconvenientes a ser solventados están en la gran cantidad de ruido eléctrico en el ambiente y en la baja potencia de las señales a tomar. La investigación muestra que éstas están en el orden de los 5mv con frecuencias cercanas a los 20khz y muy susceptibles a movimientos musculares.

Así que la señal debe ser amplificada y filtrada, pero cuanto debía ser amplificada?, cómo debía ser filtrada?, este tipo de preguntas se contestan a continuación.

#### 1.4.1.1.3 PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

El sistema constará básicamente de:

**Sensor** : Se trata de tres electrodos dispuestos así: dos en el pecho, separados 15 cm entre si con una distancia de 5 cm abajo de la base del cuello, el tercero se ubica en la parte interna del tobillo izquierdo.

Los electrodos usados son de tipo adhesivo desechable y el cable al aparato es blindado para evitar interferencia.

**Amplificador** : Se deberá llevar la señal a la escala de voltios , para lo cual se deberá obtener una ganancia del orden de 1000. La solución es un amplificador

de instrumentación diferencial cuyo factor de rechazo en modo común ayuda además al eliminar el ruido ambiental.

**Filtro** : Este debe tomar la señal del amplificador y eliminar cualquier tipo de ruido a alta frecuencia, además debe solucionar el problema del offset proveniente de la señal corporal ,la solución un filtro butterworth

**Comparador** : Es la parte encargada de tomar la componente correspondiente al ritmo cardiaco (que afortunadamente es la de mayor amplitud) y convertirla en una onda cuadrada que es mucho más fácil de manejar. Se usa una configuración de comparador con dos entradas, en una de ellas entra la señal y en la otra un nivel de referencia.

#### 1.4.1.1.4 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE ESFUERZO MUSCULAR EN BASE AL PULSO CARDIACO.

Este método no es apropiado para el sistema de sensores de la bicicleta eléctrica, por las siguientes razones:

- Requiere un ajuste previo a su funcionamiento lo que hace un poco difícil su operación en la etapa inicial.
- Necesita de la mayor quietud posible del usuario.
- Resulta bastante interesante aunque dispendioso trabajar con señales corporales.
- La principal razón para no utilizar el medidor de pulso cardiaco es que se desea medir el esfuerzo que hace la persona al pedalear independientemente del tiempo y de la trayectoria de pedaleo; ya que para conectar el motor no es necesario que aumente el pulso cardiaco.

### 1.4.1.2 SENSOR EN BASE A UNA CELDA DE CARGA

Lo que se busca es determinar el esfuerzo del ciclista para lo cual se va a medir la velocidad (frecuencia) y el momento de torsión (toque) ejercido en los pedales, para medir lo segundo se puede utilizar una galga (celda de carga), la cual va adaptada en el pedal derecho de la bicicleta.

A continuación se hace un recuento de las diferentes tipos de celdas de carga:

#### 1.4.1.2.1 GALGAS DE EXTENSIÓN (STRAIN GAUGES)

Una galga de extensión se construye sobre un metal de coeficiente de elasticidad dado, adosándole un alambre, una tira semiconductor o pistas conductoras. Al deformarse el soporte de la galga, se "estira" o se "comprime" el sensor, variando así su resistencia. El cambio de resistencia será, precisamente, el reflejo de la deformación sufrida. En términos de su caracterización, dada la resistencia  $R$  sin deformación, la aplicación de una fuerza  $F$  deformante producirá un cambio de resistencia,  $\Delta R$ , cuya medición permite calcular la fuerza mediante:

$$F = A \cdot E \cdot s = \frac{A \cdot E}{G} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

Donde se ha definido una constante "G", conocido como la constante de la galga y que suele variar entre 2 y 2,2 para galgas de soporte metálico.

Naturalmente, la posibilidad de medir fuerza permite construir, con estas galgas, balanzas electrónicas tanto como sistemas de medición de presión.

Habitualmente se utilizan circuitos en puentes, diseñados para los valores típicos de estas galgas (resistencias nominales de 120 $\Omega$ , 350 $\Omega$ , 600 $\Omega$  y 1000 $\Omega$ ) utilizando corrientes que no excedan los 10 mA.

### 1.4.1.2.2 CELDA DE CARGA UNIPUNTO

Esta celda de carga es un modelo unipunto, puesto que la carga se aplica en un solo punto, extremo, y dirección (Figura 1.3) mientras el otro extremo permanece fijo. Está protegida para trabajar bajo condiciones difíciles del medio ambiente y fabricada con aluminio. Esta es una característica óptima para soportar los impactos de la carga y condiciones adversas.

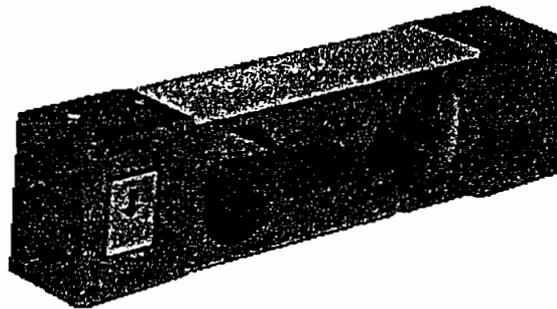


Figura 1.3 Celda de Carga Unipunto

#### Características de las celdas unipunto:

- Capacidad de 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100 y 100 lb.
- Diseñadas para montaje de bajo perfil.
- Cumple con los requerimientos OIML y HB44 Clase III. <sup>[4] [5]</sup>
- Fabricada con aluminio aeroespacial.
- Protegida contra ambientes hostiles.

#### Especificaciones:

Voltaje de excitación:	10 VCD/AC - 20 VCD/AC
Voltaje de respuesta:	2.0 mv/V $\pm$ 1%
No linealidad:	< 0.03% (a escala completa)
Histéresis:	< 0.03% (a escala completa)
No repetibilidad:	< 0.02% (a escala completa)
Arrastre (1 hora):	0.05% (a escala completa)

Aislamiento:	> 2,000 M Ohm
Balance de cero:	$\pm 2.0\%$ (a escala completa)
Impedancia de entrada:	$400 \pm 30$ Ohm
Impedancia de salida:	$350 \pm 4$ Ohm
Capacidad de sobrecarga:	150% de la capacidad
Carga máxima:	300% de la capacidad
Temperatura de rango de compensación:	$-10^{\circ}\text{C}$ a $40^{\circ}\text{C}$
Temperatura de efecto sobre la salida:	20 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ de la carga
Temperatura de efecto sobre el cero:	20 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ de la escala completa
Rango de temperatura de operación:	$40^{\circ}\text{C}$ a $80^{\circ}\text{C}$ de la escala completa

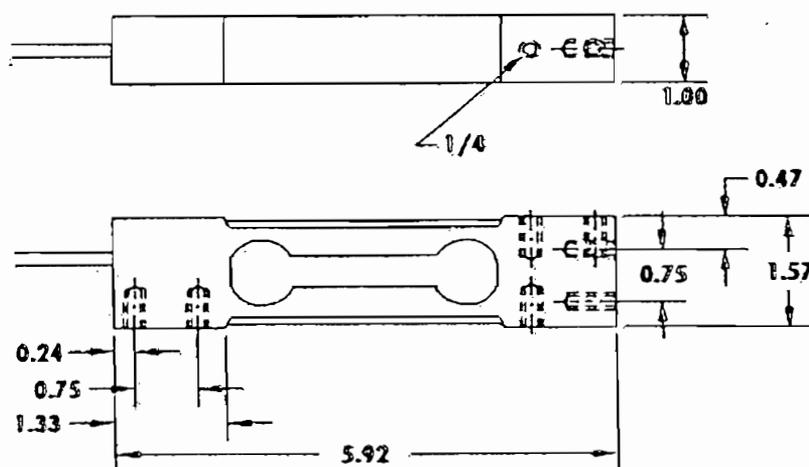


Figura 1.4 Dimensiones de una celda de carga Unipunto (pulgadas).

El elemento principal de la celda de carga es la galga, la cual se encuentra en un puente eléctrico de resistencias; al variar la resistencia de la galga debido a la deformación de la celda se produce un cambio en la salida diferencial del puente.

El puente eléctrico consta de 4 terminales, dos de alimentación y dos de salida diferencial, (Figura 1.5)

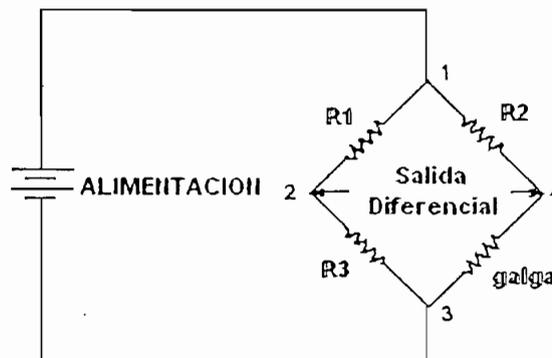


Figura 1.5 Puente Eléctrico

Los terminales son fácilmente identificables ya que son de colores estándares, la Tabla 1.1 indica los colores para las entradas y para las salidas.

Tabla 1.1 Colores de las Terminales Eléctricas de la Celda de Carga

Terminales Eléctricas	
<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
rojo (+)	verde (+)
negro (-)	blanco (-)

#### 1.4.1.2.3 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE ESFUERZO MUSCULAR EN BASE A UNA CELDA DE CARGA.

Este método de medición de esfuerzo muscular a partir de una celda de carga es el más apropiado para el sistema de sensores de la bicicleta eléctrica, por las siguientes razones:

- Alta capacidad de medición de esfuerzo (torque) lo cual es necesario para la aplicación.

- Físicamente apropiada para montarla o acoplarla en el pedal de la bicicleta, en donde se desea medir el esfuerzo aplicado por la persona,
- Se puede saber al instante y en cualquier momento el valor real de la variable a medir lo cual no es factible con la utilización de un medidor de pulso cardíaco.
- Insensible a los golpes y las vibraciones que se dan comúnmente al utilizar una bicicleta.

La principal razón por la cual se utilizará una celda de carga es que esta responde en todo momento dando el valor del "esfuerzo" que hace la persona al pedalear independientemente del tiempo y de la trayectoria de pedaleo. Su forma y constitución física es excelente para la aplicación obviamente si se la utiliza de manera adecuada y no se excede de su capacidad.

#### **1.4.2    SENSORES PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE GIRO.**

##### **Sensores de Velocidad**

Estos sensores pueden detectar la velocidad de un objeto tanto sea lineal como angular, pero la aplicación más conocida de este tipo de sensores es la medición de la velocidad angular de los motores o cualquier objeto que tenga un movimiento circular. La forma más popular de conocer la velocidad del giro de un motor, es utilizar para ello un dinamo tacométrico acoplado al eje del motor del cual se quiere saber su velocidad angular, ya que este dispositivo genera un nivel determinado de tensión continua en función de la velocidad de giro de su eje, pues si se conoce a que valor de tensión corresponde una determinada velocidad, se puede averiguar de forma muy fiable a qué velocidad gira un motor. De todas maneras, este tipo de sensores al ser mecánicos se deterioran, y pueden generar errores en las medidas.

Existen también otros tipos de sensores para medir la velocidad, basados en el corte de un haz luminoso a través de un disco perforado sujetado al eje del motor,

dependiendo de la frecuencia con la que el disco corte el haz luminoso se tendrá la velocidad del motor.

#### **1.4.2.1 SENSOR MAGNETICO PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDAD**

##### **1.4.2.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

Su operación se debe a la detección de la variación del campo magnético que el sensor genera en su extremo, debido al paso de un elemento ferromagnético. El sensor responde a una amplia gama de frecuencias lo que lo hace muy eficiente e independiente de este parámetro, a diferencia de otros sensores del mismo tipo, que solo son efectivos para frecuencias bajas.

#### **Pickup Magnético Para Medición de Velocidad - PM07**

##### **Especificaciones eléctricas**

Los sensores de velocidad Pickup están fabricados en materiales robustos para resistir condiciones industriales extremas.

##### **Salida:**

Tren de pulsos, amplitud  $V_{cc} - 0,5 V_{dc}$  con resistencia de protección por sobre corriente.

Salida PNP normalmente en 0 V.

Salida NPN normalmente en  $V_{cc} - 0.5$

La serie Pick Up magnético PM07 con Salida PNP o NPN especialmente diseñados para medir velocidad.

Entre sus características más importantes se encuentran:

- Distancia de detección hasta 5 mm
- Cápsula de acero inoxidable
- Respuesta superior a 10000 Hz

- Pequeño tamaño del blanco
- Alimentación desde 8 a 24 Vdc
- Led de indicación de operación
- Inmune al ruido electromagnético
- Poco ajuste de distancia al blanco

#### 1.4.2.2 ENCODERS INCREMENTALES

Los codificadores ópticos o encoders incrementales se utilizan fundamentalmente para el cálculo de la posición y velocidad angular. Básicamente constan de un disco transparente, el cual tiene una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre si; de un elemento emisor de luz (como un diodo LED); y de un elemento fotosensible que actúa como receptor. El eje cuya posición angular se va a medir va acoplado al disco. (Ver Figura 1.6)

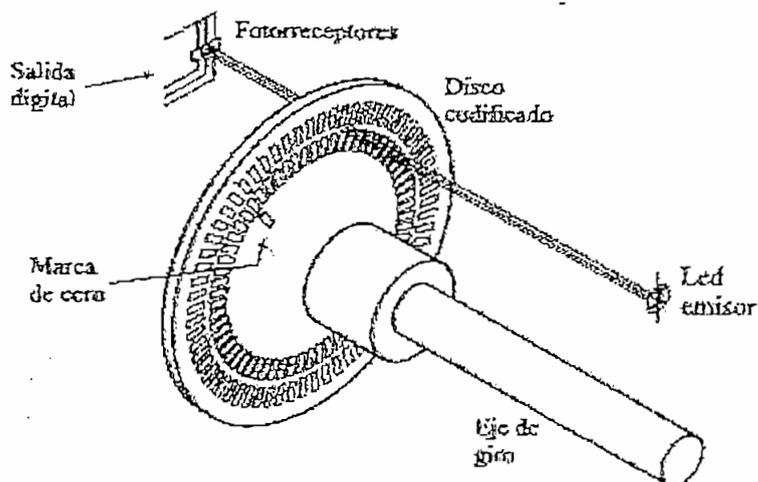


Figura 1.6 Encoder Incremental

El funcionamiento es el siguiente: cuando el sistema comienza a funcionar el emisor de luz empieza a emitir; a medida que el eje vaya girando, se producirán una serie de pulsos de luz en el receptor, correspondientes a la luz que atraviesa los huecos entre las marcas. Llevando una cuenta de esos pulsos es posible conocer la posición y velocidad del eje.

Sobre este esquema básico es habitual encontrar algunas mejoras. Por ejemplo, se suele introducir otra franja de marcas por debajo, desplazada de la anterior, para poder controlar el sentido del giro; además suele ser necesario el empleo de una marca de referencia que ayudará a saber si se ha completado una vuelta.

Realmente los encoders incrementales miden la velocidad de giro, pero se puede extrapolar la posición angular. Como es lógico, la resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueda poner físicamente en el disco.

### 1.4.2.3 ENCODER ABSOLUTO

La función de este tipo de dispositivos es similar a la de los anteriores, medir la posición y la velocidad angular. Sin embargo en este caso lo que se va a medir no es la velocidad de incremento de esa posición, sino la posición exacta y su velocidad. La disposición es parecida a la de los encoders incrementales.

También se dispone de una fuente de luz, de un disco graduado y de un fotorreceptor. La diferencia estriba en la graduación o codificación del disco. En este caso el disco se divide en un número fijo de sectores (potencia de 2) y se codifica cada uno con un código cíclico (normalmente un código de Gray); este código queda representado en el disco por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente, como se puede apreciar en la Figura 1.5. No es necesaria ninguna mejora para detectar el sentido del giro, ya que la codificación de los distintos sectores angulares es absoluta<sup>[6]</sup>.

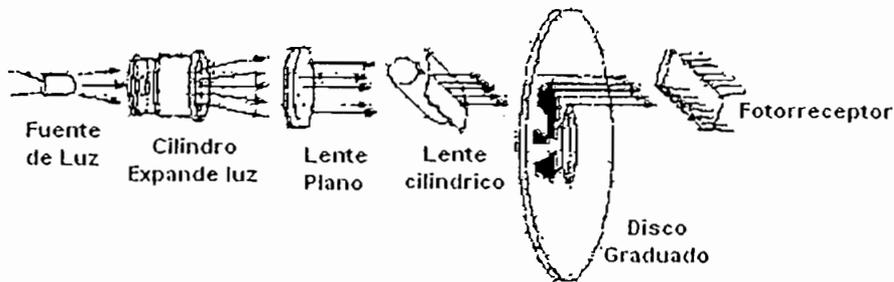


Figura 1.7 Encoder Absoluto

La resolución de estos sensores es fija y viene dada por el número de anillos que posea el disco, o lo que es lo mismo, el número de bits del código utilizado. Normalmente se usan códigos de 8 a 19 bits.

Tanto los encoders absolutos como los incrementales pueden presentar problemas debido a la gran precisión que es necesaria en el proceso de fabricación. Además son dispositivos especialmente sensibles a golpes y vibraciones.

#### 1.4.2.4 POTENCIOMETRO

Los potenciómetros son unos dispositivos capaces de medir la posición y la velocidad angular y pequeños desplazamientos de posición lineal. Según el tipo de posición y velocidad a medir se tendrán dos tipos distintos de dispositivos pero la idea básica es común.

Constan de una resistencia a través de la cual hay una determinada diferencia de potencial. Además hay un contacto unido a la resistencia pero que se puede deslizar a su alrededor; este elemento es conocido como *wiper*. El *wiper* se conecta físicamente al elemento cuyo movimiento se va a medir. Cuando este elemento se mueva el *wiper* se ira moviendo por la resistencia y la tensión de salida en él (en el *wiper*) irá cambiando. Si se mide está tensión de salida, se podrá determinar cuanto se ha desplazado el *wiper*, y por lo tanto cuanto se ha desplazado el elemento que se pretende controlar.

#### 1.4.2.5 TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIACIÓN LINEAL (LVDT)

Como la mayoría de los dispositivos vistos hasta ahora, este tipo de sensores se basan en fenómenos eléctrico-magnéticos. En el LVDT se une al eje cuyo desplazamiento se mide en un núcleo ferromagnético. Si se sitúa este núcleo entre una serie de inductancias, tal y como muestra el esquema de la figura 1.8, la diferencia de potencial  $E_0$  será proporcional al movimiento del núcleo ( y por lo tanto al del eje).

Este sistema se utiliza ampliamente debido a su gran resolución, alta linealidad y rápida respuesta. Sin embargo, tiene el inconveniente de que no permite medir grandes desplazamientos.

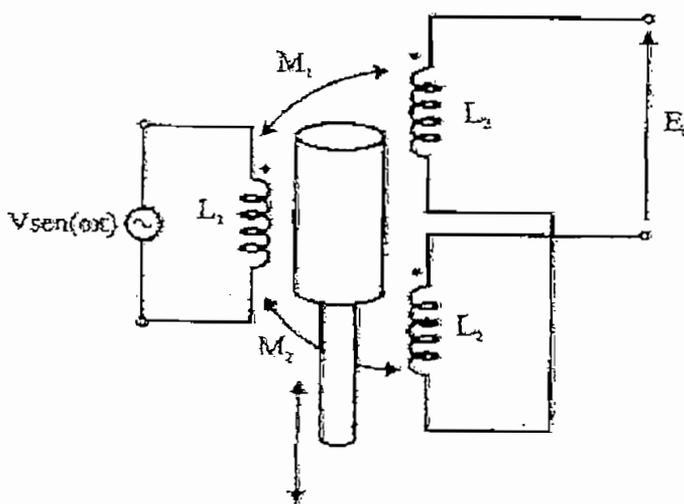


Figura 1.8 Núcleo Ferromagnético en bobinas cuyo desplazamiento provoca un cambio en  $E_0$

Todos los sensores de posición y velocidad que se ha visto suelen ser usados para medir la posición y velocidad angular y lineal de uniones de brazos de robot o de efectores finales de los mismos y movimiento circular. Quizá la única excepción sean los encoders, que se pueden encontrar en algunos sistemas móviles.

#### 1.4.2.6 ANÁLISIS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN BASE UN SENSOR MAGNETICO.

Este sensor se basa en la detección de la variación del campo magnético que se genera en su extremo, debido al paso de un elemento ferromagnético. Esto se traduce en el cierre o apertura de un microswitch. El sensor responde a una amplia gama de frecuencias lo que lo hace muy eficiente e independiente de este parámetro, la diferencia entre otros sensores del mismo tipo es la frecuencia a la que trabaja y la distancia de detección.

Este tipo de sensor se lo emplea por su fácil implementación. Acondicionándolo como cualquier switch se lo puede implementar en el PIC en forma de interrupción externa para así activar un timer, se puede contar las vueltas por minutos (rpm) o el tiempo que se demora el pedal en dar una vuelta y a partir de esto se obtendrá la velocidad.

### 1.5 SELECCIÓN DE LA FUENTE MOTRIZ

El elemento capaz de complementar la fuerza muscular ejercida por el ciclista, es un motor, este puede ser eléctrico o de gasolina, para la selección del mismo se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- La energía que se gaste debe provenir de una fuente limpia,
- El sistema debe ser silencioso ,
- La contaminación atmosférica será mínima
- El control sea simple y barato

En base a estas cualidades la mejor opción es el motor eléctrico, lo cual conlleva a otra pregunta ¿Motor de Corriente Continua? o ¿Motor de Corriente Alterna?; para despejar esta incógnita básicamente se toma en cuenta dos aspectos importantes: **Costos y Complejidad.**

Entre las ventajas de utilizar un Motor de DC se puede citar :

- Tecnología bien establecida
- Sistema de Control simple
- Control a bajas velocidades
- Amplio rango de variación de velocidades

Pero también tiene desventajas:

- Costo de Motor
- Mantenimiento del Motor

Entre las ventajas de utilizar un Motor de AC se puede citar:

- Costo de Motor
- Ambientalmente insensible

Pero también tiene desventajas:

- Control complejo
- Control a bajas velocidades

Haciendo un balance entre ventajas y desventajas, para esta aplicación se escoge el motor de DC básicamente por el sistema de control simple y por la disponibilidad de voltaje.

El Motor complementara la fuerza muscular del ciclista , directamente acoplado en los pedales por medio de una caja reductora, que disminuirá la velocidad ( motor de DC generalmente de alta velocidad) y aumentará el torque.

## 1.5.1 MOTOR-REDUCTOR O CAJA REDUCTORA

### 1.5.1.1 ENGRANAJES

Uno de los problemas principales de la Ingeniería Mecánica es la transmisión de movimiento, entre un conjunto motor y máquinas conducidas. Desde épocas muy remotas se han utilizado cuerdas y elementos fabricados de *madera* para solucionar los problemas de transporte, impulsión, elevación y movimiento.

La posición entre los ejes de los engranajes es de gran importancia al diseñar una transmisión. Las situaciones son principalmente tres: ejes paralelos, ejes que se cortan y ejes que se cruzan.

Un ejemplo de ejes que se cruzan se aprecia en la figura 1.9, en donde una manivela mueve un elemento que se denomina tornillo sin fin el que a su vez mueve la rueda unida a él.

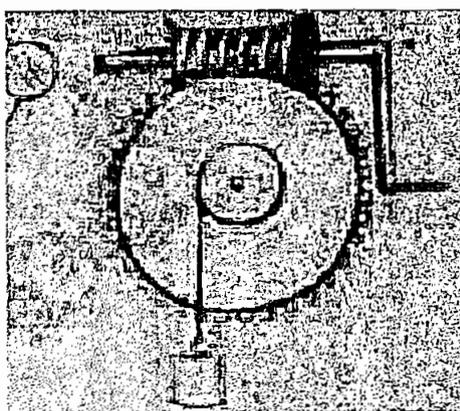


Figura 1.9 Ejes que se Cruzan

Los engranes propiamente son ruedas provistas de dientes que posibilitan que dos de ellas se conecten entre sí. El siguiente esquema indica los tres diámetros que definen el tamaño del diente.

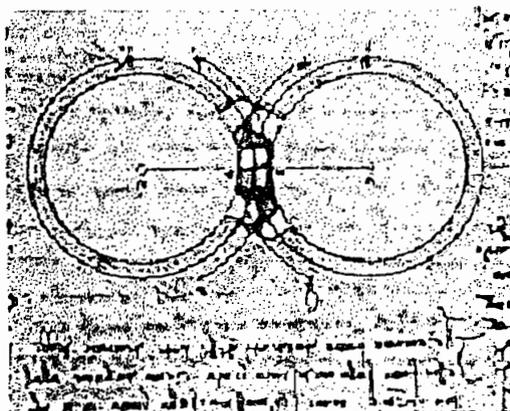


Figura 1.10 Diámetros que definen el tamaño del Diente

### 1.5.1.2 GENERALIDADES

Los engranajes constituyen el tipo más común de transmisión (figura 1.11). Consisten en un par de ruedas dentadas que transmiten la potencia y el movimiento mediante interacción por su periferia. Aparte de transmitir movimiento relativo, pueden también convertir movimiento rotativo en movimiento de traslación como es el caso del sistema piñón-cremallera.

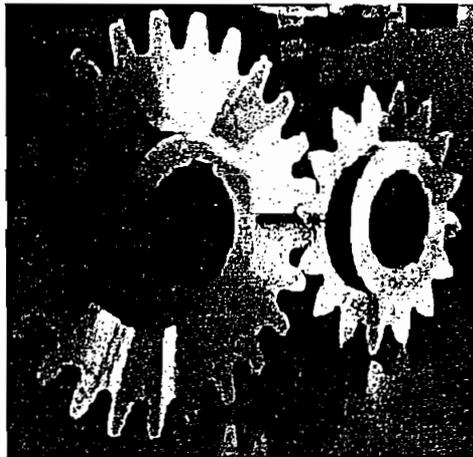


Figura 1.11 Transmisión de movimiento entre dos engranes

#### Ventajas:

1. Alta eficiencia.
2. Para transmitir una potencia dada, requieren menor tamaño que las ruedas de fricción.
3. Requieren un mínimo de mantenimiento.
4. Mantienen constante la relación de transmisión.
5. Transmiten potencia en un amplio rango ( $10^{-3}$  a  $10^4$ ) kw.

#### Desventajas:

1. Fabricación complicada: requiere máquinas y herramientas especiales.
2. Producen ruido debido a imperfecciones de fabricación, por altas velocidades o por si solo (de dientes rector)<sup>[7]</sup>.

3. Inadecuados cuando la distancia entre ejes es grande.

### 1.5.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ENGRANAJES

Los engranes se clasifican en cuatro grupos:

- Engranajes Cilíndricos (para ejes paralelos y que se cruzan)
- Engranajes Cónicos (para ejes que se cortan y que se cruzan)
- Tornillo sin fin y rueda helicoidal (para ejes ortogonales)
- Cremallera

#### 1.5.1.3.1 ENGRANAJES CILÍNDRICOS

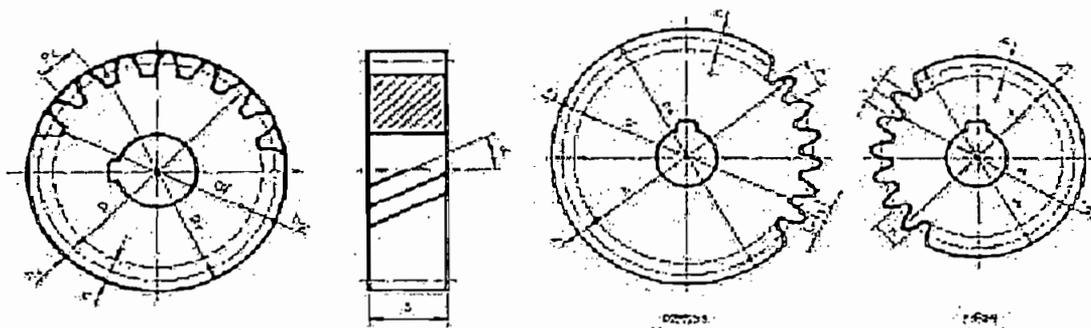


Figura 1.12 Engranajes Cilíndricos para ejes paralelos y que se cruzan

Se fabrican a partir de un disco cilíndrico (figura 1.12), cortado de una plancha o de un trozo de barra maciza redonda. Este disco se lleva al proceso de fresado en donde se retira parte del metal para formar los dientes. Estos dientes tienen dos orientaciones: dientes rectos (paralelos al eje), y, dientes helicoidales (inclinados con respecto al eje).

Los engranajes de diente recto son más simples de producir y por ello más baratos, la transmisión del movimiento se realiza por medio de los dientes, quienes se empujan sin resbalar. En el caso de los dientes helicoidales los dientes se empujan y resbalan entre sí, parte de la energía transmitida se pierde

por roce y el desgaste es mayor. La ventaja de los helicoidales es la falta de juego entre dientes que provoca un funcionamiento silencioso y preciso.

Los engranajes pueden ser desde muy pequeños hasta muy grandes, para facilitar la puesta en marcha y la detención de un mecanismo es importante que el engranaje tenga poca masa, esto se logra quitando material a la llanta. Puede fabricarse una llanta delgada, con perforaciones o simplemente sacar la llanta y reemplazarla por rayos.

En la figura 1.13 se aprecian tres engranes de distinto tamaño, desde un engrane macizo hasta un engrane con rayos pasando por un engrane con llanta aligerada.

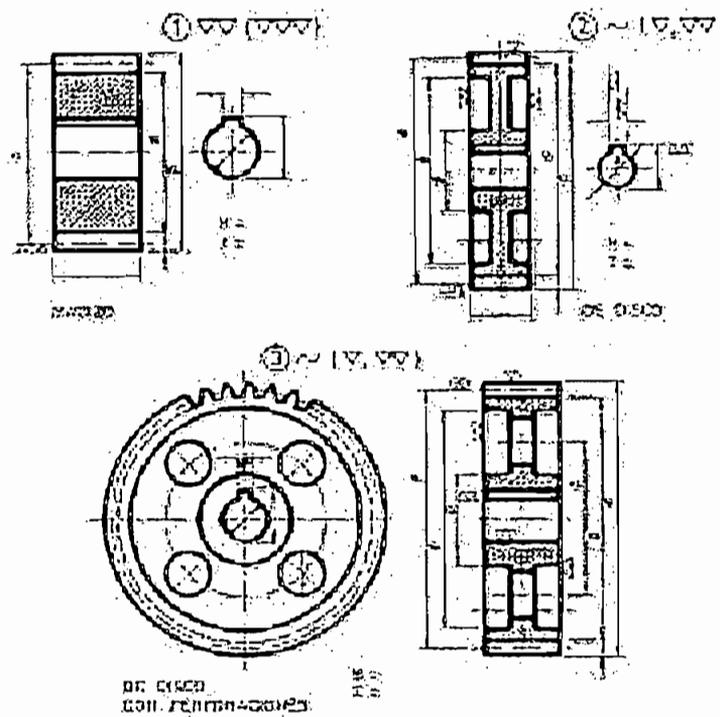


Figura 1.13 Engranajes de diferente tamaño: Engrane macizo, engrane con rayos y engrane con llanta aligerada

#### 1.5.1.3.2 ENGRANAJES CÓNICOS

Se fabrican a partir de un trozo de cono, formándose los dientes por fresado de su superficie exterior. Estos dientes pueden ser rectos, helicoidales o curvos. Esta

familia de engranajes soluciona la transmisión entre ejes que se cortan y que se cruzan. En las figuras 1.14 se aprecian un par de engranes cónicos para ejes que se cortan y un par de engranes cónicos hipoidales de diente curvo para ejes que se cruzan.

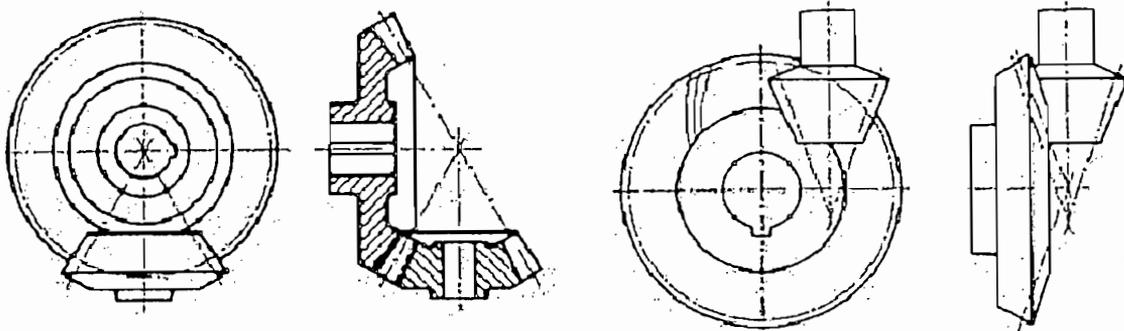


Figura 1.14 Engranajes cónicos

#### 1.5.1.3.3 TORNILLO SIN FIN Y RUEDA HELICOIDAL

Este mecanismo se compone de un tornillo cilíndrico o hiperbólico y de una rueda (corona) de diente helicoidal cilíndrica o acanalada. Es muy eficiente como reductor de velocidad, dado que una vuelta del tornillo provoca un pequeño giro de la corona. Es un mecanismo que tiene muchas pérdidas por roce entre dientes, esto obliga a utilizar metales de bajo coeficiente de roce y una lubricación abundante, se suele fabricar el tornillo (gusano) de acero y la corona de bronce. En la figura 1.15 se aprecia un ejemplo de este tipo de mecanismo.

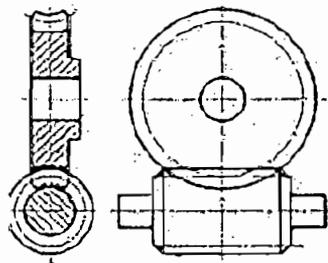


Figura 1.15 Tornillo sin fin y rueda helicoidal

#### 1.5.1.3.4 CREMALLERA

Este mecanismo permite transformar movimiento circular en movimiento lineal para mover puertas, accionar mecanismos y múltiples aplicaciones en máquinas de producción en línea.

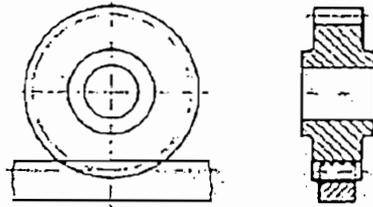


Figura 1.16 Cremallera conectada a un engrane cilíndrico de diente recto.

#### 1.5.1.4 CAJAS REDUCTORAS

El problema básico en la industria es reducir la alta velocidad de los motores a una velocidad utilizable por las máquinas. Además de reducir se deben contemplar las posiciones de los ejes de entrada y salida y la potencia mecánica a transmitir.

Para potencias bajas se utilizan moto-reductores que son equipos formados por un motor eléctrico y un conjunto reductor integrado. Las herramientas manuales en general (taladros, lijadoras, cepillos, esmeriles, etc.) poseen un moto-reductor.

Para potencias mayores se utilizan equipos reductores separados del motor. Los reductores consisten en pares de engranajes con gran diferencia de diámetros, de esta forma el engrane de menor diámetro debe dar muchas vueltas para que el de diámetro mayor de una vuelta, de esta forma se reduce la velocidad de giro.

Para obtener grandes reducciones se repite este proceso colocando varios pares de engranes conectados uno a continuación del otro.

Las figuras 1.17 muestran dos cajas de reductores con engranes cilíndricos y cónicos. Una de ellas tiene dos pares de engranajes cilíndricos de diente helicoidal y la otra posee además un par de engranajes cónicos de diente helicoidal.

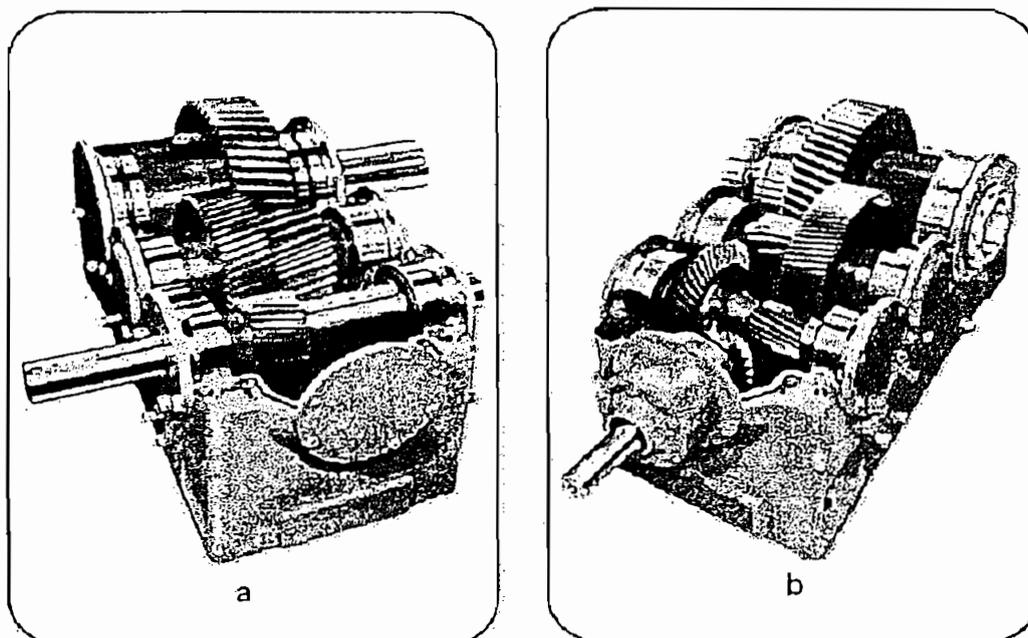


Figura 1.17 Caja reductora con engranes cilíndricos (a) y cónicos (b)

En estas cajas es importante notar que se abren en dos mitades y la línea de unión está en el plano que forman los ejes. Este diseño se basa en la conveniencia de abrir la caja al nivel de los ejes para extraerlos con facilidad y permitir el cambio de rodamientos, sellos de aceite, revisar el desgaste de los dientes y otras mantenciones preventivas.

La figura 1.18 muestra una caja con engranes tipo tornillo sinfín y rueda helicoidal, este mecanismo es muy conveniente como reductor de velocidad en un solo paso. El tornillo o gusano se ubica en la parte inferior de la caja para asegurar una lubricación abundante.

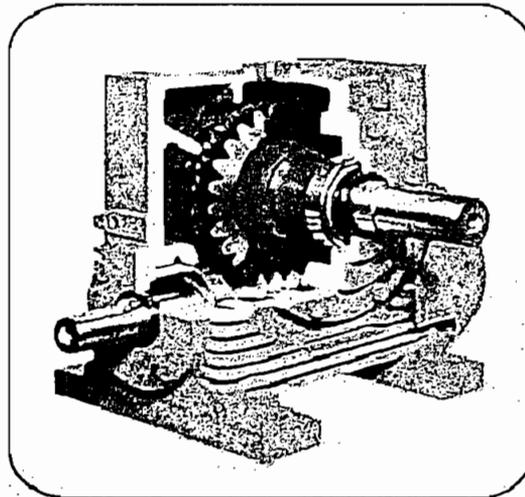


Figura 1.18 Caja con engranes tipo tornillo sinfín y rueda helicoidal

#### 1.5.1.5 DISEÑO DE ENGRANAJES

Un par de engranes que trabajan unidos se diseñan a partir de sus círculos primitivos o de paso, estos círculos son siempre tangentes entre sí. El diámetro de estos círculos se obtiene de multiplicar el módulo por la cantidad de dientes. El módulo se define como el tamaño de los dientes y para que dos engranes trabajen juntos deben tener igual módulo.

Se tiene entonces:

$$D_p = M Z$$

Donde:

$D_p$ : diámetro primitivo o de paso

$M$ : módulo

$Z$ : cantidad total de dientes del engrane

Si se tienen dos engranajes 1 y 2 con velocidades de giro  $n_1$  [rpm] y  $n_2$  [rpm] se pueden obtener unas relaciones de gran utilidad. Si los dos engranes van a trabajar juntos, en una unidad de tiempo ambos recorren la misma cantidad de metros, por ejemplo en un minuto ambos recorren:

$$n1 / n2 = Dp2 / Dp1$$

$$\text{Pero } Dp = M Z$$

$$n1 / n2 = Z2 / Z1$$

Se define la relación de transmisión  $i:1$  como la cantidad de vueltas que debe dar el engranaje motor para que el engranaje conducido o arrastrado de una vuelta. Por ejemplo, un reductor que disminuya a un cuarto la velocidad de giro tiene una relación 4:1.

$$\text{En general: } i = n1 / n2 = Dp2 / Dp1 = Z2 / Z1$$

De esta forma, un diseño de engranajes parte por definir el módulo y la relación de transmisión que se desea, de esta forma y usando las relaciones anteriores se obtienen los diámetros de paso. Se entregan a continuación los valores típicos para el módulo:

Tabla 1.2 Valores típicos para los módulos (pulgadas)

Módulos	
1 <sup>da</sup> Opción	2 <sup>da</sup> Opción
1	1.125
1.25	1.375
1.5	1.75
2	2.25
2.5	2.75
3	3.5
4	4.5
5	5.5
6	7
8	9
10	11
12	14
16	18
20	22
25	28
32	36
40	45

Otra forma de indicar el tamaño de los dientes es indicando el Paso diametral [dientes/ pulgada], se tiene que:

$$Pd = Z / D_p$$

donde:

Pd : Paso diametral

$$Pd = 1 / M$$

Tabla 1.3 Tamaños más utilizados para el Paso diametral (pulgadas)

<b>Paso diametral</b>	
<b>Bastos</b>	<b>Finos</b>
2	20
2.25	24
2.5	32
3	40
4	48
6	64
8	80
10	96
12	120
16	150

En el diseño de los dientes, se debe tener en cuenta que en todo momento exista contacto entre el piñón (el engrane de menor diámetro) y la corona (el engrane de mayor diámetro). El perfil utilizado generalmente es el de la evolvente del círculo y en otro casos el de la cicloide.

## 1.6 ALIMENTACION DE LA FUENTE MOTRIZ

Partiendo de la necesidad de alimentar al Motor de DC, se debe escoger la fuente de energía más conveniente, para lo cual se considera básicamente la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos y la suministrada por un acumulador o batería, para la primera es conveniente tener en cuenta el hecho de que la distribución temporal del consumo no es totalmente coincidente con las horas de

insolación, su tamaño físico se relativamente grande, frágil y poco maniobrable para el conjunto ciclista – bicicleta.

Descartando el uso de paneles fotovoltaicos la mejor alternativa es el empleo de baterías de acumuladores debido a su bajo coste de instalación y a su rendimiento.

Además, la batería cumple dos importantes misiones:

1. Suministrar potencia instantánea o durante breves momentos, superior a la que el campo de paneles podría generar aún en los momentos más favorables posibles.
2. Mantener un nivel de tensión estable: La tensión de salida del panel varía en función de la intensidad radiante, lo cual puede no ser adecuado para el funcionamiento de los aparatos. El acumulador proporciona un voltaje estable y constante independiente de las condiciones de incidencia luminosa.

### 1.6.1 RECARGA DE LA BATERIA

La batería o acumulador puede ser recargada solamente con un cargador conectado a la red, se puede pensar que también podría ser recargada en las bajadas o durante el pedaleo (fuerza muscular). Teóricamente sí, pedaleando a 100r.p.m. o más. En la práctica este caso no se da casi nunca, principalmente por la siguiente razón:

- Para mantener el voltaje o la corriente constante, lo cual es indispensable para recargar una batería o acumulador se debe mantener la velocidad de la bicicleta en un rango de velocidad que es relativamente difícil para el ciclista llegar a obtenerla, peor mantenerla por un tiempo que la batería requiere para ser completamente recarga.

## 1.6.2. CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS TIPOS DE BATERIAS

A continuación se muestran las características, ventajas y desventajas de algunos tipos de baterías:

### Baterías Ni-Cd (Nickel Cadmium)

Las baterías de Ni-Cd (Níquel-Cadmio) constan de dos polos, un polo positivo con hidróxido de níquel y uno negativo de hidróxido de cadmio. A lo largo de la vida de la batería, su capacidad máxima va disminuyendo debido al efecto memoria.

Tabla 1.4 Ventajas e inconvenientes de las Ni-Cd

Ventajas	Inconvenientes
Son baratas	Son contaminantes
Buena capacidad y autonomía	Tienen efecto memoria
Tienen una gran vida útil	Pierden un 10% de carga las primeras 24 horas
Alta descarga debido a su pequeña resistencia interna (lo que se llama entre amigos "más patada")	Se autodescargan
Tienen un tiempo menor de carga que otras baterías recargables	No se pueden cargar varias veces al día

### Precauciones Ni-Cd

- Para almacenar sin uso las baterías Ni-Cd, es recomendable que estén descargadas, ya que aunque existe tasa de auto-descarga, ésta se va decrementando con el tiempo hasta hacerse prácticamente despreciable.

- Se han de cargar solamente el tiempo necesario, un exceso de carga puede ser más perjudicial que el efecto memoria.
- No se debe descargar la batería a menos 0,9 Voltios (por elemento) ya podrían dañarla. Esto se llama descarga profunda.
- Desechar las baterías en lugares habilitados para ello ya que son muy contaminantes.
- Es aconsejable al menos cada mes realizar una descarga y una carga completa.

### Baterías NiMH (Níquel Metal Hydride)

Las baterías de níquel metal hidruro (NiMH) son algo más caras que las de Ni-Cd por los metales que se usan para fabricarlas y no poseen efecto memoria (Sí lo poseen, pero muy pequeño) y se caracterizan por su elevada densidad de energía por volumen y peso (30 % más que las de Ni-Cd a igualdad de tamaño y peso).

Tabla 1.5 Ventajas e inconvenientes de las NiMH

Ventajas	Inconvenientes
Tienen más densidad de energía que las de Ni-Cd por lo que a igual capacidad pesan menos y tienen menos volumen.	Menos durabilidad de ciclos que las de Ni-Cd
No son contaminantes	Muy propensas a las sobrecargas
No tienen efecto memoria (Lo tienen pero despreciable)	Necesita más tiempo de carga que una de Ni-Cd

Se pueden recargar varias veces al día	No ofertan una tasa de descarga tan grande como Ni-Cd
Tienen posibilidad de cargarse a altas tasas de amperaje.	-

### Recomendaciones

- Para almacenar sin uso las baterías NiMH, es recomendable que se almacenen con un 40% ó 50% de carga.
- Aunque no padece el efecto memoria, es aconsejable no iniciar un proceso de carga antes de que haya perdido un 50% de su capacidad. De vez en cuando, es aconsejable que se descargue completamente antes de ponerlo a recargar (Al menos cada 3 meses).

### Baterías Lilon (Litio-Ión)

Las baterías de Litio-Ión (Lilon) tienen altísima densidad energética (80-100 Wh/kg), apenas efecto de autodescarga (0.3% día) y sin efecto memoria. Con estas baterías se consigue alcanzar una capacidad nominal 2 veces superior a las de Ni-Cd y 1.5 veces superior a las de NiMH. Una batería de Lilon pesa menos de la mitad que una batería de Ni-Cd de igual capacidad.

El proceso completo de carga, como en el caso de las de NiMH, dura más tiempo que las de Ni-Cd.

Tabla 1.6 Ventajas e inconvenientes de las Lilon

Ventajas	Inconvenientes
Tienen más densidad energética que las de Ni-Cd y NiMH por lo que a igual capacidad pesan menos de la mitad y poco volumen.	Menos durabilidad de ciclos de vida que las de Ni-Cd y NiMH
Apenas autodescarga	Propensas a las sobrecargas
No tienen efecto memoria	Necesita más tiempo de carga que una de Ni-Cd
Se pueden recargar varias veces al día	Ofertan una tasa media de descarga
-	Son muy contaminantes

### Recomendaciones

- Aunque no padece el efecto memoria, es aconsejable no iniciar un proceso de carga antes de que haya perdido un 50% de su capacidad. De vez en cuando, es aconsejable que se descargue completamente antes de ponerlo a recargar (Al menos cada 3 meses).
- Para almacenar sin uso las baterías Lilon, es recomendable que se almacenen con un 40% ó 50% de carga.
- Desechar las baterías en lugares habilitados para ello ya que son muy contaminantes.

Tabla 1.7 Comparativa de baterías recargables

Características	Ni-Cd	NiMH	Lilon
Voltaje nominal por célula	1.2V	1.2V	3.6V
Precio	Económicas	Algo más caras que las de Ni-Cd	Precio elevado
Ciclos de vida (duración)	1000 ciclos	400-600 ciclos	300-500 ciclos
Almacenamiento de la batería sin uso	Descargadas	Almacenar con 40% ó 50% de carga	Almacenar con 40% ó 50% de carga
Capacidad	Buena capacidad	30% más de capacidad que una de Ni-Cd a igualdad de peso y tamaño	2 veces más capacidad que una de Ni-Cd y 1,5 más que una NiMH a igualdad de peso y tamaño
Energía Densidad (Wh/kg)	40-60	60-80	80-100
Resistencia Interna (mOhm)	100-200	200-300	150-250
Máximo número de cargas por día (recomendable)	1	3	3
Sobrecarga	Perjudicial	Muy perjudicial, son muy sensibles	Perjudicial
	Alta descarga (Baja	Buena descarga	Descarga media

<b>Descarga</b>	Resistencia)	(Resistencia más grande que Ni-Cd)	(Por lo que no se usan para la tracción de eléctricos, sólo receptores y servos, etc)
<b>Autodescarga (Sin usar)</b>	De 1 a 3 % día	De 2 a 8% día	0,3% día
<b>Recarga</b>	Se necesitan varias horas	Necesita más tiempo que una de Ni-Cd	Necesita más tiempo que una de Ni-Cd
<b>Efecto Memoria</b>	Sí	No (Realmente tienen un pequeño efecto memoria que es despreciable)	No
<b>Reciclaje</b>	Reciclable, contaminante	Desechable, no contamina	Reciclable, muy contaminante
<b>Temperatura de operación</b>	Buena	Sensiblemente mejor operación que Ni-Cd a Baja y a alta temperatura	Buena
<b>Perfil de descarga</b>	Similar a NiMH	Similar a NiMH	-

En este capítulo se hizo el estudio del Sistema Motriz para Bicicletas en el que se analizó las características generales de La Bicicleta Eléctrica como las alternativas de utilizar otros mecanismos que permitan disminuir el esfuerzo del ciclista al pedalear. También se analizó todos los aspectos importantes que permitirán el correcto funcionamiento de la Bicicleta Eléctrica como son: las diferentes posibilidades para medir el esfuerzo del ciclista y la velocidad de giro

de los pedales, la selección de la fuente motriz (Tipo de Motor) y su alimentación, Caja reductora (Clasificación y diseño de engranes).

En el siguiente capítulo se determina el diseño del hardware más conveniente como las partes mecánicas involucradas en el desarrollo e implementación del Sistema Motriz para Bicicletas.

## **CAPITULO 2**

# **DISEÑO Y DESARROLLO DEL HARDWARE**

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO Y DESARROLLO DEL HARDWARE

#### 2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

A lo largo de este capítulo se describe el proceso de diseño del hardware y de las partes mecánicas involucradas en el desarrollo e implementación del sistema motriz para bicicletas. Las partes mecánicas construidas tienen un papel muy importante en la obtención de las variables a medir las cuales una vez acondicionadas se las procesa en base a un algoritmo en el microcontrolador, el cual tomara las decisiones (activación del motor). La bicicleta eléctrica debe ser primero una buena bicicleta mecánica.

El prototipo diseñado e implementado debe ser capaz de proveer al usuario mayores ventajas en cuanto al simple hecho de utilizar una bicicleta común y corriente. Las ventajas que debe proporcionar el sistema motriz para bicicletas se concentran en las siguientes:

- Mantener el confort al pedalear en todo momento independiente de las condiciones físicas del terreno (pendientes) a recorrer.
- Funcionamiento automático, dependiente únicamente de las variables a medir como son la velocidad y el esfuerzo que la persona ejerce sobre los pedales.
- Ocupar menor espacio posible en la bicicleta.
- Controles del sistema fácil de maniobrar y visualmente agradables.
- Adaptable a cualquier tipo de persona, siendo esta la principal característica del sistema, es decir compensa la potencia necesaria para cada usuario puesto que no todos tienen la misma constitución física ni la fuerza al pedalear.

- Suministrar la potencia extra “necesaria” como suplemento a la ejercida por la persona al pedalear, esto es cuando se realiza un esfuerzo mayor al que se haría normalmente al pedalear en un terreno plano.
- No ejercer ninguna carga o molestia al ciclista.

A continuación (figura 2.1) se muestra en bloques el esquema electrónico básico del sistema motriz para bicicletas:



Figura 2.1 Esquema electrónico básico del Sistema Motriz para Bicicletas

### 2.1.1. REQUERIMIENTOS MECÁNICOS

El sistema motriz va montado en una bicicleta la cual está modificada mecánicamente para que los sensores de velocidad y esfuerzo; el motor y las tarjetas electrónicas del control se acoplen a ella.

Para la medición del esfuerzo de la persona al pedalear se dispone de un brazo mecánico construido en aluminio en el mismo que va acoplado el sensor de peso (galga en su celda de carga), siendo este el brazo del pedal derecho de la bicicleta al cual se lo flexiona cuando se ejerce fuerza en el pedal (al pedalear).

Todos los dispositivos mecánicos y electrónicos que forman parte del sistema motriz están diseñados para trabajar bajo condiciones físicas y ambientales variables puesto que los terrenos por donde se utiliza una bicicleta son por lo general irregulares, causan vibraciones y golpes que podrían desacoplar e

incluso dañar dichos dispositivos, además se tiene en cuenta que todo el sistema está expuesto directamente al ambiente por lo tanto este debe soportar cualquier factor ambiental sin interrumpir o alterar su función. En base a estos requerimientos se describe todas las partes mecánicas.

## 2.2 DISEÑO MECÁNICO

Para el diseño de las partes mecánicas construidas se toma en cuenta toda la forma y dimensiones de la bicicleta como sus componentes. El acople de estas partes debe ser exacto para no alterar la dinámica del vehículo ni provocar problemas al manejarlo, además no cambiar la estética.

### 2.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA BICICLETA

El modelo de la bicicleta es muy importante para el diseño del sistema motriz puesto que de esta depende la posibilidad de montaje del sistema; sensores, motor, batería y tarjetas electrónicas. Por esta razón y por la comodidad que debe ser brindada al usuario el modelo de bicicleta empleado es "Montañera", este tipo es el más utilizado actualmente alrededor de todo el mundo.

A continuación en la figura 2.2 se muestra el modelo básico de una bicicleta montañera y sus partes:

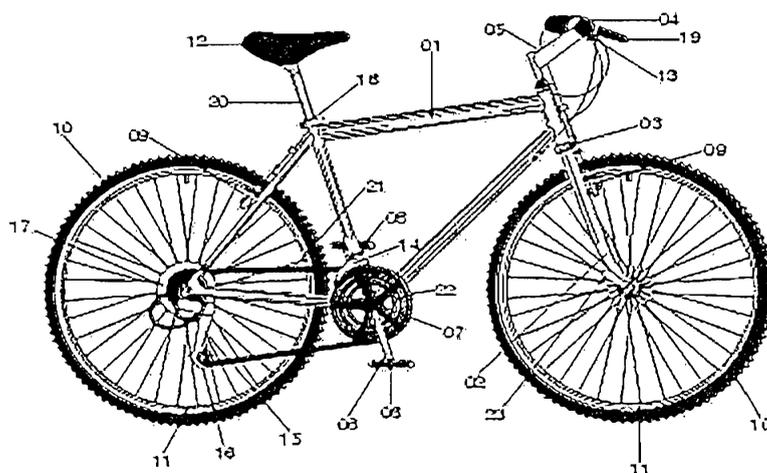


Figura 2.2 Bicicleta montañera y sus partes

1. Cuadro
2. Trínche
3. Pistas para movimiento del timón
4. Timón
5. Soporte del timón
6. Brazos o bielas
7. Eje central
8. Pedales
9. Frenos (delanteros / traseros)
10. Llantas
11. Aros
12. Asiento
13. Palancas de cambios
14. Desviador de cadena delantero
15. Desviador de cadena trasero
16. Protector de cambios
17. Protector de radios
18. Sujetador del tubo del asiento
19. Palancas de freno
20. Tubo de asiento
21. Cadena
22. Ruedas dentadas (catalina)
23. Sujetador rápido para rueda

### **2.2.1.1 CUADRO**

De las dimensiones del chasis de la bicicleta (figura 2.3) depende las dimensiones de los componentes electrónicos y mecánicos, a fin de no cambiar la dinámica y estética del vehículo. El cuadro de la bicicleta es el elemento básico a partir del cual se empieza el diseño y construcción de las partes mecánicas necesarias para el prototipo.

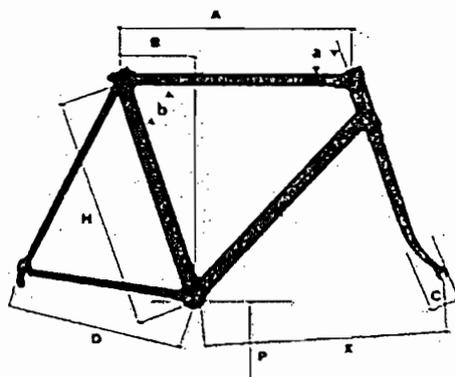


Figura 2.3 Cuadro de bicicleta

Dimensiones del cuadro de bicicleta montañera empleada para el proyecto (En negrillas):

Tabla 2.1 Medidas standard - centro - centro (centímetros)

H	A	b	B	X	A	D	P	C
47	50	74,15°	12,4	56,8	71°	40	27,8	4,5
48	51	74,30°	12,8	57,3	72°	40	27	4,5
49	51,5	74,30°	13,1	57,8	72,50°	40	27	4,5
50	52	74,30°	13,5	58	73°	40	26,8	4,5
51	52,5	74°	13,9	58,2	73°	40	26,5	4,5
<b>52</b>	<b>53,2</b>	<b>74°</b>	<b>14,3</b>	<b>58,2</b>	<b>73°</b>	<b>40</b>	<b>26,5</b>	<b>4,5</b>
53	54	74°	14,7	58,4	73°	40	26,5	4,5
54	54,5	73,45°	15,1	58,5	73,50°	40	26,5	4,5
55	55	73,45°	15,4	58,7	73,75°	40	26,5	4,5
56	56	73,30°	15,8	59,1	74°	40,5	26,5	4,5
57	56,5	73,30°	16,3	59,5	74,50°	40,5	26,5	4,5
58	57	73,15°	16,8	59,9	74,50°	40,5	26,8	4,5
59	57,2	73°	17,2	60,2	74,50°	40,5	26,8	4,5
60	58	73°	17,6	60,5	74,50°	40,5	27	4,5
61	58	73°	17,8	60,5	74,50°	40,5	27,2	4,5
62	59	73°	18,2	60,9	74,50°	41	27,5	4,5

### 2.2.1.2 BIELAS O BRAZOS

Son otra de las partes importantes para el sistema motriz, en estos se sensorará tanto la velocidad de pedaleo como el torque aplicado a ellos. Estas medidas son necesarias y primordiales para que el sistema funcione.

Existen básicamente dos tipos de brazos; los que están formados por una sola pieza y los que constan de tres piezas. Para el prototipo resulta conveniente utilizar los de tres piezas para tener mayor facilidad en el acople del sensor de torque y todos los dispositivos que forman parte en la medición de la variable. En la figura 2.4 se muestran las bielas de tipo tres piezas.

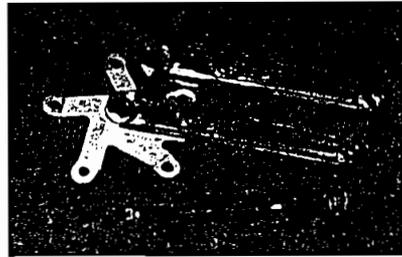


Figura 2.4 Biela de tres piezas

### 2.2.1.3 RUEDA DENTADA O CATALINA

Estas están disponibles desde una sola hasta tres acopladas, ya sea remachadas o empernadas formando un solo juego de piñones para el caso del sistema motriz solo es requerido dos ruedas dentadas una para llevar la cadena que arrastra la llanta trasera y la otra para ser arrastrada a través de una cadena por el moto-reductor. En la figura 2.5 se muestra tres ruedas dentadas unidas a una biela.



Figura 2.5 Ruedas dentadas y biela

## 2.2.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA CELDA DE CARGA

Basándose en la necesidad de la variable a medir, la forma de medir y donde se va a medir, de las pocas posibilidades de sensor torque se optó por el uso de una celda de carga.

Celdas de carga se tiene en diferentes modelos y formas dependiendo de la aplicación y más exactamente de la forma en que se desea medir la variable. En las bielas donde directamente se incide con el esfuerzo de la persona, la fuerza ejercida tiende a producir un torque por efecto de la distancia desde el punto de aplicación de la misma hasta el eje (figura 2.6).

El eje se opone al giro tendiendo a estar quieto a causa de la inercia de la carga hombre-bicicleta de esta forma se puede dar cuenta que esto se asemeja a la flexión de un brazo, de esto se concluye que la celda de carga tiene que ser aquella que sea útil para flexión manteniendo un punto fijo. El modelo de celda que permite hacer esto es la Unipunto.

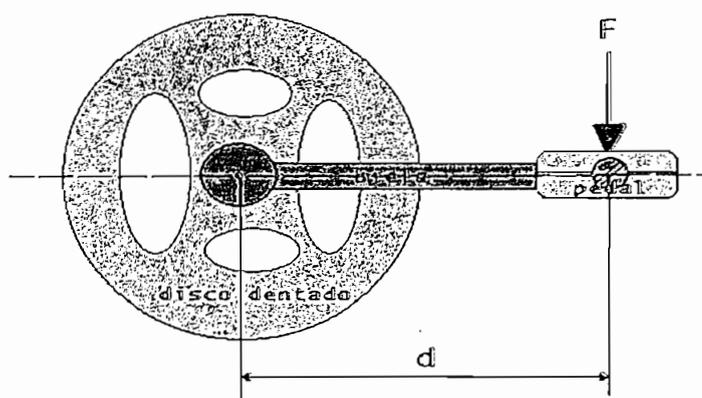


Figura 2.6 Sistema Biela – Disco dentado

El dimensionamiento de la capacidad de la galga conjunto con su celda de carga tiene que ver directamente con la fuerza-peso que una persona puede hacer sobre el pedal de una bicicleta, es decir, que el máximo peso que se puede aplicar sobre un pedal-biela es el de la persona mas un porcentaje debido al apoyo que se hace del timón. El peso promedio de una persona adulta es de

70Kg y oscila como máximo en 20kg, esto es para personas que no tiene demasiado exceso de peso<sup>[8]</sup>. Con este dato la capacidad de la celda sería 90Kg más un porcentaje de seguridad se toma un valor de 100kg siendo este además un valor standard de la capacidad de las celdas de carga.

Una vez escogido el tipo de celda y su capacidad, es importante también considerar las dimensiones de esta. Para esto se parte de las dimensiones de la biela donde se desea acoplar la celda. Las dimensiones de la biela se las representan en la figura 2.7.

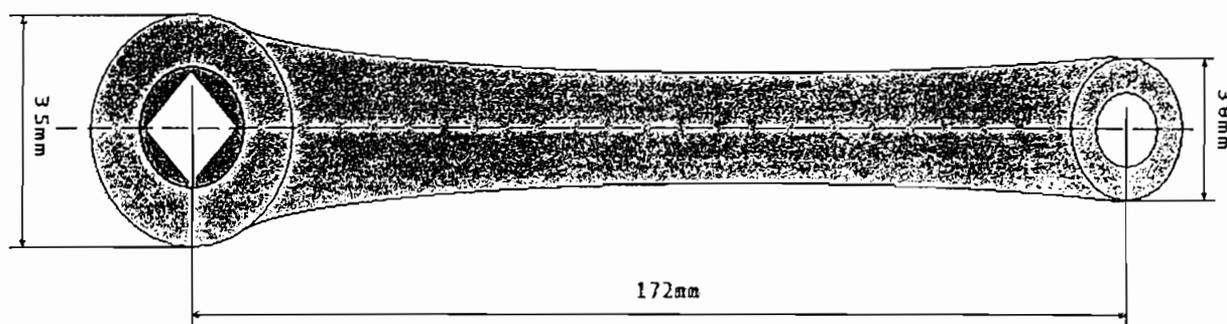
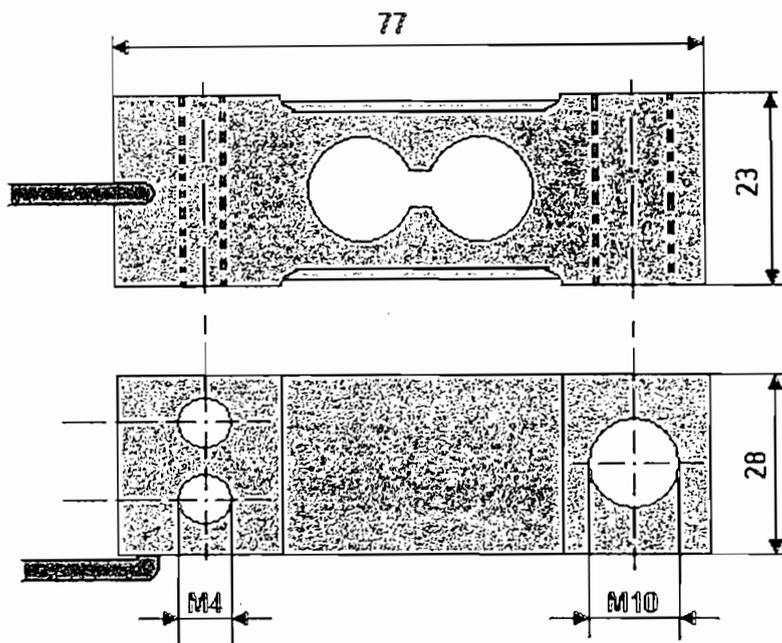


Figura 2.7 Dimensiones de la Biela

Según los datos del gráfico la longitud máxima de la celda que podría encajar en la biela sería de 140mm, considerando el espacio para que el brazo tenga los agujeros y pueda agarrar la celda, el ancho y espesor podrían ser similares y de aproximadamente 35mm para no cambiar mucho la estética del nuevo brazo. Estos valores de longitud, ancho y espesor están en el límite superior, si se superara estos se estaría cambiando las dimensiones standard de la biela, cabe subrayar que lo más importante es no alterar su longitud.

Las dimensiones de una de las celdas que cumple con los requerimientos, que se encuentra en el mercado, y que se la utiliza en el sistema motriz se muestran en la figura 2.8, (las medidas están en milímetros).



M4; Rosca milimétrica interna de 4mm de diámetro.  
 M10; Rosca milimétrica interna de 10mm de diámetro.

Figura 2.8 Dimensiones de la celda de carga <sup>[5]</sup>

### 2.2.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BRAZO MECÁNICO PARA REALIZAR LA MEDICIÓN DEL TORQUE

Las dimensiones de la biela original no son suficientes para acoplar en ella la celda de carga, tratar de hacerlo resulta muy complicado y no es confiable. Por esta razón se está en la obligación del diseño y construcción de un nuevo brazo en el que quede bien acoplado el sensor de esfuerzo.

Los requerimientos de la nueva biela construida son:

- Tener exactamente la misma longitud que la original, el ancho y grosor podrían variar puesto que no afectan más que en la estética de la bicicleta.
- El material utilizado es el aluminio, el cual tiene la suficiente dureza para que no sea este el que se deforme sino la celda, para evitar pérdidas y

tener una medida más exacta de la variable. El material es de buena calidad para que no se rompa o se doble.

- La celda debe quedar precisamente acoplada al brazo sin que exista "juego" entre ellos puesto que esto produce desgaste de las piezas y por ende su deterioro inmediato.
- Todo el brazo mecánico debe ser simétrico respecto al eje de rotación de las bielas.

Considerando las medidas exactas de la celda de carga y de la biela, el diseño más apropiado de las piezas que forman el brazo es el siguiente. En la figura 2.9 se indican los modelos de las piezas diseñadas y construidas.

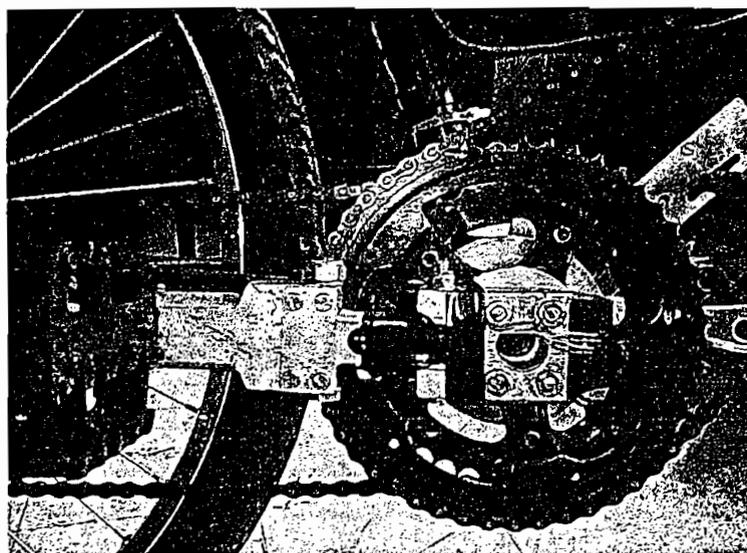


Figura 2.9 Piezas construidas para acoplar la Celda de Carga.

#### 2.2.4 CONSTRUCCIÓN DE ESCOBILLAS Y ANILLOS DESLIZANTES

La galga, su circuito de acondicionamiento necesita de cuatro líneas, dos para polarización y las otras dos para la señal de salida del sensor. La galga se encuentra girando indefinidamente con la biela por lo cual es imposible cruzar los cuatro alambres que llevan la señal y la polarización desde ésta hacia el lado del

cuadro de la bicicleta. Por esta razón se requiere del uso de escobillas y anillos deslizantes, los cuales no existen disponibles para la aplicación en el mercado, por lo tanto se realiza un diseño y construcción del sistema.

Las pieza que porta los anillos tiene que ser de un material aislante razón por la cual está construida de teflón; un material aislante, tenaz y resistente tanto a los golpes como a la temperatura. Los anillos están hechos de cobre y las escobillas de carbón; para un mejor contacto.

En la figura 2.10 se muestran las partes que comprenden el sistema de anillos deslizantes y escobillas.

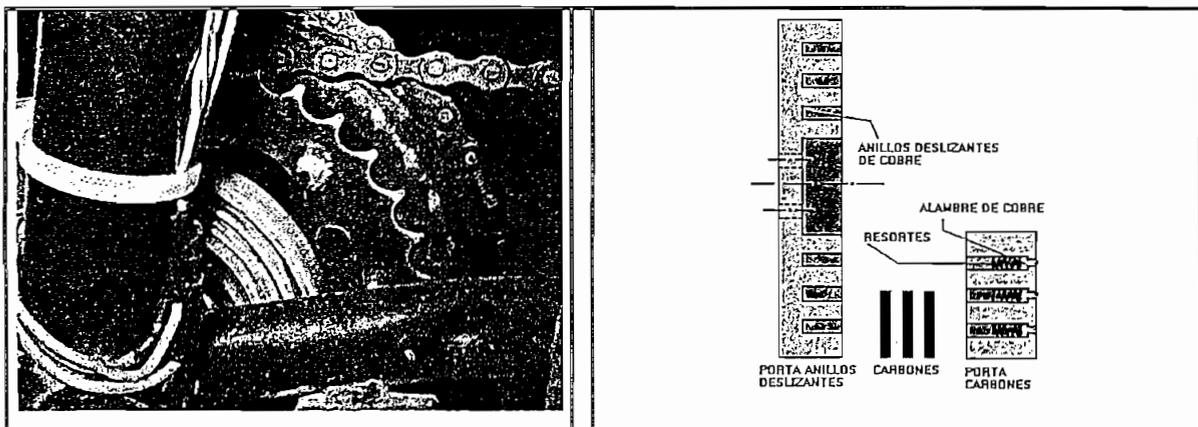


Figura 2.10 Anillos Deslizantes y Escobillas

### 2.2.5 DIMENSIONAMIENTO DE LA POTENCIA DEL MOTOR

El dimensionamiento de un motor tiene que ver directamente con los requerimientos de la carga, y más exactamente con la relación torque-velocidad ( $T$  vs  $W$ ). Para el caso de pedaleo en una bicicleta, la forma de la curva torque-velocidad, correspondiente a lo que se ejerce en la rueda dentada, tiene forma aproximada a la que se indica en la figura 2.11. En realidad la curva  $T$  vs  $W$  es diferente para cada usuario puesto que depende de la fuerza en sus piernas, el peso bicicleta-hombre y la pendiente que tiene el terreno donde se transita, sin embargo las diferentes curvas se parecen en su forma. El torque y la velocidad

son a los que se encuentra sometida la rueda dentada, además la relación  $T/W$  no es lineal.

El torque es máximo para velocidades que tienden a cero, no necesariamente en cero, esto depende de la cantidad de peso que hay que sacar de la inercia y mas aún de si se intenta arrancar o se esta pedaleando en una cuesta, el  $T$  va disminuyendo a medida que la velocidad aumenta y es prácticamente despreciable para las máximas velocidades que se pueden conseguir en la bicicleta, esto generalmente ocurre en bajadas.

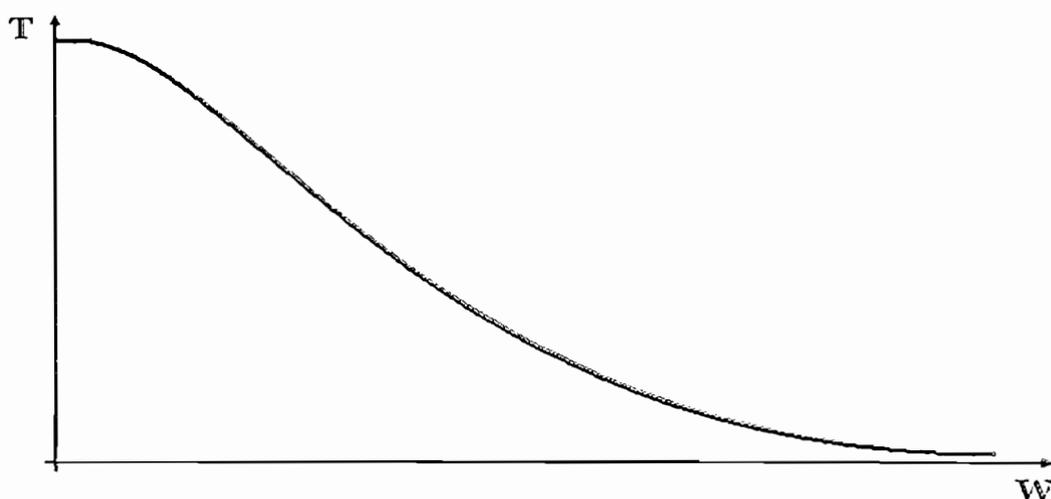


Figura 2.11 Curva  $T$  vs  $W$  (Rueda dentada)

En la figura anterior se muestra una de las posibilidades que puede tener la relación  $T$  vs  $W$ . El valor máximo de torque, diferente para cada usuario, puede irse desplazando a la derecha dependiendo de las características del ciclista y del terreno.

Para dimensionar la potencia del motor DC a utilizar, se toma en cuenta la capacidad máxima de la celda de carga lo cual se traduce en el torque máximo que se puede obtener, también se considera la velocidad a la que se pedalea para esto se obtienen valores en base a pruebas.

El máximo torque se consigue cuando el ángulo entre la fuerza aplicada al pedal y el vector distancia, desde el punto de aplicación de la fuerza al eje rotor, es de  $90^\circ$ . Durante el pedaleo esto ocurre una vez por ciclo y en un punto dado, el cual es prácticamente el mismo ya que depende de la arquitectura de la bicicleta.

De acuerdo a la figura 2.12 se hace el cálculo del máximo torque que se puede obtener en la rueda dentada (que va a ser arrastrada por el motor) producido por la fuerza humana:

El máximo peso que soporta la celda de carga es de 100Kg en el punto F2.

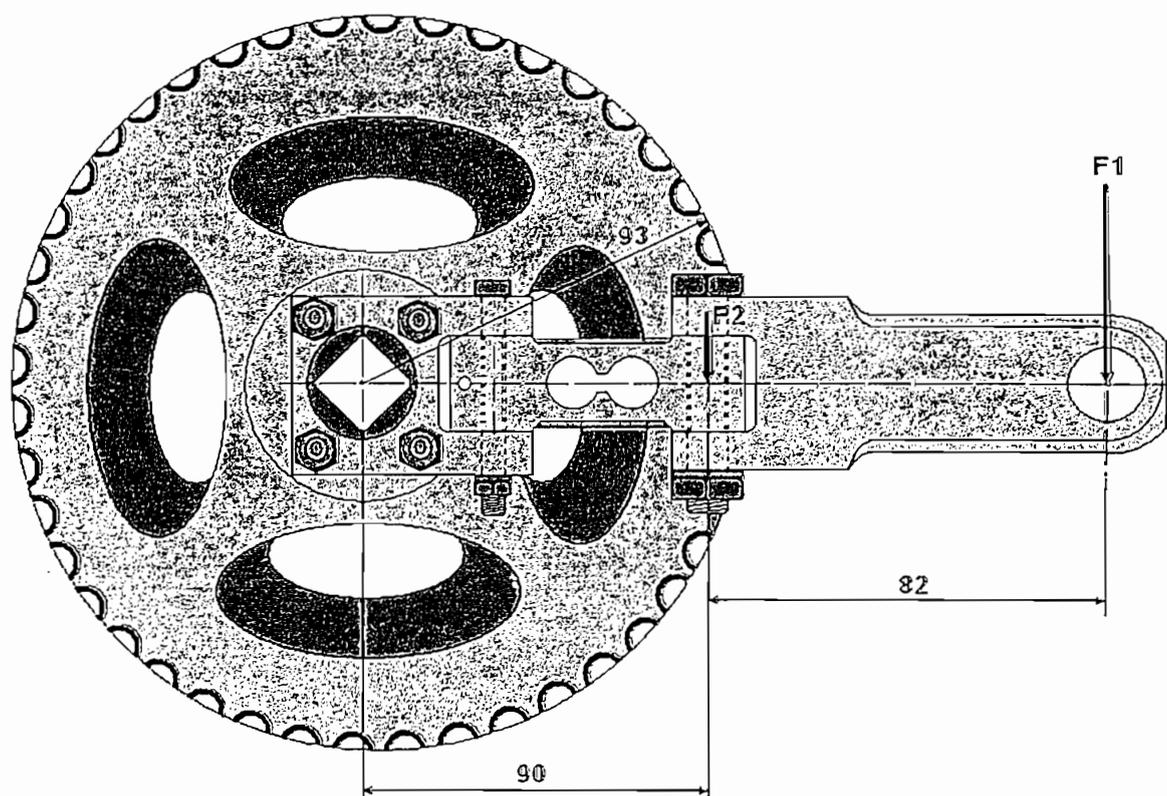


Figura 2.12 Conjunto Rueda dentada – Biela – Celda de Carga

Cuando el ángulo entre la fuerza y el vector distancia es  $90^\circ$ , la ecuación para el cálculo de torque es:

$$\tau = F * X$$

Donde la fuerza  $F$  viene dada en Newtons y la distancia  $X$  en metros

El valor de la fuerza F2 es:

$$F2 = m * g$$

Donde  $m$  es la masa aplicada en Kilogramos a la celda de carga y  $g$  la gravedad.

$$F2 = 100Kg * 9.8m/s^2$$

$$F2 = 980N$$

El torque correspondiente a F2 es:

$$\tau2 = F2 * X2$$

$$\tau2 = 980N * 90mm \frac{1m}{1000mm}$$

$$\tau2 = 88.2N.m$$

El torque calculado es el mismo a lo largo del brazo y en la rueda dentada (forman una misma pieza) puesto que se aplica una sola fuerza  $F1$  la cual si varia a lo largo de la biela dependiendo de la distancia al eje rotor. Por lo tanto se cumple:

$$\tau2 = \tau1 = \tau3$$

$\tau1$  Torque en el pedal

$\tau3$  Torque en la rueda dentada

Calculando la fuerza en los puntos de interés se obtiene:

$$F2 * X2 = F1 * X1 = F3 * X3$$

$$X1 = 172mm$$

$$X3 = 93mm$$

Con lo que se obtiene :

$$F1 = 512.8N$$

$$F3 = 948.4N$$

Lo importante de los cálculos hechos es el valor del torque máximo (de acuerdo a la capacidad de la celda) en la rueda dentada:

$$\tau = 88.2 \text{ N.m}$$

Una vez encontrado el torque máximo, el siguiente paso es ver a que velocidad ocurre o en que intervalo podría estar, ya que como se mencionó anteriormente el torque máximo puede darse a diferentes valores de velocidad cercanas a cero puesto que depende de factores como; fuerza del ciclista, peso ciclista-bicicleta y terreno (pendientes), los cuales son diferentes de un usuario a otro.

### 2.2.5.1 MEDICION DEL DOMINIO DE LA VELOCIDAD DE PEDALEO

#### 2.2.5.1.1 DETERMINACION DE LA MINIMA VELOCIDAD

Para determinar la velocidad mínima se toma en consideración dos aspectos importantes:

- En bajas velocidades el motor consume mucho de manera muy ineficiente, y
- Una velocidad relativamente baja (menor a la velocidad que una persona camina), es semejante a que la bicicleta no se mueva.

Se toma como velocidad mínima de la bicicleta  $5 \text{ Km/h}$ , (menor a la de una persona caminando), posteriormente se calcula el número de revoluciones que el ciclista debe realizar en los pedales, para lo cual se realizan los siguientes pasos:

- a. Se pasa la velocidad de la bicicleta, que es lo mismo de la llanta de atrás, de velocidad lineal a velocidad angular, para lo cual se toma el diámetro de dicha llanta (66 cm) para posteriormente sacar el perímetro:

$$\text{Perimetro} = \pi * D = 66 * \pi = 207.34 \text{ cm}$$

Con este perímetro se calcula la velocidad angular de la siguiente manera:

$$5 \frac{Km}{h} * \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ seg}} * \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ Km}} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} * \frac{1 \text{ rev}}{207.34 \text{ cm}} = \frac{0.67 \text{ rev}}{\text{seg}}$$

- b. Se pasa la velocidad de la llanta de atrás a la rueda dentada (catalina), para este cálculo se toma en cuenta el disco con el mayor número de dientes de la llanta de atrás, ahí la velocidad será la mínima, y con el número de dientes de la catalina, lo que se obtiene la relación de reducción de velocidad:

$$\text{Relación de dientes} = \frac{\text{Número de dientes catalina}}{\text{Número de dientes disco mayor llanta de atrás}}$$

$$\text{Relación de dientes} = \frac{38}{28}$$

$$\text{Relación de dientes} = 1.35$$

Con lo que la velocidad angular de la catalina será:

$$\text{Velocidad catalina} = \text{Velocidad disco de atrás} / 1.35$$

$$\text{Velocidad catalina} = \frac{0.67 \text{ rev/seg}}{1.35}$$

$$\text{Velocidad Disco de atrás} = 0.49 \text{ rev/seg}$$

Es decir la velocidad mínima a la que el motor eléctrico comenzara ayudar es de  $0.5 \text{ rev/seg}$ .

$$\frac{0.5 \text{ rev}}{\text{seg}} * \frac{2 \pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} = 3.14 \text{ rad/seg}$$

### 2.2.5.1.2 DETERMINACION DE LA MAXIMA VELOCIDAD

Para determinar la velocidad máxima, se procede de manera contraria al procedimiento para encontrar la velocidad mínima, aquí se considera:

- La capacidad de cualquier ciclista para realizar cierto número de revoluciones en un segundo,
- El ciclista realiza un esfuerzo el cual amerita que el motor complemente la fuerza muscular.

En base a prácticas realizadas se determina que  $1.2 \text{ rev/seg}$  es un valor acorde a lo que se espera obtener como resultado final, capaz de aprovechar al máximo la energía muscular.

La máxima velocidad angular en la catalina es:

$$1.2 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} * \frac{2 \pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} = 7.54 \text{ rad/seg}$$

Para determinar la velocidad máxima que alcanzaría la bicicleta con el motor encendido de debe pasar a la llanta de atrás, con el mismo criterio para la mínima velocidad, pero ahora con el disco con menor número de dientes, con el cual se obtendrá la máxima velocidad.

La relación de velocidades es:

$$\text{Relaciòn de dientes} = \frac{\text{Nùmero de dientes catalina}}{\text{Nùmero de dientes disco menor llanta de atras}}$$

$$\text{Relaciòn de dientes} = \frac{38}{14}$$

$$\text{Relaciòn de dientes} = 2.71$$

La velocidad angular de la llanta de atrás es:

$$\text{Velocidad Bicicleta} = 2.71 * \text{velocidad catalina}$$

$$\text{Velocidad Bicicleta} = 2.71 * 1.2 \text{ rev/seg}$$

$$\text{Velocidad Bicicleta} = 3.252 \text{ rad/seg}$$

La velocidad máxima de la bicicleta (hasta cuando ayuda el motor) será:

$$\frac{3.252 \text{ rev}}{\text{seg}} * \frac{207.34 \text{ cm}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{1 \text{ Km}}{1000 \text{ m}} * \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ hora}} = 25 \text{ Km/h}$$

Que es una velocidad en que una persona de condiciones físicas normales puede alcanzar en terrenos desfavorables (cuestas de pendientes no muy pronunciadas) y que amerite la ayuda del motor eléctrico.

#### 2.2.5.2 CALCULO DE LA POTENCIA

La velocidad promedio a la cual se produce el torque máximo en base a pruebas se obtiene a partir de medir el tiempo en que se demora en dar una vuelta completa del pedal. Este tiempo es de 2seg, calculando la velocidad en radianes por segundo se obtiene:

$$1 \text{ rev} \rightarrow 2 \text{ seg}$$

Se tiene que la velocidad es:

$$W = 0.5 \text{ rev/seg}$$

en radianes por segundo es:

$$W = 0.5 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}$$

$$W = \pi [\text{rad/seg}]$$

Con los valores "críticos" calculados de torque y la velocidad angular se calcula la potencia:

$$P = \tau * \omega$$

$$P = 88.2 Nm * \pi rad / seg$$

$$P = 277.1 W$$

En HP's se tiene de acuerdo a la equivalencia:

$$1 Hp \rightarrow 746 W$$

$$P \rightarrow 277.1 W$$

entonces :

$$P = 0.371 Hp$$

La potencia calculada es la máxima que puede una persona desarrollar en el pedaleo, pero como ya se mencionó el propósito es ayudar a pedalear al usuario proporcionándole una potencia adicional máxima igual al 50% de la que él produce. Con esta acotación se obtiene que la potencia del motor debe ser de:

$$P_{motor} = 0.5 * P_{max\_ciclista}$$

$$P_{motor} = 0.185 Hp$$

Sobredimensionando al motor para compensar las pérdidas eléctricas y mecánicas, y conseguir un valor de potencia existente en el mercado, finalmente se obtiene que el motor apropiado para cumplir el objetivo es de una potencia de:

$$P = \frac{1}{4} Hp$$

## 2.2.6 DIMENSIONAMIENTO DEL MOTO-REDUCTOR

Para la aplicación es muy importante el uso de un moto-reductor o caja reductora ya que el torque que proporciona directamente el motor a utilizar es bajo, además se requiere bajar la velocidad a niveles que el ciclista puede pedalear.

La máxima velocidad determinada (en los pedales) hasta la cual el ciclista puede esperar la ayuda del motor es de  $1.2 \text{ rev/seg}$  ( $72 \text{ rev/min}$ ).

La rueda dentada de mayor número de dientes (el disco más grande de las catalinas), el cual tiene 48 dientes, va arrastrada por un "racher" de 16 dientes, el cual esta acoplado a la salida de la caja reductora. Con lo cual la velocidad del "racher" y por lo tanto la salida de la caja reductora es:

$$\text{Velocidad Racher} = \text{Relación de dientes} * \text{velocidad}$$

$$\text{Velocidad Racher} = \frac{\text{Número de dientes catalina}}{\text{Número de dientes racher}} * \text{velocidad}$$

$$\text{Velocidad Racher} = \frac{48}{16} * 72 \text{ rev/min}$$

$$\text{Velocidad Racher} = 216 \text{ rev/min}$$

$$\text{Velocidad Racher} = \text{Velocidad Motor Reductor}$$

La velocidad del Motor de DC es de,  $3400 \text{ rev/min}$  por lo que la relación de acoplamiento (N) de la caja reductora será:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{N}$$

$$\frac{3400}{216} = 15.7 = \frac{1}{N}$$

Se toma  $N = 16$ , es decir la velocidad máxima del motor se reduce en  $1/16$ , pero se aumenta el Torque 16 veces.

Esta relación de acoplamiento se puede conseguir simplemente con dos piñones o engranes, pero esto conlleva a que uno sea muy pequeño y el otro demasiado grande, lo cual no es conveniente, ya que la caja reductora se haría muy robusta, por lo que la mejor opción es obtener esta relación de acoplamiento con cuatro piñones, acoplados en pares, se escoge esta manera ya que se dispone de 3 piñones con las siguientes características:

Un piñón de 37 dientes (que es la salida de la caja reductora) el cual está acoplado a uno de 9 dientes, es decir, para que el piñón de 37 dientes de una revolución completa el de 9 dientes debe dar 4.11 revoluciones, el piñón de 9 dientes gira en el mismo eje (a la misma velocidad angular) que un piñón de 43 dientes; el cual debe estar acoplado a otro piñón al cual estará conectado el eje del motor.

Como se desea una relación de acoplamiento de 16, la relación entre el piñón de 43 y el que se construyó es:

$$\frac{16}{4.11} = 3.89$$

Entonces el piñón que va acoplado al eje del motor, es de:

$$\frac{43}{3.89} = 11 \text{dientes}$$

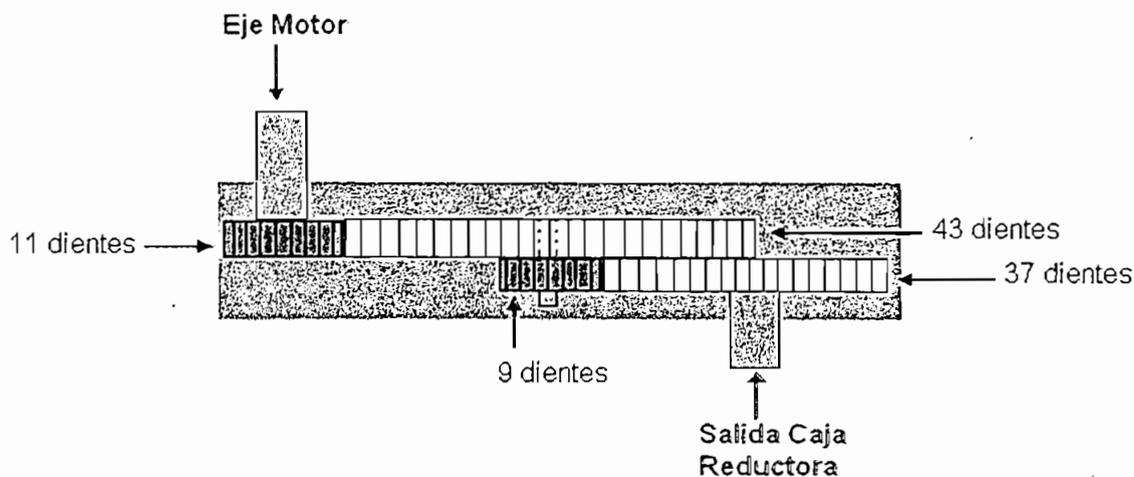


Figura 2.13 Caja Reductora

## 2.3 DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

El Diseño del hardware eléctrico y electrónico se la hace de la manera más simple y completa posible, que permita la ampliación en trabajos posteriores, como podría ser uso del cambio automático de marchas, lo que hará al sistema aun más eficiente.

El hardware esta constituido como equipo modular con el propósito que permita que se reemplacen algunos elementos sin problema, para lo cual se utilizan elementos que se encuentran en el mercado local.

Las características más importantes en lo que a hardware se refiere se presentan a continuación:

- La tarjeta electrónica principal básicamente esta formada por el elemento de control, que es un microcontrolador PIC, que es el encargado de medir la velocidad y esfuerzo del ciclista, para posteriormente activar al motor.
- El circuito de acondicionamiento de la celda de carga, que se realiza en base a un amplificador de instrumentación. Y del sensor magnético utilizado para medir la velocidad

- La tarjeta con las luces indicadoras, serán las encargadas de señalar las diferentes condiciones de trabajo.
- El circuito electrónico que indica la carga del motor (100,140 y 200 %)
- El circuito de fuerza, que será el encargado de activar al motor.

### 2.3.1 CIRCUITOS DEL SISTEMA

El sistema motriz esta formado básicamente por dos subsistemas; el electrónico y el eléctrico. La parte electrónica es todo lo que tiene que ver con el circuito de control, en este se tiene la unidad central de control en base a un microcontrolador PIC y sus periféricos como lo son entradas procedentes de sensores y salidas que actúan sobre la parte eléctrica o de potencia e indicadores. La parte eléctrica está conformada por los elementos de potencia que sirven para activar el moto-reductor. Los dos circuitos requieren tener su propia fuente de alimentación debido al problema que se puede dar por el consumo de corriente donde se vería afectado mayormente la parte de control.

Es importante que ambos circuitos estén aislados para no dañar la parte electrónica la cual es muy sensible cuando existen variaciones bruscas en el consumo de la parte de potencia.

El asilamiento de los circuitos de potencia y control se muestra básicamente en la figura 2.14.

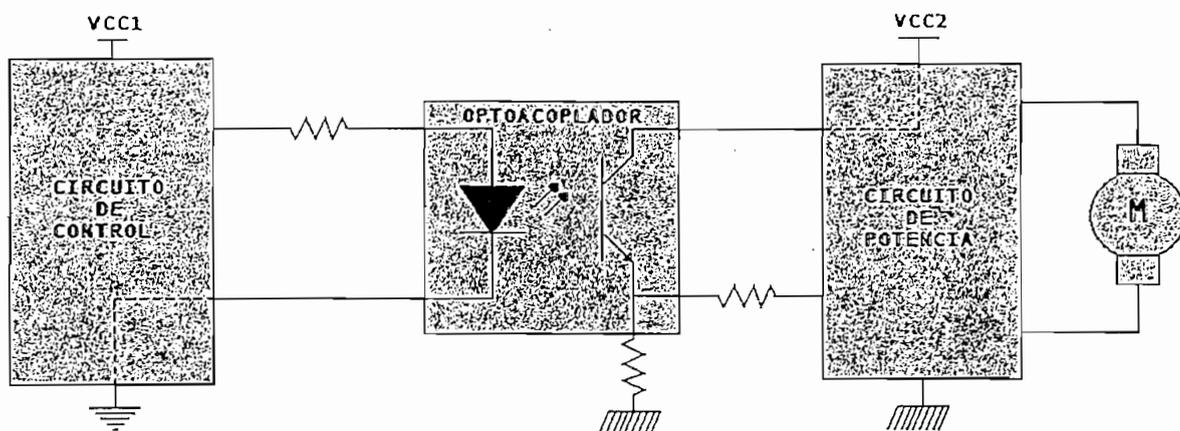


Figura 2.14 Aislamiento del Circuito de Control con el de Potencia

### 2.3.2 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

Como el cerebro del equipo, encargado de sensar el esfuerzo y velocidad del ciclista, para la posterior activación del motor; a la hora de escoger el microcontrolador a emplear hay que tener en cuenta una multitud de factores, como la documentación, herramientas de desarrollo disponibles y su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador (tipo de memoria de programa, número de temporizadores, interrupciones, etc.):

Antes de seleccionar un microcontrolador es imprescindible analizar los requisitos de la aplicación:

- *Procesamiento de datos:* Para la aplicación se debe asegurar de seleccionar un dispositivo suficientemente rápido para realizar la medición del esfuerzo, para poder decir "en tiempo real". Por otro lado, habrá que tener en cuenta la precisión de los datos a manejar: si no es suficiente con un microcontrolador de 8 bits, puede ser necesario acudir a microcontroladores de 16 ó 32 bits,

- *Entrada Salida:* Identificar la cantidad y tipo de señales a controlar para determinar el número de Entrada / Salida del sistema.

- *Consumo*: Es conveniente que el microcontrolador esté en estado de bajo consumo pero que despierte ante la activación de una señal (una interrupción) y ejecute el programa adecuado para procesarla.

- *Memoria*: para detectar las necesidades de memoria de la aplicación se debe separar en memoria volátil (RAM), memoria no volátil (ROM, EPROM, etc.) y memoria no volátil modificable (EEPROM).

- *Ancho de palabra*: el criterio de diseño debe ser seleccionar el microcontrolador de menor ancho de palabra que satisfaga los requerimientos de la aplicación. Usar un microcontrolador de 4 bits supondrá una reducción en los costes importante, mientras que uno de 8 bits puede ser el más adecuado si el ancho de los datos es de un byte. Los microcontroladores de 16 y 32 bits, debido a su elevado coste, deben reservarse para aplicaciones que requieran sus altas prestaciones (Entrada/Salida potente o espacio de direccionamiento muy elevado).

- *Diseño de la placa*: la selección de un microcontrolador concreto condicionará el diseño de la placa de circuitos. Debe tenerse en cuenta que quizá usar un microcontrolador barato encarezca el resto de componentes del diseño.

En base a estas consideraciones se utiliza un microcontrolador fabricado por Microchip, el PIC16F873, que por sus bondades y características satisfacen plenamente los requerimientos de diseño. A continuación se anotan las más importantes:

- Posee 3 puertos configurables como entradas y / o salidas digitales, para luces indicadoras, salida del PWM, etc. El puerto A puede ser configurado como entrada analógica, entrada del sensor de esfuerzo.
- No necesita elementos externos para su control.

- Es de fácil programación, posee un repertorio o set de instrucciones de tan solo 35 instrucciones de fácil entendimiento, de las cuales la mayoría se ejecutan en un solo ciclo de máquina.
- Posee memoria de programación de tipo CMOS FLASH, es decir permite gravar eléctricamente un indeterminado número de veces el microcontrolador con lo que las pruebas de funcionamiento del equipo no se limitan.
- Posee 192x8 bytes de RAM (memoria de datos) que solventa el requerimiento de medir el esfuerzo, configuración y manejo de periféricos, almacenamiento de valores de variables propias del programa.
- Posee 4Kx14 palabras de memoria de programa tipo FLASH (reprogramable eléctricamente) suficiente para desarrollar el software requerido por el equipo.

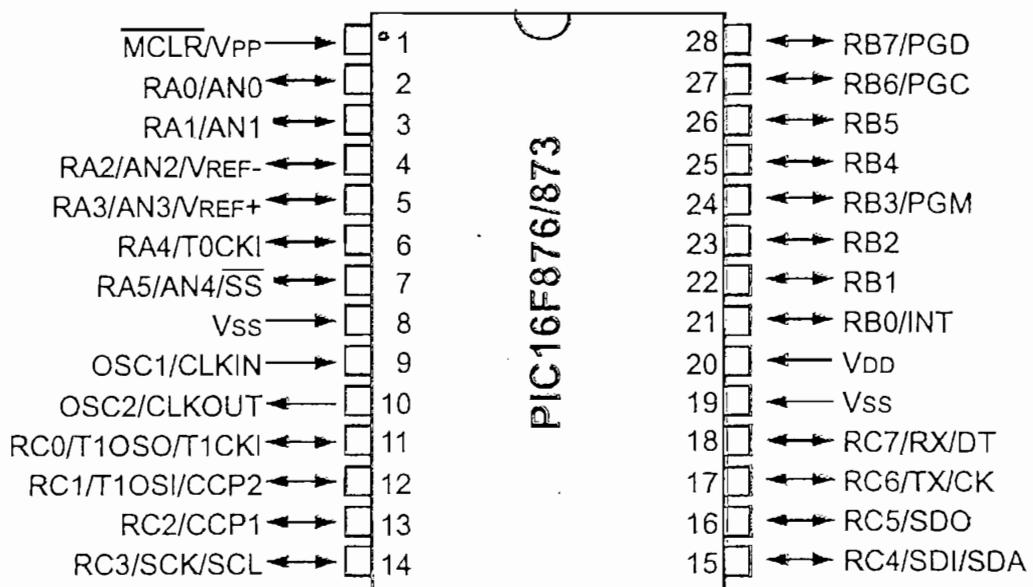


Figura 2.15 Distribución de Pines del Microcontrolador PIC16F873

A continuación se presenta la distribución de pines del microcontrolador y como ha sido empleado cada puerto:

Tabla 2.2 Distribución de Pines del microcontrolador PIC16F873

Pin N°	Símbolo	I/O	Descripción	Hardware (externo)
1	VPP	I	Reset	Reset
2	RA0/AN0	I	PUERTO A	Sensor de Esfuerzo
3	RA1/AN1	-		Sin uso
4	RA2/AN2	-		Sin uso
5	RA3/AN3	-		Sin uso
6	RA4/TOCKI	-		Sin uso
7	RA5/AN5	-		Sin uso
8	VSS	-	Tierra (GND 0VDC)	Tierra (GND 0VDC)
9	OSC1	-	Oscilador de Cristal	Oscilador de Cristal
10	OSC2	-	Oscilador de Cristal	Oscilador de Cristal
11	RC0	O	PUERTO C	Luz indicadora (On/Off)
12	RC1	-		Luz indicadora (Pedaleo < al mínimo)
13	RC2	O		PWM
14	RC3	O		Luz indicadora (carga 100%)
15	RC4	O		Luz indicadora (carga 140%)
16	RC5	O		Luz indicadora (carga 200%)
17	RC6	O		Luz indicadora (Pedaleo > al máximo)
18	RC7	O		Luz indicadora (batería baja)
19	VSS	-	Alimentación (5VDC)	Alimentación (5VDC)
20	VDD	-	Tierra (GND 0VDC)	Tierra (GND 0VDC)
21	RB0/INT	I	PUERTO B	Interrupción indica velocidad
22	RB1	I		Verifica Batería
23	RB2	-		Sin uso
24	RB3	I		Carga del Motor (100%)
25	RB4	I		Carga del Motor (140%)
26	RB5	I		Carga del Motor (200%)
27	RB6	-		Sin uso
28	RB7	I		ON / OFF

### 2.3.3 PARAMETROS ELECTRICOS DEL MOTOR

Una vez determinada la potencia del Motor de DC es importante conocer las características eléctricas y mecánicas del mismo, para conocer la Potencia y el Torque para diferentes valores de carga (corriente) y Voltaje de armadura (Alimentación)

#### 2.3.3.1 PROCEDIMIENTO

##### 2.3.3.1.1 PARÁMETROS ELÉCTRICOS

1. Únicamente trabajando con el devanado de inducido armar el circuito de la figura 2.16. indicado a continuación:

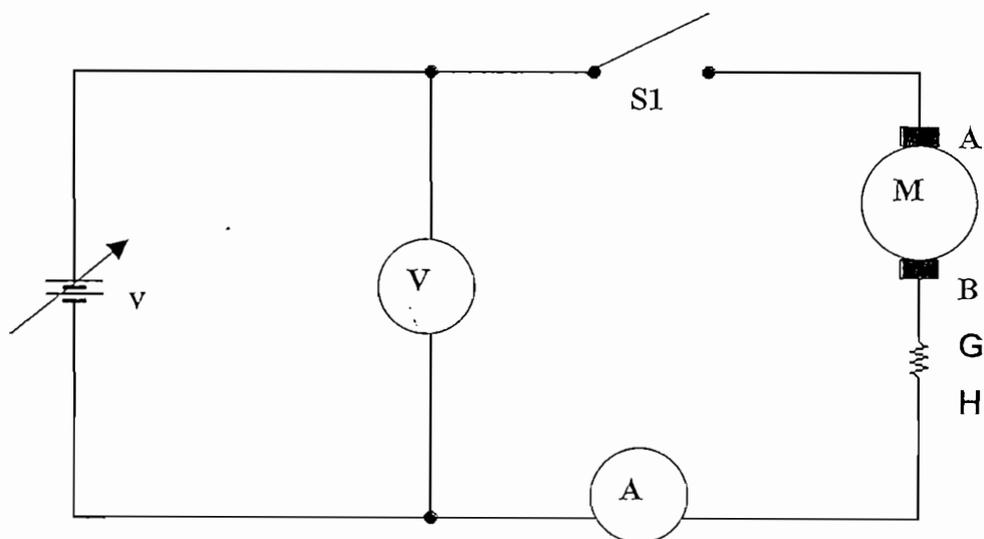


Figura 2.16. Circuito para determinar la resistencia interna del motor

Cerrar S1 y evitando que el motor presente tendencia de giro, tomar el valor de voltaje necesario para que la corriente que circule por el circuito sea la nominal.

**Prueba para determinar  $R_a$**

$$V = 2V$$

$$I = 3A$$

$$Ra = \frac{V}{I}$$

$$Ra = \frac{2V}{3A} = 0.67\Omega$$

2. Ahora se debe introducir una resistencia en el circuito (figura 2.17) para poder llevar la señal de corriente a un osciloscopio:

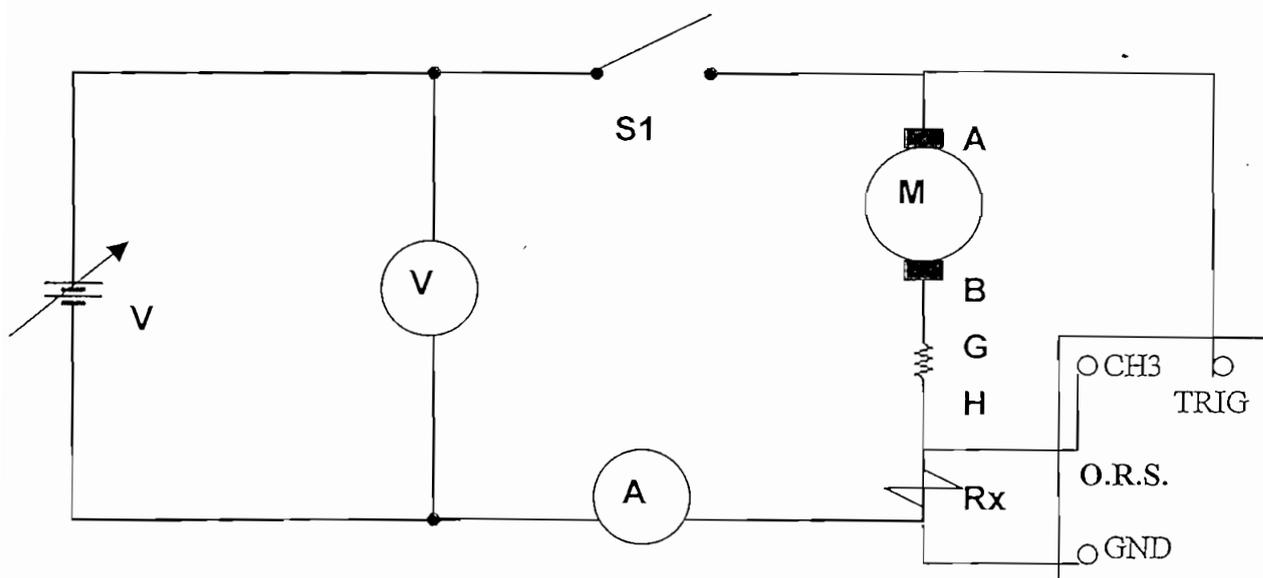


Figura 2.17 Circuito para determinar la inductancia del motor.

Se cierra S1 y se obtiene el oscilograma respectivo, asegurándose que la corriente de estado estable nuevamente corresponda a la nominal. A partir del amperímetro y del voltímetro se toma las medidas de estado estable.

A partir del oscilograma respectivo se determina el tiempo que le toma a la corriente alcanzar un valor igual al 50% de la corriente de estado estable:

### Prueba para determinar La

Grafico obtenido:

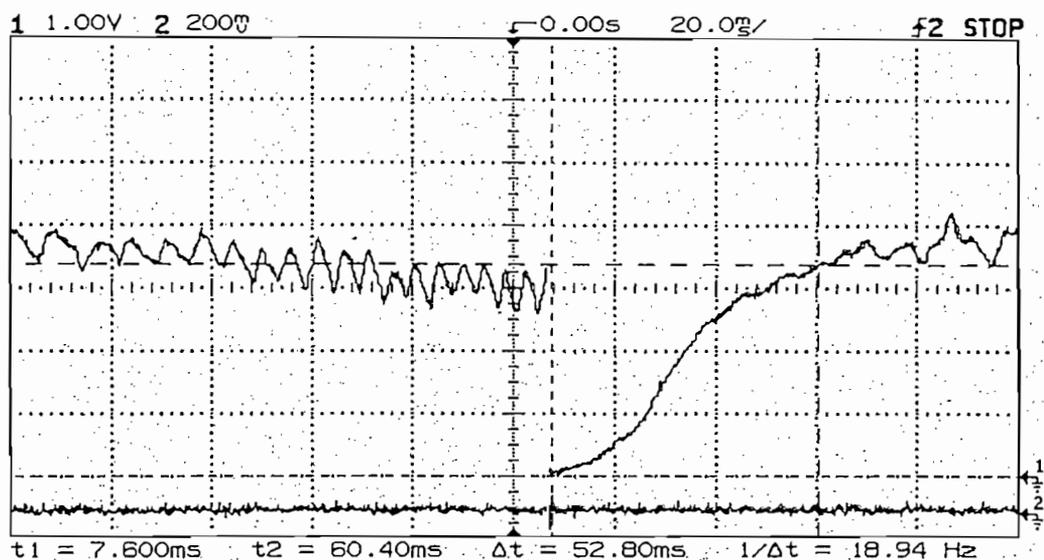


Figura 2.18 Respuesta de corriente del motor a una función paso.

$$L_a = \frac{(R_a + R_x) \cdot t_0}{\ln 2}$$

donde  $t_0$  es el tiempo que se demora el voltaje en subir al 50% del nominal

$$L_a = \frac{(0.667 + 0.45) \Omega \cdot 52.8 \text{ ms}}{\ln 2}$$

$$L_a = 58.96 \text{ mH}$$

### 2.3.3.1.2 PARÁMETROS MECÁNICOS

1. Obtener diferentes valores de velocidad y corriente de armadura, con los cuales se llena el siguiente cuadro de valores:

Tabla 2.3 Valores a Medir y Calcular para determinar B y Tf

MEDIR			CALCULAR		
Vt	Ia	n	Pm	$\omega$	Te
(V)	(A)	(rpm)	(W)	(rad/seg)	(Nm)

2. En base al circuito presentado en el punto anterior y preparando el osciloscopio para captar la señal de velocidad del motor, proseguir de la siguiente manera: Colocar a Rx a su máximo valor, cerrar S y llevar al motor a una cierta velocidad estable  $n_0$ ; cortocircuitar Rx y abrir S para

obtener el oscilograma respectivo. A partir de este oscilograma determinar el tiempo que le toma al grupo ir desde su velocidad inicial  $n_0$  hasta detenerse.

3. Determinar cuales son las condiciones nominales de trabajo.

### Determinación de B y Tf

Tabla 2.4 Valores Medidos

V(V)	I(A)	N(rpm)
3,66	1,09	600
4,64	1,35	880
5,61	1,69	1250
6,42	1,76	1460
6,76	2,19	1650
7,7	2,23	1800
8,21	2,43	2150
8,96	2,47	2250
10,11	2,55	2700
10,93	2,57	2850
12,89	2,65	3450

Con estos datos se realiza el cálculo de los siguientes parámetros  $P_m$ ,  $T_e$  y  $w$  con las siguientes relaciones:

$$P_m = I_a(V_t - I_a * R_a) [W]$$

$$w = n * \frac{2\pi}{60} \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

$$T_e = \frac{P_m}{w} [Nm]$$

Ejemplo de cálculo:

$$P_m = 1.09(3.66 - 1.09 * 0.667) [W]$$

$$P_m = 3.20 [W]$$

$$\omega = 600 * \frac{2\pi}{60} \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

$$\omega = 62.83 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

$$T_e = \frac{3.20}{62.83} [Nm]$$

$$T_e = 50.9 \times 10^{-3} [Nm]$$

Tabla 2.5 Valores Calculados

Pm (W)	w (rad/s)	Te (Nm)
3,20	62,83	0,0509
5,05	92,15	0,0548
7,58	130,90	0,0579
9,23	152,89	0,0604
11,61	172,78	0,0672
13,85	188,49	0,0735
16,01	225,14	0,0711
18,06	235,61	0,0767
21,44	282,74	0,0758
23,68	298,44	0,0794
29,47	361,27	0,0816

Realizando la regresión en base a un programa computacional se obtienen los siguientes datos

$$T_e = B\omega + T_f$$

$$T_e = 0.0001\omega + 0.044$$

$$B = 0.0001 \text{ Nms}$$

$$T_f = 0.044 \text{ Nm}$$

### Determinación de J

El tiempo en que la maquina completamente se detiene se puede observar en el siguiente gráfico:

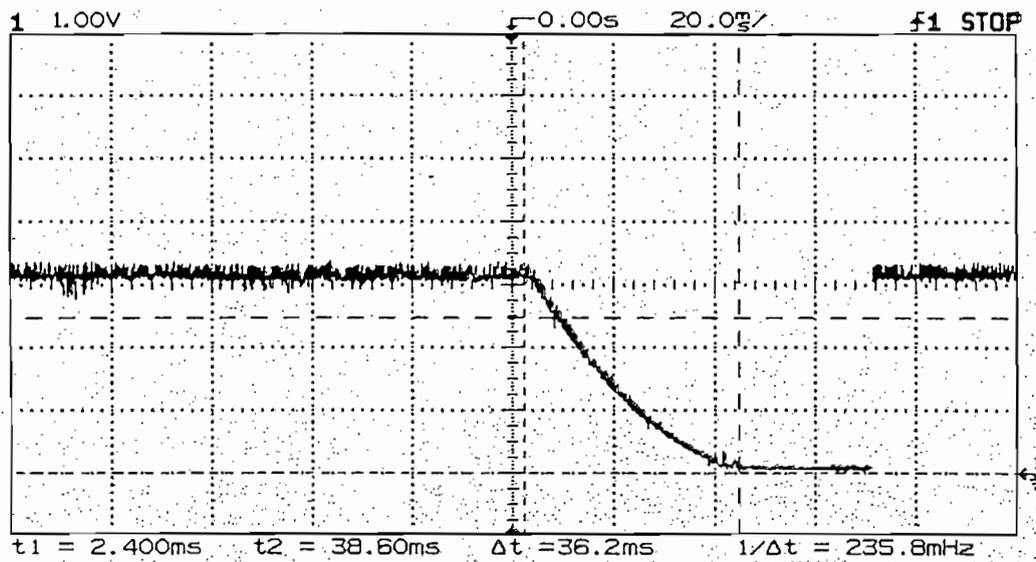


Figura 2.19. Tiempo de Inercia del motor.

Con lo que se obtiene:

$$J = \frac{Bt_0}{\ln \left[ \frac{W_0 + T_f / B}{T_f / B} \right]}$$

$$J = \frac{0.0001 \text{ Nms} * 36.2 \text{ ms}}{\ln \left[ \frac{3400 + 0.044 / 0.0001}{0.044 / 0.0001} \right]}$$

$$J = 1.67 \mu \text{ Nms}^3$$

Determinación de  $K_t$  ( $K_i$ ) y  $K_a$  ( $K_b$ )

$$K_t = \frac{V_{tn} - R_a \cdot I_a}{\omega}$$

$$K_t = \frac{13.8 - .667 * 3}{3400 * 3.141516 / 30}$$

$$K_t = 0.0331 \text{ V / rad / seg}$$

$$K_t = K_v$$

### 2.3.3.1.3 TIPO DE CONDUCCIÓN DEL MOTOR

Es importante saber si el motor trabaja en conducción continua o discontinua, en las peores condiciones del voltaje (PWM) que se le aplica a la armadura, lo deseable es que lo haga en forma continua para no tener pérdidas por calentamiento y tener un control eficiente. El voltaje y la corriente en la carga para este caso en particular nunca es cero, esto implica que bajo las condiciones de trabajo a las cuales estará sometido el motor se tiene conducción continua.

### 2.3.4 CIRCUITO ELECTRÓNICO

El circuito electrónico o de control está conformado por seis subcircuitos los cuales son:

- Circuito principal de control.
- Circuito de acondicionamiento de la señal procedente de la galga.
- Circuito de acondicionamiento de la señal procedente del sensor magnético.
- Circuito para sensar la carga eléctrica del motor.
- Circuito de acondicionamiento de la señal de control para el motor.
- Circuito para verificar el voltaje de la batería

#### 2.3.4.1 CIRCUITO PRINCIPAL DE CONTROL

El circuito de control tiene como elemento principal un microcontrolador PIC16F873, los mismos que necesitan de un circuito oscilador para su funcionamiento; el PIC16F873 es capaz de soportar hasta 20MHz de Frecuencia de operación. La conexión del oscilador de cristal recomendada por el fabricante e implementada en el diseño propone el uso de:

- Un oscilador de cristal de 4MHz el cual define la velocidad con que se ejecutarán las instrucciones dentro del microcontrolador.
- Dos capacitores de 15pF cada uno, para filtrar el ruido y garantizar el buen funcionamiento del oscilador y por ende del microcontrolador.

La conexión del cristal, el Reset (El PIC se resetea con CERO Lógico), así como las entradas y las salidas (Diodos indicadores y el PWM) con el microcontrolador se muestra a continuación:

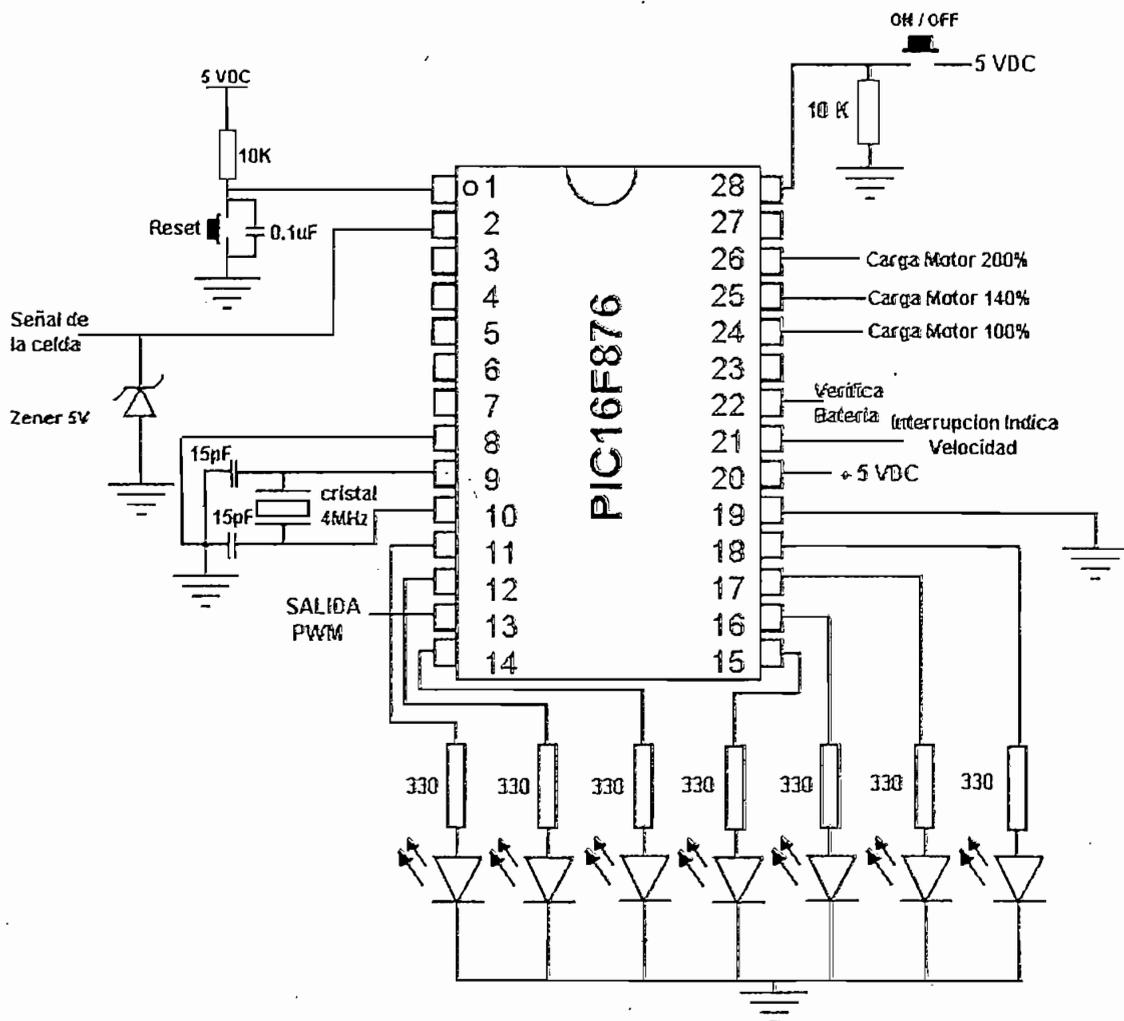


Figura 2.20 Circuito principal de Control con sus Periféricos

### 2.3.4.2 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PROCEDENTE DE LA GALGA

Para acondicionar la señal que proporciona la galga extensiométrica se parte de las características eléctricas que esta posee:

#### Características:

TIPO: Unipunto BBM23-100

CAPACIDAD: 100Kg

SENSIBILIDAD: 1mV/V

Según estas características, la galga proporciona un voltaje de 1mV cuando se la polariza con 1V y se le aplica 100kg de peso, que es su máxima capacidad.

En la celda de carga la galga forma parte de un puente de resistencias en el cual se tiene cuatro cables; dos que son polarización: positivo (rojo) y tierra (amarillo) y los otros dos son la salida: positivo (verde) y negativo (azul).

El puente de resistencias se polariza con 5V, con lo cual, a la máxima capacidad se obtiene la salida del sensor de 5mV. Pero esta señal debe ser amplificada 1000 veces para poder ingresar al PIC (5 V).

Como se explicó en la parte de diseño mecánico, los cuatro cables del sensor tienen que pasar por las escobillas-anillos deslizantes hasta el cuadro de la bicicleta, en esta parte se tiene problema con el ruido puesto que la señal del sensor es bastante pequeña (máximo 5mV) por esta razón se la amplifica antes de pasarla por ahí.

Se puede amplificar las 1000 veces en una sola etapa o se puede hacerlo en varias etapas en donde la ganancia total es igual al producto de las ganancias de cada etapa.

En el lado que se encuentra el pedal-biela-disco dentado va la etapa de amplificación con una ganancia de 1000 con los cual se consigue un voltaje máximo de 5V, ante este valor el ruido que se introduce en las escobillas es despreciable además que la señal se la filtra después de pasar por ahí consiguiéndose así atenuarlo, el circuito del filtro va junto al microcontrolador.

El acondicionamiento de la señal del sensor se lo hace en base a un integrado amplificador de instrumentación cuya identificación es AD627 de la fábrica Analog Devices.

El diagrama de pines se indica en la figura 2.21.

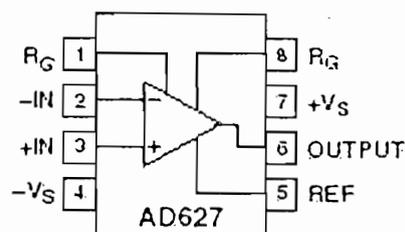


Figura 2.21 Amplificador de instrumentación AD627.

Las principales características del amplificador de instrumentación AD627 y su descripción, se muestran a continuación:

### CARACTERISTICAS

- Micropower, 85uA máxima fuente de corriente
- Ancho rango de fuente de voltaje (de +2.2 V a +18 V)
- Fácil de utilizar
- Ganancia seteada con una sola resistencia externa  $R_G$
- Rango de ganancia desde 5 (sin resistencia) hasta 1000

## APLICACIONES

- RTD'S
- Instrumentos médicos de bajo consumo
- Transductores de interfaces
- Amplificadores de termocuplas
- Control de procesos industriales
- Adquisición de datos
- Instrumentos alimentados por baterías portátiles
- Galgas extensiométricas

## DESCRIPCION

El AD627 es un integrado, micro poder, amplificador de instrumentación que entrega una salida variable, polarizado con una sola o doble fuente (desde +2.2V a +/-18V). El AD627 provee al usuario con excelentes especificaciones AC y DC y opera tan solo a un máximo de 85  $\mu$ A.

El AD627 ofrece mayor flexibilidad a los usuarios permitiéndolos colocar la ganancia del circuito tan solo con una resistencia externa; la configuración industrial es estándar de pines. Sin resistencia externa se tiene una ganancia de 5 y con ella se puede tener hasta 1000 de ganancia.

El AD627 además mantiene los errores de frecuencia a un mínimo a través de proveer un excelente CMRR.

La línea de ruido tan bien como la línea de armónicos, son rechazadas por el alto CMRR que es sobre los 200Hz. El AD627 provee una función superior, utiliza menos área en el tablero de un circuito.

El valor de la resistencia  $R_G$  se calcula en base a la ecuación:

$$Ganancia = 5 + \left( \frac{200K\Omega}{R_G} \right)$$

$$R_G = \frac{200K\Omega}{Ganancia - 5}$$

De acuerdo a la ecuación se obtiene los valores de  $R_G$ . El fabricante recomienda utilizar los valores expuestos en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Valores de  $R_G$  recomendados por el fabricante para varias ganancias

Ganancia Deseada	Valor de $R_G$ (Ohmios)	Ganancia Obtenida
5	$\infty$	5.00
6	200 k	6.00
7	100 k	7.00
8	68.1 k	7.94
9	51.1 k	8.91
10	40.2 k	9.98
15	20 k	15.00
20	13.7 k	19.60
25	10 k	25.00
30	8.06 k	29.81
40	5.76 k	39.72
50	4.53 k	49.15
60	3.65 k	59.79
70	3.09 k	69.72
80	2.67 k	79.91
90	2.37 k	89.39
100	2.1 k	100.24
200	1.05 k	195.48
500	412	490.44
1000	205	980.61

La conexión básica del AD627 para una sola fuente se muestra en la figura 2.22.

El capacitor colocado en el pín del positivo de la fuente, debe ser cerámico y del valor indicado, este capacitor es recomendado por el fabricante para tener un mejor resultado<sup>[9]</sup>.

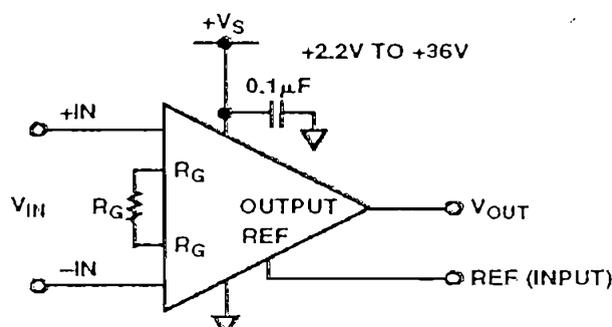


Figura 2.22 Conexión básica del AD627

Finalmente el circuito acondicionador de la señal procedente de la galga es el que se indica en la figura 2.23. En el diagrama se muestra todo circuito hasta cuando la señal se ingresa al microcontrolador.

El cálculo de la resistencia de ganancia  $R_G$ , se lo hace en base a la fórmula mostrada anteriormente. La ganancia deseada es de 1000 veces, para lo cual se tiene:

$$R_G = \frac{200K\Omega}{Ganancia - 5}$$

$$R_G = \frac{200K\Omega}{1000 - 5} = 201.005\Omega$$

Pero recomendado por el fabricante, de la Tabla 2.6 el valor de  $R_G$  es:

$$R_G = 205\Omega$$

El pín de referencia respecto al cual se mide la salida del amplificador de instrumentación, sirve además para colocar un voltaje de offset si es que es necesario, caso contrario es la referencia para la salida y se la puede unir a la tierra.

Con el capacitor de  $0.01\mu\text{F}$  se consigue estabilizar y aislar el voltaje de salida respecto a la referencia (tierra).

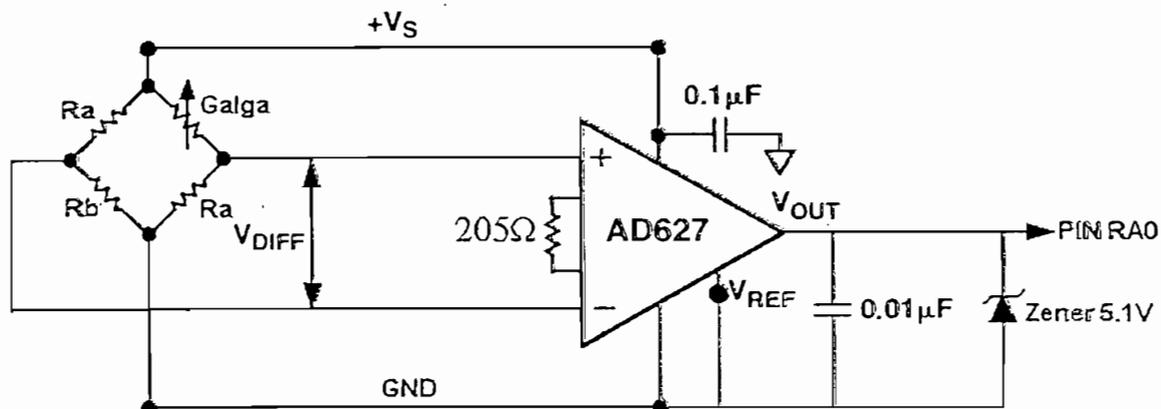


Figura 2.23 Circuito de acondicionamiento de la Celda de Carga

### 2.3.4.3 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL PROCEDENTE DEL SENSOR MAGNÉTICO

Como ya se mencionó en el primer capítulo, los sensores magnéticos conocidos como “magnéticos” que se utilizan ampliamente en sistemas de alarmas y en la robótica, funcionan básicamente como microwitches razón por la cual el acondicionamiento de esta señal ON/OFF proporcionada por el dispositivo es bastante sencillo y se la muestra en la siguiente figura 2.26.

El funcionamiento del magnético se basa en el cierre (normalmente abierto) o apertura (normalmente cerrado) de contactos debido a la variación del campo magnético que se genera en el extremo del sensor a causa del paso de un elemento ferromagnético lo suficientemente cerca de ellos.

Estos accesorios se componen de dos partes: una que es la que recibe el pulso eléctrico, la cual va colocada en el cuadro de la bicicleta y está conectada al control; y la otra es un imán que va colocado en el pedal\_biola y hace que la otra parte reciba un pulso eléctrico, cuando están cerca, el cual viene a ser el cierre de un switch. El pulso que es un 1 lógico se envía al microcontrolador PIC, el cual provocará una interrupción que da lugar al paro del conteo del tiempo que tarda el pedal en dar una vuelta completa, de esta manera se tendrá la velocidad

del pedal.

El Switch magnético es un actuador basado en el efecto magnético de un campo generado por un imán de tierra rara, que opera un contacto eléctrico al ser éste expuesto a sus líneas de fuerza (figura 2.24). El Switch está compuesto por un elemento sensor que contiene el contactor o relé y un Elemento Magnético que contiene el imán que proporciona las líneas de fuerza. Ambas partes son herméticamente selladas, lo que hace a este dispositivo un switch aplicable a ambientes muy agresivos y húmedos.

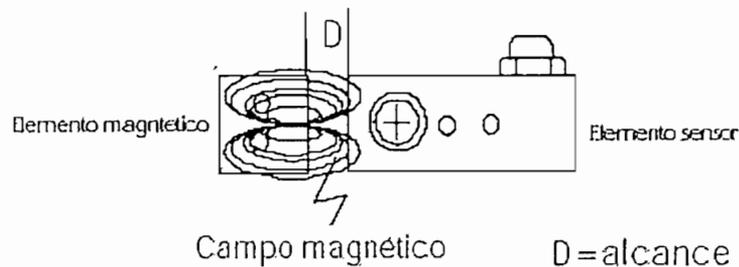


Figura 2.24 Campo generado por un imán

Este tipo de sensores se utilizan en:

- Puertas y escotillas.
- Límites de carrera.
- Posición de maquinaria.
- Apertura de Lamos.
- Robótica
- Conteo de revoluciones

Las características del sensor magnético empleado son:

Contacto: SPDT (Normalmente Abierto)

Potencia: 1.2mW 5-18VDC/VAC 6.6uAmp.

Material: Bronce Esmaltado Negro.

Elemento Magnético: Imán Permanente de Tierra Rara.

Conexión Eléctrica: 1/8" NPT.

Protección: NEMA 4X.

Alcance: 25mm montado sobre material no ferroso.

Temp. de Operación: - 10 a 80°C.

Respuesta: 1.6mseg.

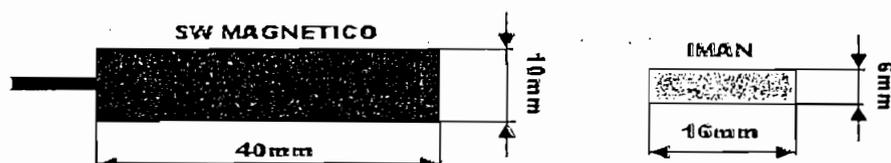


Figura 2.25 Dimensiones

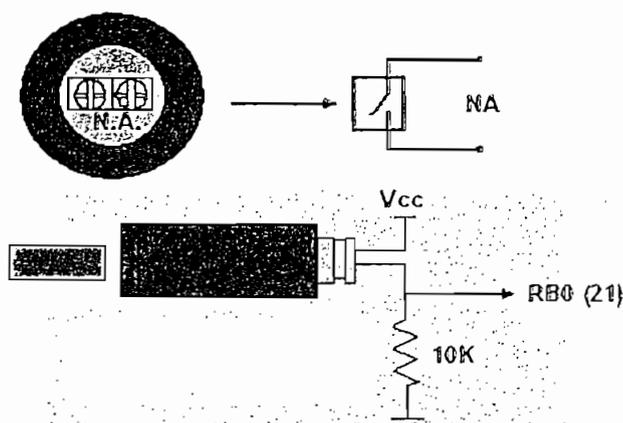


Figura 2.26 Circuito de acondicionamiento del switch magnético

#### 2.3.4.4 CIRCUITO PARA SENSAR LA CARGA ELÉCTRICA DEL MOTOR

Es importante tener en cuenta la carga del motor, para no forzarlo (sobrecargarlo) e incluso dañarlo, por esta razón se sensa la corriente del motor y se muestran mediante leds los niveles en los cuales está siendo cargado el motor.

Tres niveles de carga son mostrados, cuando el motor trabaja al 100%, 140% y al 200%, de su capacidad; lo ideal es que siempre se este trabajando a la carga nominal del motor, sin embargo se puede trabajar con sobrecarga pero en régimen intermitente. Por está razón se debe saber en cuanto se está

sobrecargando al motor para tomar la acción necesaria, apagándolo luego de un tiempo prudencial o inmediatamente, evitando que se quemé algún componente.

En sobrecarga se consume más energía de forma poco eficiente lo que produce un desgaste anormal tanto de las partes eléctricas como mecánicas.

Para sensar la corriente se lo hace en base a una resistencia externa colocada en serie al motor, el valor de dicha resistencia no puede ser cualquiera la misma depende del el valor de la resistencia de armadura  $R_a$ . La resistencia  $R_a$  se obtiene haciendo pruebas al motor (rotor bloqueado), el valor de  $R_a$  es de  $0.667\Omega$

La resistencia externa  $R_x$  para sensar la corriente tiene que ser mucho menor que la resistencia de armadura del motor. En términos de ingeniería mucho menor equivale a diez veces menor:

Por lo tanto se tiene que el valor de  $R_x$  es:

Cálculos:

$$R_x = \frac{R_a}{10}$$

$$R_x = \frac{0.667}{10}$$

$$R_x = 0.0667$$

La potencia que se va a disipar en  $R_x$  es:

$$P = VI$$

$$V = RI$$

$$V = 0.0667\Omega * 6A = 0.4V$$

$$P = 0.4V * 6A$$

$$P = 2.4W$$

La potencia disipada en  $R_x$  es considerable por esta razón se escoge una resistencia más pequeña.

La resistencia utilizada es:  $R_x = 0.005\Omega/5W$

Para amplificar el voltaje en la resistencia externa  $R_x$  se emplea el amplificador de instrumentación AD627, este es de entrada diferencial con lo cual se evitan problemas con la referencia y el ruido que induce el motor.

El circuito para determinar los niveles de carga funciona en base a comparadores y alimentado con la fuente del motor; esta fuente varía su voltaje bajando hasta un mínimo de 8.5V donde prácticamente esta descargada (las baterías de Pb ácido mantienen su autonomía entre 13.8V y 8.5V) implica que el voltaje en los comparadores baje en la misma proporción que la fuente pero la corriente a través de la resistencia  $R_x$  le produce el mismo efecto de caída de voltaje, esto vendría a dar una mala indicación de carga del motor en los leds puesto que se indicaría un nivel de carga estando por debajo del mismo.

Para solucionar tal problema se emplea un regulador del voltaje 7805 con el cual se garantiza siempre tener alimentado al circuito con 5V y se evita tener comparaciones erróneas.

Para aislar la fuente de potencia con la de control se emplea optoacopladores, el circuito que sensa la sobrecarga del motor se muestra en la figura 2.27.

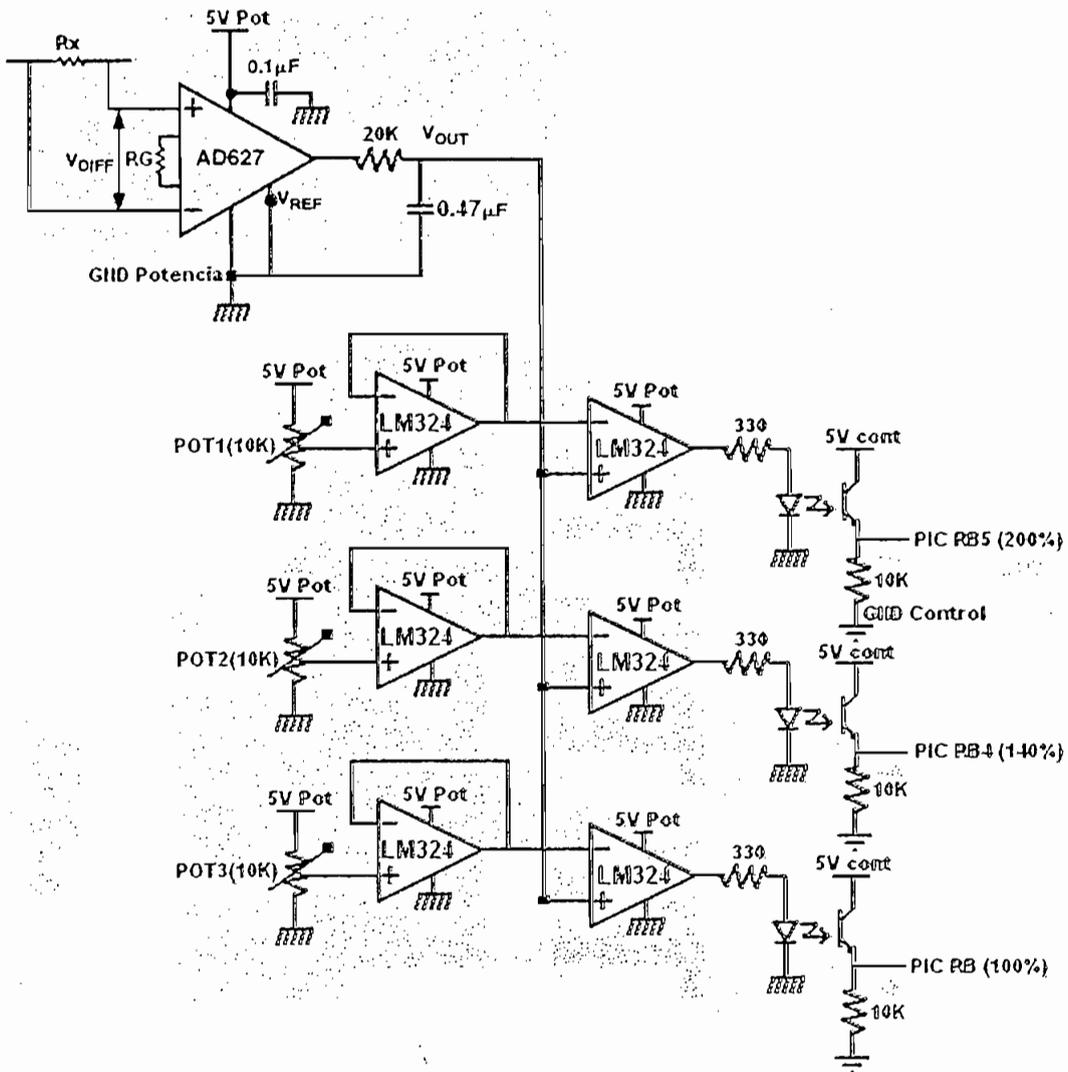


Figura 2.27. Circuitos comparadores para determinar la Carga del Motor

La salida del amplificador de instrumentación es filtrada con un filtro RC, debido a que la corriente del motor tiene rizado (picos de corriente) esto implica que los comparadores den una señal en alto (5V) antes de que se llegue al verdadero valor de corriente media ( $I_0$ ) a sensar que esta consumiendo el motor.

La ganancia del amplificador, la cual se obtiene con la resistencia  $R_G$ , depende del valor de  $R_x$  y de la corriente máxima de sobrecarga. El motor utilizado tiene una corriente nominal de 3A por lo tanto al 200% de sobrecarga la corriente será 6A.

$$V_{Rx} = 0.005\Omega * 6A$$

$$V_{Rx} = 0.03V$$

Si se desea que al 200% de sobrecarga el amplificador de 4V se tiene que la ganancia es:

$$Ganancia = 4V / 0.03V$$

$$Ganancia = 133.34$$

La ganancia más adecuada para sensar los tres niveles de carga es 134 veces por lo tanto  $R_G$  es:

$$R_G = \frac{200K\Omega}{Ganancia - 5}$$

$$R_G = \frac{200K\Omega}{134 - 5} = 1550\Omega$$

Los voltajes en  $R_x$  correspondientes al 100, 140 y 200% son:

$$V_{100\%} = 3A * 0.005\Omega = 0.015V$$

$$V_{140\%} = 4.2A * 0.005\Omega = 0.021V$$

$$V_{200\%} = 6A * 0.005\Omega = 0.03V$$

Esto implica que los voltajes (amplificados las 134 veces) a comparar en cada comparador son de:

- 2.01V para el 100%
- 2.81V para el 140%
- 4.02V para el 200%

Para conseguir estos voltajes en los comparadores, los potenciómetros deben estar colocados en los siguientes valores respecto a tierra:

$$\text{Potenciómetro 1} = 4.02K\Omega$$

$$\text{Potenciómetro 2} = 5.63K\Omega$$

$$\text{Potenciómetro 3} = 8.04K\Omega$$

### 2.3.4.5 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE CONTROL PARA MOTOR

El circuito consta de las siguientes etapas:

1. Circuito de "aislamiento" o protección
2. Circuito de Acoplamiento
3. Circuito de Disparo del Transistor de Potencia

#### 1. Circuito de "aislamiento" o protección

El circuito que separa el circuito de control (alimentación al PIC 5 VDC) y el de fuerza (alimentación al motor 12 VDC), se realiza básicamente con un optoacoplador, el cual separa las tierras de ambas fuentes para evitar que una sobrecorriente en el circuito de fuerza afecte al circuito de control.

Mediante la resistencia  $R_1$  se limita el paso de la corriente por el led del optoacoplador, considerando para el diseño que se requiere que circule una corriente de valor pico de 12mA, entonces  $R_1$  es:

$$R_1 = \frac{V_{pico\ PWM}}{I_{optoacoplador}} = \frac{5\ V}{12mA} = 416.66\ \Omega$$

$$R_1 = 470\ \Omega$$

La relación entre la Resistencia  $R_2$  y  $R_3$  debe ser un valor suficientemente grande para que toda la corriente vaya hacia el transistor de potencia y no a tierra, es decir si:

$$R_3 = 1000\ \Omega$$

$$\text{Entonces } R_2 = 100\ K\Omega$$

## 2. Circuito de Acoplamiento

Para mantener el mismo nivel de voltaje del emisor del transistor del optoacoplador (salida resistencia de  $1K\Omega$ ) y la base del transistor de potencia se coloca un seguidor de tensión para evitar una caída de voltaje y corriente por la diferencia de impedancias.

## 3. Circuito de Disparo del Transistor de Potencia

Una vez aislados los circuitos se procede a amplificar la corriente que atraviesa por el transistor del opto y la resistencia de  $1K$  ( $12mA$ ) con el fin de disparar a un transistor de potencia como lo es el Motorota 8744 el cual se dispara con una corriente de  $30mA$ .

La corriente que debe soportar el transistor de potencia es la corriente máxima que el motor estará en condiciones de soportar, es decir el 200% de su corriente Nominal:

$$I_{transistor} = 2 * I_{NOMINAL}$$

$$I_{transistor} = 2 * 3 A$$

$$I_{transistor} = 6A$$

El transistor de potencia Motorota 8744 soporta una corriente de 8 amperios.

La parte de amplificación de la corriente para disparar al transistor de potencia consta de una configuración Darlington en base a dos transistores de señal 3904 que amplifica la corriente a casi el doble de lo que necesita el transistor 8744 pero con una resistencia de  $100\Omega$  el problema se soluciona, disparándose sin ningún problema al transistor de potencia.

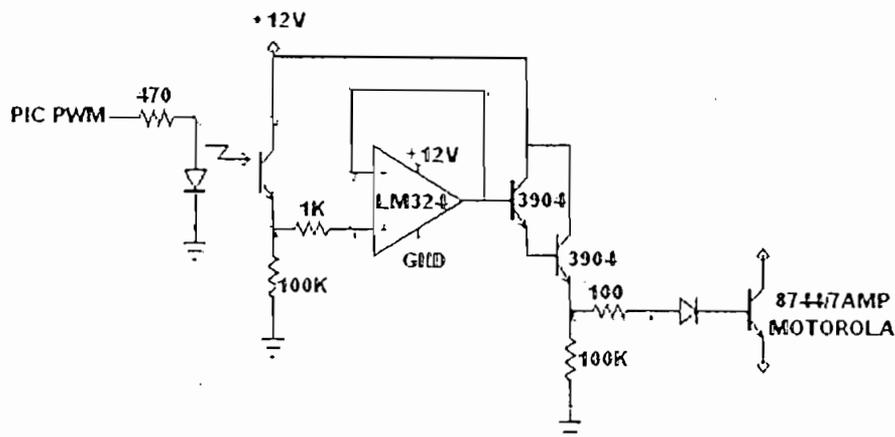


Figura 2.28 Circuito de aislamiento, acoplamiento y disparo del Transistor de Potencia

Ahora se tiene un PWM de 12 VDC capaz de alimentar al Motor, como no se tiene un voltaje constante sino uno cuadrado con ancho de pulso variable se debe asegurar que el motor esté trabajando en conducción continua para que el mismo no se vea afectado en su vida útil a causa de la ausencia de corriente (conducción discontinua). Como se mencionó anteriormente el motor a emplear en el sistema motriz si trabaja en condición continua para las condiciones a las que se va a someter.

### 2.3.5 CIRCUITO ELECTRICO

El circuito eléctrico del sistema motriz tiene que ver con la parte de potencia y mayor consumo de energía como los son: elementos de potencia, motor y además su fuente de alimentación. En temas anteriores en este capítulo ya se trato de manera concreta lo que tiene que ver con la parte de potencia, es decir con el manejo de la señal para alimentar al motor y las características eléctricas del mismo.

Ahora se va a concentrar principalmente con lo que tiene que ver con las fuentes de alimentación tanto de la parte de potencia como la de control.

### 2.3.5.1 CIRCUITO DE POTENCIA

El motor empleado es de excitación independiente, el control de velocidad se realiza variando el voltaje de armadura, para la variación de este voltaje se utiliza un Chopper reductor.

Si la frecuencia de apertura y cierre del transistor de potencia esta en el orden de los kilohercios, el motor que esta siendo alimentado verá en su armadura una señal continua debido a que este no responde tan rápido ante un voltaje variable como lo es un PWM. La frecuencia a la que se switchea es de 4KHz, suficiente para que el motor no lo note y esta es menor a la frecuencia nominal del transistor de potencia (Para el 8744 es 300KHz).

El circuito de potencia para alimentar al motor es el de la figura 2.29.

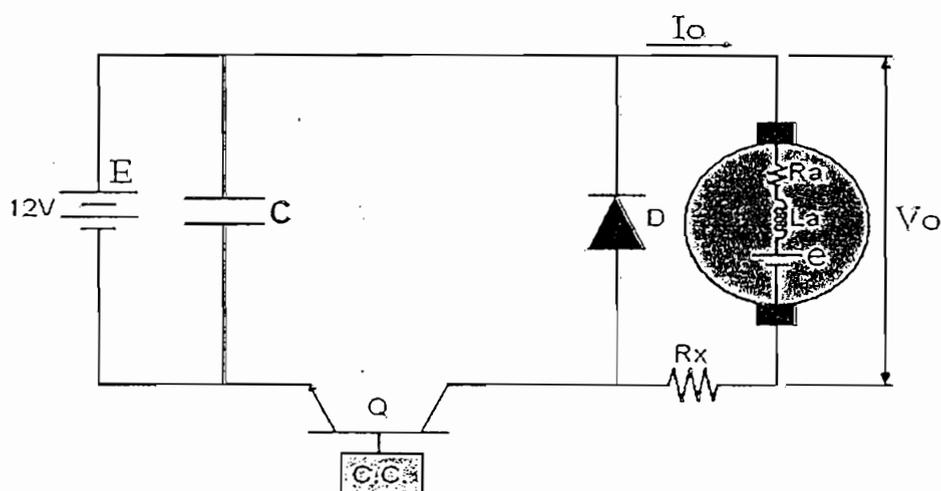


Figura 2.29 Circuito de potencia (Chopper reductor)

El diodo dispuesto en inverso paralelo al motor es importante para proveer un camino a la corriente almacenada en la inductancia del motor cuando el transistor de potencia no esta conduciendo. La resistencia  $R_x$  esta colocada entre el motor y el diodo para poder sensar la corriente que siempre esta circulando por la carga. El transistor de potencia debe tener su emisor referido a tierra de la fuente para poder dispararse sin ningún problema.

Es indispensable colocar un filtro de entrada para proteger a la fuente, en este caso se dispone de un capacitor el mismo que tiende a mantener constante el voltaje en la batería evitando así disminuir su vida útil por las bruscas y considerables variaciones de voltaje.

Es prácticamente imposible hacer que el capacitor filtre totalmente las variaciones de voltaje (rizado) hacia la fuente pero se puede conseguir un rizado adecuado y que no afecte mayormente a la batería. A continuación se realiza el diseño del capacitor:

El capacitor a la salida de la batería debe mantener constante el voltaje de salida y además de limitar el voltaje de rizo.

Para el cálculo del capacitor se toma en cuenta la Resistencia Equivalente en Serie, la Inductancia Equivalente en Serie, y la corriente de salida en la carga, lo que determina el voltaje rizo pico-pico en el voltaje de salida.

Para Conducción Continua, que es este caso, el valor del capacitor de salida se determina de la siguiente forma<sup>[10]</sup>:

$$C \geq \frac{I_o(max) * Dmax}{f_s * \Delta V_o},$$

Donde:

$I_o(max)$ : corriente de salida máxima;

$D(max)$ : ciclo de trabajo máximo;

$F_s$ : frecuencia de conmutación;

$\Delta V_o$ : voltaje rizo pico-pico en la salida;

Con lo que se tiene:

$$C \geq \frac{6 A * 1}{4000 Hz * 1V}$$

$$C \geq 1500 \mu F$$

Tomando un valor estándar  $C = 2200 \mu F$  y **16 V**

### 2.3.6 ALIMENTACIÓN DE LOS CIRCUITOS

Para el sistema motriz implementado en la bicicleta la forma de alimentar sus circuitos es en base a acumuladores de energía, como lo son las baterías eléctricas. Es importante tener conocimiento de las baterías antes de adquirirlas, en el primer capítulo se presenta las características, ventajas y desventajas de los tipos de baterías más utilizados. A continuación se hace un recuento general acerca de la batería.

Las baterías tienen los siguientes objetivos:

1. Suministrar potencia instantánea o en todo momento. Voltaje y corriente.
2. Mantener un nivel de tensión estable: El acumulador proporciona un voltaje estable y constante.

Todas las baterías pueden ser definidas mediante unas características comunes que se consideran seguidamente:

- Resistencia interna.- Formada por la resistencia óhmica de sus componentes (terminales, electrodos, soportes y electrolito) y por una resistencia virtual variable en función del estado de carga y de las distintas polarizaciones y concentraciones. Aumenta con las bajas temperaturas, con la descarga de la batería y con el envejecimiento.

- Rendimiento.- Es la relación entre la energía suministrada durante la descarga y la que se necesita para cargar plenamente la batería. Las pérdidas en una batería se deben sobretodo a una producción de energía calorífica en los procesos químicos que tienen lugar durante la carga y descarga.
- Velocidad de carga y descarga. - Las corrientes de carga y descarga a menudo se especifican con unos términos que indican la descarga completa en un período continuo de una hora.
- Vida útil. - La vida útil de una batería no se mide en años, sino por la cantidad de ciclos de carga - descarga que es capaz de realizar. Así, si se la somete a un régimen de trabajo de muchos ciclos diarios, probablemente sólo durará unos meses, mientras que si el régimen es de un ciclo al día o incluso más lento (como ocurre en el caso de iluminación de viviendas con energía solar) la batería puede durar al menos diez años.
- Además de los ciclos de carga - descarga, también hay que considerar la profundidad de la descarga media que se produce en cada uno de ellos. Si dicha descarga es moderada, y sólo de vez en cuando se alcanza una profundidad elevada, el número de ciclos que soportará la batería será elevado. A medida que se la someta a descargas más profundas, el número de ciclos que podrá realizar, y por tanto su vida útil, irá disminuyendo.

Con una idea general de la batería es claro la necesidad de utilizarlas para esta aplicación. Profundizando más en lo que es la alimentación para los circuitos del sistema motriz se ve la necesidad de utilizar dos baterías, siendo una para alimentar el motor y la otra para alimentar el circuito de control.

La principal razón por la cual se utilizan dos baterías independientes y aisladas entre sí, es por cuando el motor esta trabajando a su carga nominal y mas aún en

sobrecarga en la batería se produce variaciones de voltaje, corriente y por ende potencia que pueden afectar al microcontrolador el cual es muy delicado.

La forma como están aisladas las baterías es mediante aptoacopladores, en el grafico 2.30 se muestra básicamente como los circuitos están alimentados y aislados.

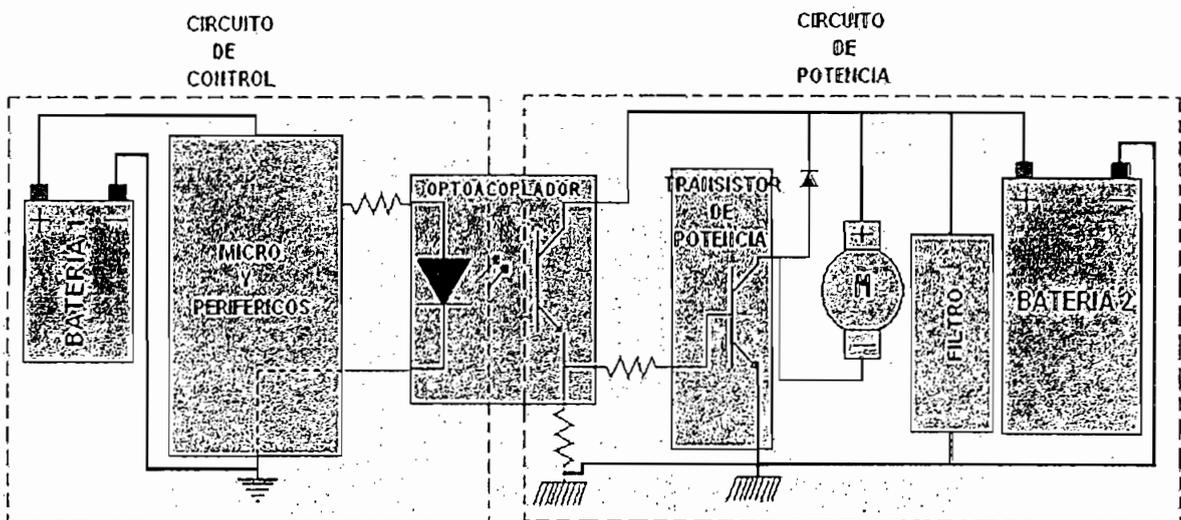


Figura 2.30 Circuito de Aislamiento entre la batería de Control y Potencia

Los circuitos que están alimentados con la batería 1 son:

- El microprocesador y sus periféricos I/O (Circuito principal de control).
- Circuito de acondicionamiento de la señal procedente de la galga.
- Circuito de acondicionamiento de la señal procedente del sensor magnético.
- Parte del circuito para detectar el estado de la batería, el transistor del opto.
- Parte del circuito para sensar la carga eléctrica del motor, los transistores de los optos.

Los circuitos y elementos que están alimentados con la batería 2 son:

- Motor eléctrico

- Circuito de acondicionamiento de la señal de control para motor, después del opto.
- Circuito para detectar el estado de la batería, hasta antes del opto.
- Circuito para sensar la carga eléctrica del motor, hasta antes de los optos.

### 2.3.6.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERIA

Basados en la preservación del medio ambiente las baterías recargables son una forma de energía limpia. Como se analizó anteriormente el sistema total requiere de dos baterías, las cuales se pretende dimensionar de tal forma que sean lo más adecuadas para la aplicación tanto para el sistema de control como para alimentar al motor durante el mayor tiempo posible.

Para poder seleccionar cada batería se parte de analizar cada uno de los parámetros eléctricos que estas poseen:

#### **Voltaje:**

*Para la batería del circuito de control:*

El voltaje que requiere la carga, que son los cinco circuitos a los que se alimenta, es de 5V. Las baterías existentes en el mercado vienen dadas en voltajes standard y dependiendo del tipo hay unas que varían de 1.2V en 1.2V, siendo así este caso se tiene que el voltaje de la batería requerida debe ser de **9V o 12V**.

Para obtener los 5V requeridos por la carga se emplea un regulador de voltaje cuya enumeración es 7805 y dos capacitores de 0.1uF y 0.22uF.

*Para la batería del circuito de potencia (motor):*

Lo más importante a tener en cuenta es el motor, el resto de los circuitos que se alimentan de esta fuente son prácticamente despreciables en comparación a la carga que significa el motor.

Para seleccionar el voltaje del motor y por ende el de la batería hay algunos aspectos a considerar como lo son: Voltaje-corriente-tamaño-peso en relación a una misma potencia del motor y capacidad de la batería.

El motor empleado trabaja con un voltaje de 12V para lo cual si existen baterías de **12V**.

### **Capacidad de corriente Amperios-Hora (Ah)**

Para la selección de este parámetro se considera el consumo de corriente por parte de la carga en las condiciones nominales o peores (mayor consumo), en las cuales con más frecuencia se va a encontrar el sistema. Y el tiempo durante el cual se desea trabajar bajo estas condiciones.

*Para la batería del circuito de control:*

En este caso se debe conocer la corriente que consumen todos los circuitos que van a estar alimentados por esta batería. Y el tiempo de autonomía que se necesita por parte de la batería. Realizando pequeños cálculos con estos datos se puede tener los amperios horas necesarios para suplir la parte de control. Por otro lado resulta fácil medir con un amperímetro el consumo instantáneo de corriente en las peores condiciones, multiplicarlo por el tiempo que se desea que la batería mantenga su autonomía y se tienen los amperios-hora de la misma.

El consumo máximo aproximado es de 30mA. Por otro lado el tiempo de autonomía de la batería está limitado por dos factores muy importantes para la aplicación: el peso y el tamaño (que están relacionados directamente con los Ah de la batería) de la misma, pues lo que se requiere es que estos factores sean lo mínimo posible para no afectar al usuario pero suficientes para almacenar la energía requerida por la carga durante un tiempo adecuado. Si se desea que la batería dure al menos unas 50horas de uso se tiene:

$$\begin{aligned} \text{horas} &= \frac{Ah}{I} \\ Ah &= \text{horas} * I \\ Ah &= 50H * 30mA \\ Ah &= 1.5 \end{aligned}$$

*Para la batería del circuito de potencia (motor):*

El motor consume en condiciones nominales 3A, y en el peor de los casos puede llegar a sobrecargarse al 200% durante un pequeñísimo tiempo puesto que es desconectado inmediatamente al llegar a esta condición.

Suponiendo que una persona desea pedalear durante todo el día (12Horas) se tiene:

$$\begin{aligned} \text{horas} &= \frac{Ah}{I} \\ Ah &= \text{horas} * I \\ Ah &= 12H * 3A \\ Ah &= 36 \end{aligned}$$

Como se observa de los cálculos los amperios-horas son “demasiados” en el sentido que el peso y el tamaño de la batería es inadecuado para la aplicación por tratarse de una bicicleta a la cual se pretende volverla más eficiente en lugar de darle mayor carga al usuario. Además es prácticamente imposible que alguien esté pedaleando en una cuesta (gran pendiente, donde el motor trabaja al máximo) por tanto tiempo.

Teniendo en cuenta el criterio profesional en cuanto al ciclismo de resistencia, en el supuesto caso de pedalear durante todo el día, el peor de los casos de estar circulando en cuesta es del 50% del tiempo, esto significa seis horas lo cual es:

$$\begin{aligned} Ah &= \text{horas} * I \\ Ah &= 6H * 3A \\ Ah &= 18 \end{aligned}$$

Una batería de **12V** con **18Ah** es de dimensiones que están fuera del límite permitido por la estética de la bicicleta y su peso es demasiado en relación al peso total de la misma. Por esta razón se ve en la obligación de subdimensionar la batería teniendo en cuenta el peso y las dimensiones permisibles para aplicación. Una batería de plomo-ácido de **12V y 12Ah** (ver tabla 2.7. resaltado en amarillo) está en el límite permisible.

Las baterías que se consiguieron en el mercado nacional son las de Plomo-ácido, las características de algunas de estas baterías se muestran a continuación y en la parte de anexos

Tabla 2.7 Características de Baterías de Plomo - ácido disponibles en el Mercado Nacional para 12 Voltios

Part No.	Ah	L	W	H	Weight	Terminal
<u>LC-R121R3PU</u>	1.3	3.82"	1.87"	1.97"	1.30 lbs.	.187" Tab
<u>LC-SD122EU</u>	2	5.65"	0.94"	2.60"	1.30 lbs.	Video Type
<u>LC-T122PU</u>	2	6.97"	0.94"	2.36"	1.40 lbs.	.187" Tab
<u>LC-TA122PU</u>	2	7.17"	0.94"	2.43"	1.40 lbs.	Special
<u>LC-R122R2PU</u>	2.2	6.97"	1.34"	2.36"	1.76 lbs.	.187" Tab
<u>LC-SA122R3CU</u>	2.3	7.17"	0.94"	2.43"	1.44 lbs.	Video Type
<u>LC-R123R4PU</u>	3.4	5.28"	2.64"	2.36"	2.56 lbs.	.187" Tab
<u>LC-RB124P</u>	4	3.54"	2.75"	4.02"	3.84 lbs.	.187" Tab
<u>LC-R127R2P</u>	7.2	5.95"	2.54"	3.70"	5.45 lbs.	.187" Tab
<u>LC-R127R2P1</u>	7.2	5.95"	2.54"	3.70"	5.45 lbs.	.250 Tab
<u>LC-RA1212P1</u>	12	5.95"	3.86"	3.70"	8.36 lbs.	.250 Tab
<u>LC-RC1217P</u>	17	7.13"	3.00"	6.58"	14.30 lbs.	Nut & Bolt
<u>LC-X1220P</u>	20	7.13"	2.99"	6.57"	14.56 lbs.	Nut & Bolt
<u>LC-X1228P</u>	28	6.50"	4.92"	6.89"	24.34 lbs.	Nut & Bolt
<u>LC-XB1228AP</u>	28	6.50"	4.92"	6.89"	24.34 lbs.	Threaded Post

- Batería 1: 12V, 1.5Ah
- Batería 2: 12V, 12Ah

### 2.3.6.2 CIRCUITO PARA VERIFICAR EL VOLTAJE DE LA BATERIA

La batería de plomo-ácido de 12V está totalmente cargada a un voltaje de de 13.2V conocido como voltaje de flotación y 8.5V es el voltaje hasta cuando esta mantiene su autonomía útil.

Un circuito para saber cuando el voltaje de una batería está por debajo de su mínimo valor, donde ya no mantiene su autonomía útil, es el mostrado en la figura 2.31.

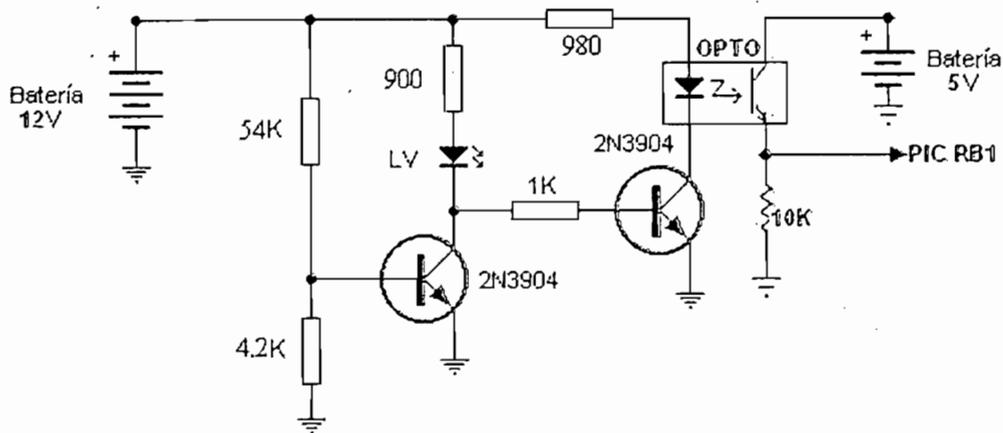


Figura 2.31 Circuito para verificar el Estado de la Batería.

El monitor de carga funciona de la siguiente manera: Cuando la tensión en la batería es suficiente como para excitar el primer transistor (el que tiene la resistencia de  $4.2K\Omega$  a tierra y  $54K\Omega$  a positivo) éste conduce haciendo brillar el LED verde (marcado como LV). Estando este transistor en corte tanto en emisor como en colector hay tierra por lo que la base del segundo transistor no puede dispararse impidiendo que se active al diodo del optoacoplador. Ahora, cuando la tensión de batería cae por debajo de 8.5V la misma no llega a excitar al primer transistor por lo que en la base del segundo ya no hay tierra sino tensión la cual dispara (al segundo transistor) haciendo que circule corriente por el diodo del opto y activando a su transistor con lo cual se tiene un 1L que se lo lleva al PIC (RB1) indicando batería baja. Para modificar el punto en que el transistor dos se activa

y se da lugar a indicar batería baja basta con variar el valor de la resistencia de  $54K\Omega$  (entre la base del primer transistor y +V).

### 2.3.6.3 PROTECCIONES

El circuito de fuerza posee las siguientes protecciones:

Protecciones contra corriente:

- El microcontrolador PIC será capaz de sensar la carga del motor (corriente) y si esta sobrepasa o llega al 200 % de su valor nominal, enviará al PWM un valor en bajo siempre.
- Se puede provocar cortos circuitos o altas corrientes por una carga muy grande, lo que provocará corrientes altas las mismas que deberán eliminarse con rapidez. Se utiliza fusibles de acción rápida a fin de proteger los dispositivos semiconductores. Conforme aumenta la corriente de falla, el fusible se abre y elimina el problema en unos cuantos milisegundos.
- Con lo cual se tiene doble protección contra una sobre-corriente: Por software y hardware.
- El fusible se dimensiona teniendo en cuenta la corriente media de sobrecarga y su duración a través del mismo, En base a esto se tiene que la corriente media máxima del fusible es de 6 Amperios y de acción rápida, en el orden de milisegundos.
- El Circuito no necesita protección contra  $dv/dt$  ni para  $di/dt$  ya que se utiliza una fuente de corriente continua de valor fijo máximo (batería) que bajo ninguna circunstancia podrá subir más que su valor especificado en los datos de placa.

Una vez diseñada de la manera más eficiente y adecuada el hardware y las partes mecánicas necesarias para que el sistema motriz de reducción de esfuerzos trabaje correctamente y de una manera automática, en el siguiente capítulo se detalla el desarrollo del software que permite al microcontrolador PIC 16F873 desempeñar las funciones del sistema motriz.

## **CAPITULO 3**

### **DESARROLLO DEL SOFTWARE**

## CAPITULO 3

### DESARROLLO DEL SOFTWARE

El software implementado en el Microcontrolador PIC16F873 es capaz de controlar la velocidad del motor de DC y el rango de variación de corriente en función del esfuerzo ejercido por la persona y la velocidad de pedaleo. El software se desarrolla de tal manera que se aprovecha al máximo las cualidades del microcontrolador y puede tomar las decisiones de control lo más rápido posible, esto implica seguridad, eficiencia y lo que es más importante un control casi en tiempo real.

#### 3.1 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC16F873.

El Microcontrolador PIC16F873, que es el “cerebro” del sistema motriz para bicicletas, desarrollará las siguientes tareas:

- Manejo de Periféricos
  - Entradas:
    - On / Off
    - Sensor de Esfuerzo
    - Verificación baja batería
    - Carga del Motor (100, 140 y 200%)
  - Salidas:
    - Luces indicadoras
    - PWM
- Medición del Esfuerzo
- Medición de la Velocidad de la Bicicleta
- Manejo del Motor (Salida PWM)
- Test de corriente de carga del Motor

### 3.1.1 FLUJOGRAMA GENERAL DE TRABAJO

El programa básicamente consta de tres partes:

- Lazo Principal
- Actualiza Datos
- Interrupciones
  
- **LAZO PRINCIPAL**

En esta subrutina el microcontrolador pasa la mayor parte del tiempo, aquí se comprueba el estado de aspectos importantes que pueden pasar en cualquier momento y requieren ser atendidos de manera inmediata, estos son:

- El encendido
- Baja batería
- Carga del Motor (100, 140 y 200%)
- Baja Velocidad
- Alta Velocidad

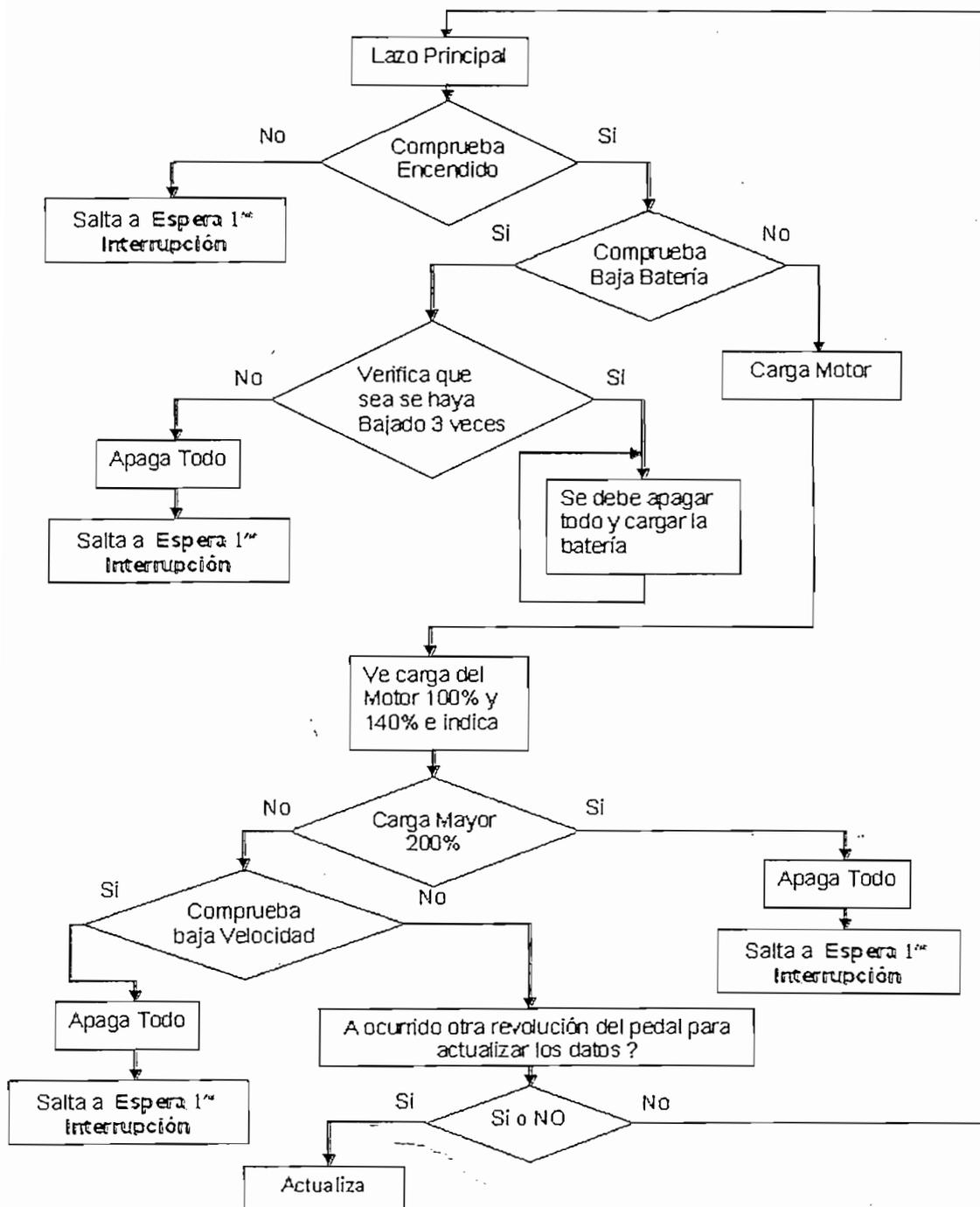


Figura 3.1 Subrutina "Lazo Principal"

**Espera la primera Interrupción**, quiere decir que todo empieza desde cero, el sistema empieza a sensar el esfuerzo y a medir la velocidad desde la segunda revolución de los pedales, la primera no se toma en cuenta ya que en esta el ciclista aplica un esfuerzo grande (aplica casi todo el peso de su cuerpo) que sirve para sacar la bicicleta de la inercia.

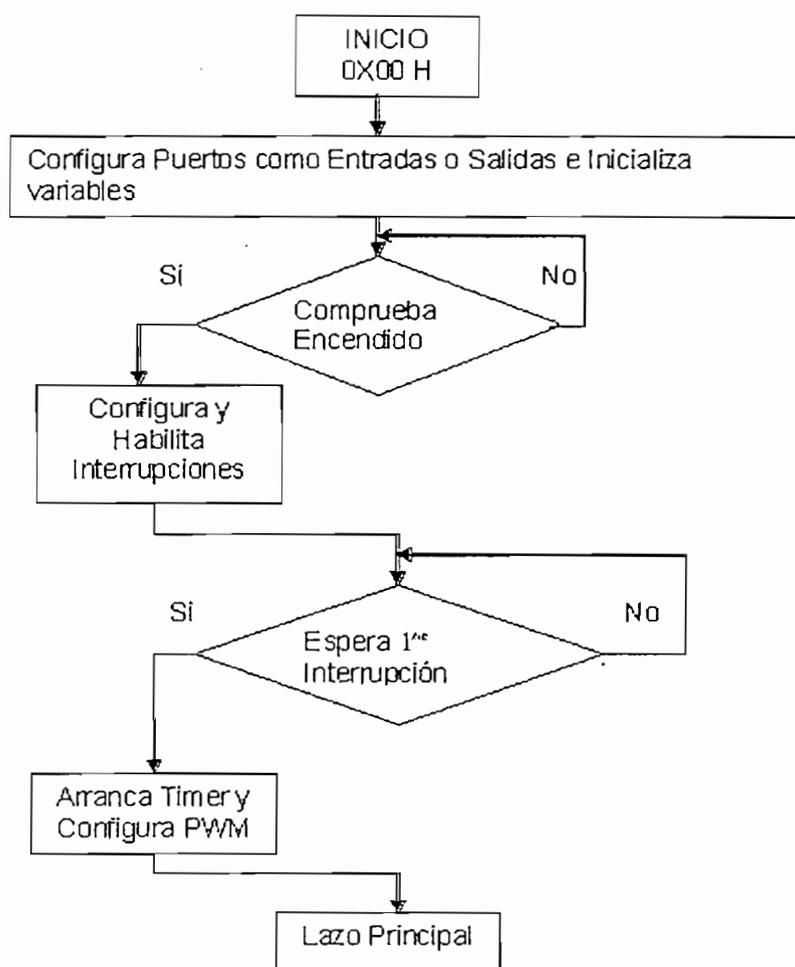


Figura 3.2 Subrutina de Inicio

### ➤ ACTUALIZA DATOS

Aquí cada vez que el pedal a completado una revolución se vuelve a medir el torque ejercido en la biela y se actualiza el tiempo que se demoró en dar una revolución.

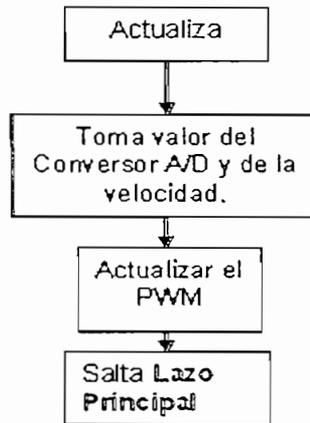


Figura 3.3 Subrutina de Actualización del Esfuerzo, Velocidad y Salida del PWM

### ➤ INTERRUPTACIONES

En esta subrutina indica que se a completado una revolución del pedal, con la interrupción externa RB0 y se mide el tiempo en que se demoró, con la interrupción interna del TIMER1.

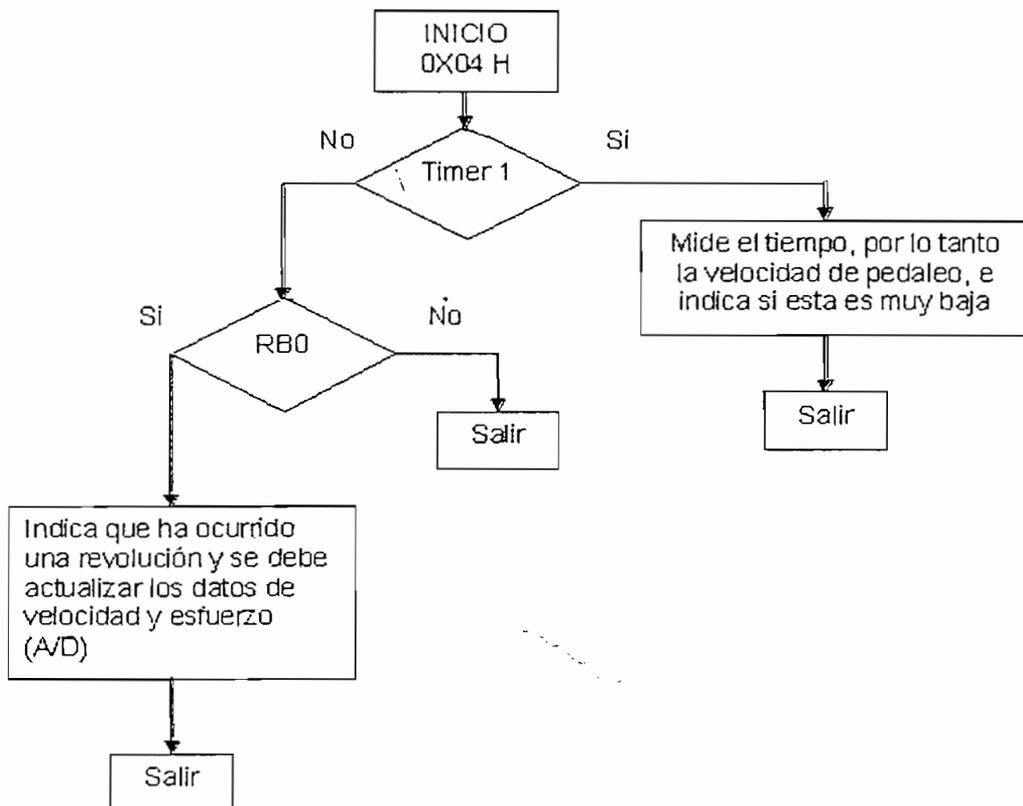


Figura 3.4 Subrutina de Interrupciones

### 3.1.2 CONFIGURACIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC16F873 PARA MANEJO DE PERIFÉRICOS

Los microcontroladores PIC16F873 encapsulados con 28 patitas disponen de tres Puertos de E/S (A, B y C), todas las líneas de estas puertas son multifuncionales, es decir, realizan diversas funciones según estén programadas. Sin embargo, todas ellas tienen la capacidad de trabajar como líneas de E/S digitales y otras como entradas de señales analógicas.

Las entradas y salidas que se necesitan son:

Tabla 3.1 Entradas y Salidas utilizadas en el PIC16F873

	ANALÓGICAS	DIGITALES	DESCRIPCIÓN
ENTRADAS	RA0		Entrada del sensor de Esfuerzo ( 0 – 5 V)
		RB1	Verifica si la Batería esta bajo el 65%
		RB3	Carga del Motor 100%
		RB4	Carga del Motor 140%
		RB5	Carga del Motor 200%
		RB7	ON / OFF
	DIGITALES		
SALIDAS		RC0	Luz indicadora ON / OFF
		RC1	Luz indicadora Bajo la velocidad mínima, Muy Lento
		RC2	Salida del PWM para el Motor
		RC3	Luz indicadora Carga del Motor 100%
		RC4	Luz indicadora Carga del Motor 140%
		RC5	Luz indicadora Carga del Motor 200%
		RC6	Luz indicadora que se sobrepasa velocidad máxima
		RC7	Luz indicadora de baja Batería

### 3.1.3 CONFIGURACIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC16F873 PARA MANEJO DE INTERRUPCIONES

Las interrupciones del PIC16F873 utilizadas son:

- Interrupción externa provocada al activar la patita RB0 / INT.

La interrupción provocada por la patita RB0 se utiliza para determinar la velocidad del pedal, es en este instante en el que se actualiza la señal del medidor de esfuerzo y también el modo de modulación de anchura de pulsos (PWM), para determinar la potencia ( no mayor al 50% de la potencia total ) que debe trabajar el Motor .

Cada interrupción de RB0 indica que se ha completado una revolución completa de la biela.

- Interrupción interna por desbordamiento del TMR1.

La interrupción provocada por desbordamiento del TMR1 se utiliza para determinar la velocidad de pedaleo del ciclista, cada vez que se produce una interrupción por la patita RB0, se toma la medida del tiempo en que el pedal se demora en dar una revolución, si el tiempo es muy grande (máximo 2 segundos) quiere decir que se va muy lento o simplemente el pedal no se mueve, por lo tanto el motor no debe actuar. (El PWM se mantiene en bajo siempre)

Cada causa de interrupción esta controlada mediante dos líneas o señales. Una de ellas actúa como un señalizador que indica si se ha producido o no el acontecimiento, mientras que la otra es el permiso o prohibición de la interrupción en sí.

El valor que se aplica a las señales de entrada del circuito de gobierno de las interrupciones proviene del que tengan los bits de los registros INTCON, PIR1 y PIE1.

### 3.1.4 TEST DEL SENSOR

Como se ha explicado en el capítulo anterior se utiliza una celda de carga unipunto, cuya señal de salida, al máximo valor de torque (88.2Nm) es de 5 V, el conversor A/D del PIC16F873 guarda la conversión en 10 bits, ADRESH Y ADRESL, para comodidad de programación se utiliza solo 8 bits, los más significativos, es decir se tiene una resolución de:  $0.3458 \text{ Nm/bit}$

$$\begin{aligned} \text{RESOLUCION} &= \frac{\text{Torque M\`aximo}}{\text{N\`umero m\`aximo de bits}} \\ &= \frac{88.2 \text{ Nm}}{255} \\ &= 0.3458 \text{ Nm/bit} \end{aligned}$$

### 3.1.5 CONTROL DEL MOTOR

Para el control del motor se deben considerar aspectos importantes como el rango de velocidad (mínima y máxima) en el cual el motor debe trabajar, y por supuesto el esfuerzo ejercido por el ciclista, para que dependiendo del esfuerzo de este, el motor entre en funcionamiento con el propósito de disminuir dicho esfuerzo y hacer que el trabajo ejercido por el ciclista sea más eficiente, (misma distancia con menor esfuerzo y tiempo); es decir el motor eléctrico añade una fuerza adicional a la que hace el ciclista; el motor eléctrico no tiene la misión de sustituir la fuerza muscular, sino de complementarla, es decir, que la potencia del motor nunca sobrepase la potencia realizada por el ciclista, ya que de lo contrario, no se trataría de una bicicleta, sino de una motocicleta.

En el capítulo anterior se determinó los rangos de velocidad en los cuales el motor añadirá su fuerza para complementar la muscular, estos valores debe ser capaz de medir el microcontrolador:

Velocidad Mínima	$0.5 \text{ rev/seg}$
Velocidad Máxima	$1.2 \text{ rev/seg}$

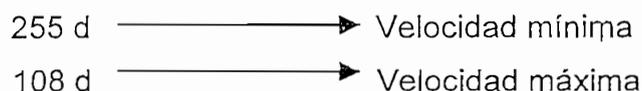
En el programa se utiliza un registro encargado de medir la velocidad (27H de la localidad de Memoria RAM) el cual si se desborda (pasa de 255d a 00d ) indica que la bicicleta no se mueve o la velocidad es muy baja, con lo cual el motor no funciona, es decir si no se ha dado al menos 1 revolución en dos segundos

Este registro representa los  $0.5 \text{ rev/seg}$ , es decir que al menos debe contar una revolución en 2 segundos, caso contrario el motor no entra a funcionamiento bajo ninguna circunstancia.

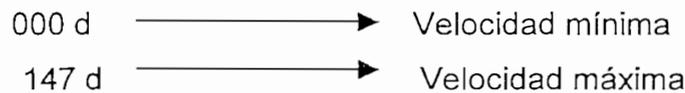
Lo máximo que se debe contar es 2 segundos (si no hay ninguna revolución en 2 segundos el motor no ayuda, muy lento), y como el ciclo de máquina del PIC16F873 con el cristal de 4 MHz es  $1\mu s$ , se tiene que hacer un contador de 2000000 ( $\frac{2s}{1\mu s}$ ), el registro de velocidad es de 8 bits (máximo 255 decimal) con lo que se tiene que para que se incremente en uno la velocidad el contador debe contar 7843 veces un ciclo de máquina ( $\frac{2000000}{255}$ ), para este propósito se utiliza el TIMER1 del PIC16F873 (16 bits)

La velocidad máxima determinada es  $1.2 \text{ rev/seg}$ , es decir una revolución en 0.83 segundos, con lo que el contador alcanzara el valor de 108 decimal  $\left( \frac{0.83s}{1\mu s / 7843} \right)$ .

Con lo que se tiene:



Para tener un valor lógico (Mínimo: el menor valor se resta 255 – valor medido) con lo que finalmente se tiene:



La resolución del contador de velocidad es:

$$\begin{aligned}
 \text{RESOLUCION} &= \frac{\text{Variación de velocidad}}{\text{Número máximo del contador}} \\
 &= \frac{\text{Velocidad max} - \text{Velocidad min}}{\text{Número máximo del contador}} \\
 &= \frac{25 \text{ Km/h} - 5 \text{ Km/h}}{147} \\
 &= 0.136 \text{ Km/h/bit}
 \end{aligned}$$

Es decir el contador se incrementará en uno por cada  $0.136 \text{ Km/h}$  de incremento en la velocidad.

### 3.1.5.1 ANALISIS DE LAS CURVAS DE POTENCIA HUMANA Y DEL MOTOR

Se realiza el análisis de la curva de potencia humana, para determinar el dominio de ayuda del motor eléctrico

En condiciones normales de pedaleo en una bicicleta se realiza el mayor esfuerzo a la mínima velocidad y el mínimo a la máxima, es decir para este caso que a 88.2 Nm la velocidad angular de la catalina es la mínima ( $3.14 \text{ rad/seg}$ ) y para la velocidad máxima el torque debe ser el mínimo 0Nm o muy pequeño.

Siempre que se este pedaleando, sin importar cuan rápido gire la catalina se va ha ejercer un esfuerzo en la biela o pedal, para un calculo aproximado se asume que la velocidad a la que el torque es cero es  $12.56 \text{ rad/seg}$  ( $2 \text{ rev/seg}$ ) que es 60% mayor a la velocidad máxima determinada en el capítulo anterior ( $7.54 \text{ rad/seg}$ ).

Finalmente la respuesta lineal del torque en función de la velocidad es:

$$\text{TORQUE} = -9.3614 * \text{VELOCIDAD} + 117.58$$

Es decir:

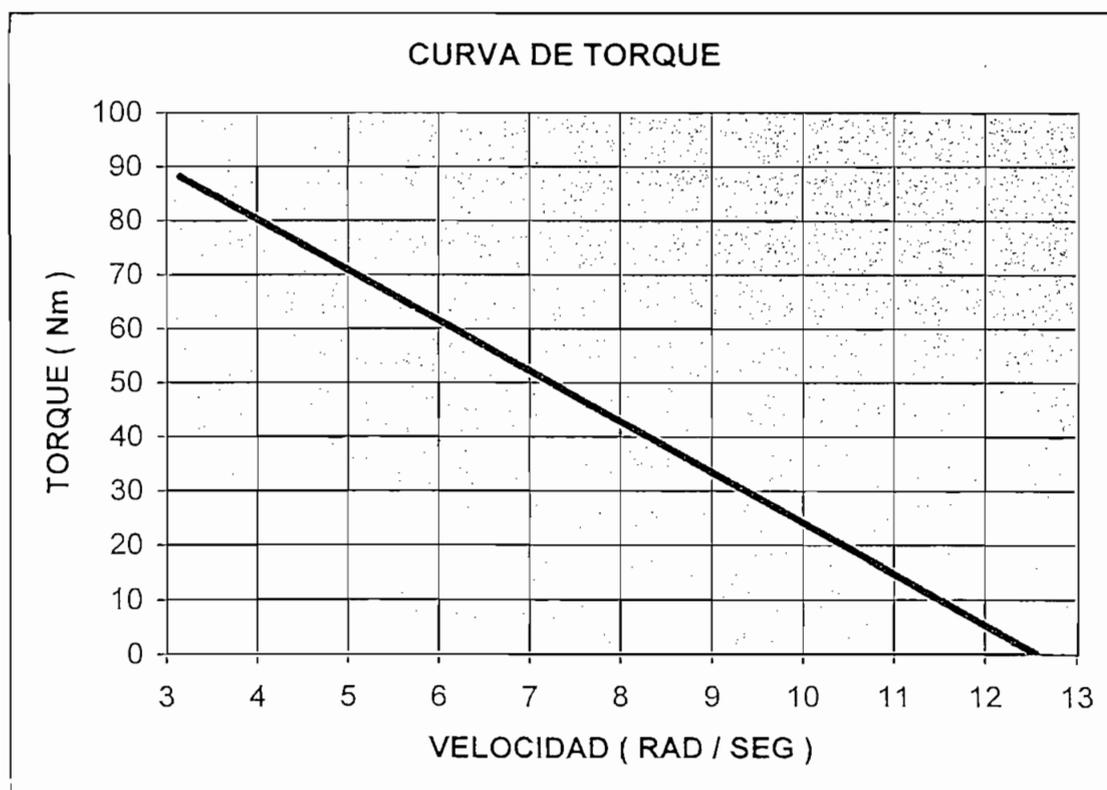


Figura 3.5 Torque en la biela en función de la Velocidad de pedaleo

En esta grafica se observa una respuesta lineal del Torque ejercido en la biela para un dominio de velocidad comprendido entre  $3.14 \text{ rad/seg}$  y  $12.56 \text{ rad/seg}$ .

El esfuerzo realizado por el ciclista se traduce al torque ejercido en la catalina, al tener torque y velocidad en la catalina, se obtiene la Potencia Humana,

$$Potencia = Torque * Velocidad$$

Con lo que se obtiene:

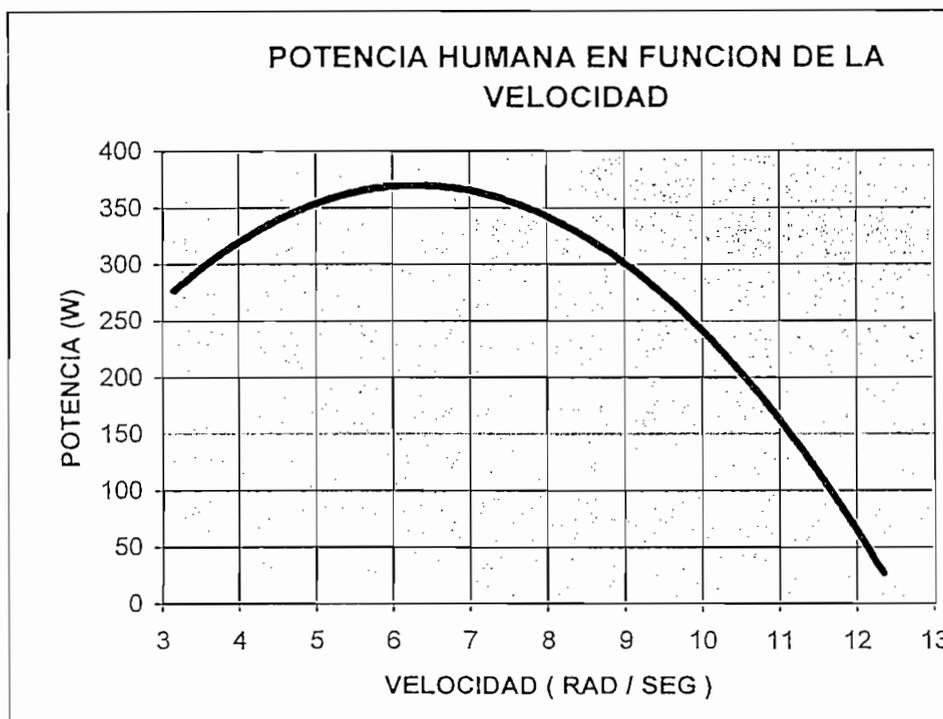


Figura 3.6 Potencia Humana en Función de la velocidad Angular de la Catalina

En el anterior gráfico se observa la curva de la potencia humana en función de la velocidad, en la cual se observa a la mínima velocidad se obtiene una potencia de 276,9 W , siempre y cuando aquí se realice el máximo esfuerzo.

El porcentaje de ayuda del motor eléctrico, para cualquier velocidad de pedaleo, se determina obviamente por el esfuerzo realizado por el ciclista, pero se toma en cuenta un valor de esfuerzo mínimo que debe realizar para que el motor añada una fuerza adicional a la que hace el ciclista, para determinar este esfuerzo, se pasa la velocidad y el torque a números decimales en base a los 8 bits que poseen los registros utilizados, de la siguiente manera:

Velocidad mínima  $3.14 \text{ rad/seg}$  → 0 d  
 El torque máximo 88.2 Nm → 255 d

**Nota:** Un registro de 8 bits máximo puede contar 255 decimal

Velocidad máxima  $12.56 \text{ rad/seg}$  → 190 d  
 El torque mínimo 0 Nm → 0 d

La relación lineal del Torque en función de la velocidad en el microcontrolador es:

$$\text{Torque} = -1.342 * \text{velocidad} + 255$$

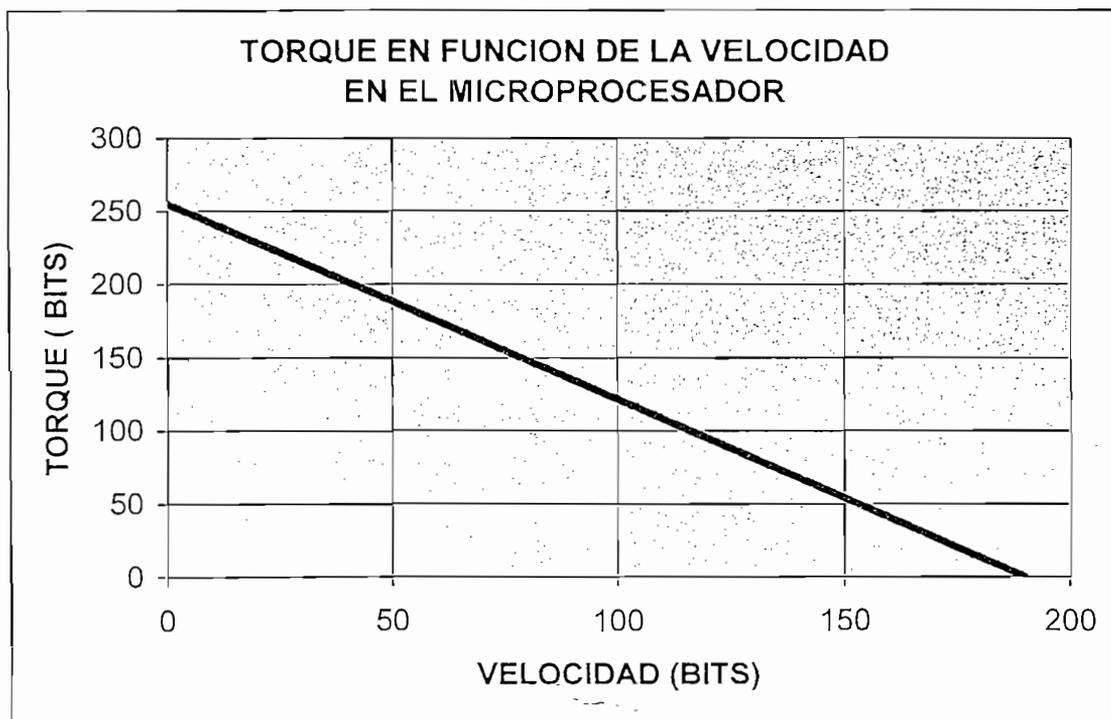


Figura 3.7 Torque vs Velocidad en el Microprocesador

En la figura se puede observar que para la velocidad escogida como la máxima a la que el motor va ayudar  $1.2 \text{ rev/seg}$  ( $7.54 \text{ rad/seg}$ ), 147d, el torque es casi 50d, mayor que esta velocidad el torque comienza a disminuir, y se considera

estos valores muy pequeños para que el motor eléctrico añada su fuerza, por lo que se demuestra que la velocidad de  $1.2 \text{ rev/seg}$  escogida en los anteriores puntos es correcta, o muy cercana a un valor real.

Estos valores se pueden corroborar en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Potencia Humana instantánea para diferentes valores de  $w$  y Torque

Velocidad	Torque	$w$ (rad/seg)	Torque (Nm)	Potencia Humana(W)
0	255	3,14	88,19	276,9
1	254	3,19	87,73	279,76
2	252	3,24	87,26	282,63
3	251	3,29	86,8	285,42
4	250	3,34	86,33	288,17
5	248	3,39	85,87	290,87
6	247	3,44	85,41	293,53
7	246	3,49	84,94	296,14
8	244	3,54	84,48	298,71
9	243	3,59	84,02	301,23
10	242	3,63	83,55	303,7
11	240	3,68	83,09	306,13
12	239	3,73	82,63	308,51
13	238	3,78	82,16	310,85
14	236	3,83	81,7	313,14
15	235	3,88	81,24	315,38
16	234	3,93	80,77	317,58
17	232	3,98	80,31	319,74
18	231	4,03	79,85	321,84
19	230	4,08	79,38	323,91
20	228	4,13	78,92	325,92
21	227	4,18	78,46	327,89
22	225	4,23	77,99	329,82
23	224	4,28	77,53	331,69
24	223	4,33	77,07	333,53
25	221	4,38	76,6	335,31
26	220	4,43	76,14	337,05
27	219	4,48	75,68	338,75
28	217	4,53	75,21	340,4
29	216	4,58	74,75	342
30	215	4,62	74,29	343,56

31	213	4,67	73,82	345,07
32	212	4,72	73,36	346,53
33	211	4,77	72,89	347,95
34	209	4,82	72,43	349,33
35	208	4,87	71,97	350,65
36	207	4,92	71,5	351,93
37	205	4,97	71,04	353,17
38	204	5,02	70,58	354,36
39	203	5,07	70,11	355,5
40	201	5,12	69,65	356,6
41	200	5,17	69,19	357,65
42	199	5,22	68,72	358,66
43	197	5,27	68,26	359,62
44	196	5,32	67,8	360,54
45	195	5,37	67,33	361,41
46	193	5,42	66,87	362,23
47	192	5,47	66,41	363,01
48	191	5,52	65,94	363,74
49	189	5,57	65,48	364,42
50	188	5,61	65,02	365,06
51	187	5,66	64,55	365,65
52	185	5,71	64,09	366,2
53	184	5,76	63,63	366,7
54	183	5,81	63,16	367,16
55	181	5,86	62,7	367,57
56	180	5,91	62,24	367,93
57	179	5,96	61,77	368,25
58	177	6,01	61,31	368,53
59	176	6,06	60,85	368,75
60	174	6,11	60,38	368,93
61	173	6,16	59,92	369,07
62	172	6,21	59,46	369,16
63	170	6,26	58,99	369,2
64	169	6,31	58,53	369,2
65	168	6,36	58,07	369,15
66	166	6,41	57,6	369,05
67	165	6,46	57,14	368,91
68	164	6,51	56,68	368,73
69	162	6,56	56,21	368,49
70	161	6,60	55,75	368,22
71	160	6,65	55,29	367,89
72	158	6,70	54,82	367,52
73	157	6,75	54,36	367,11

74	156	6,80	53,9	366,65
75	154	6,85	53,43	366,14
76	153	6,90	52,97	365,58
77	152	6,95	52,51	364,99
78	150	7,00	52,04	364,34
79	149	7,05	51,58	363,65
80	148	7,10	51,12	362,91
81	146	7,15	50,65	362,13
82	145	7,20	50,19	361,3
83	144	7,25	49,73	360,43
84	142	7,30	49,26	359,51
85	141	7,35	48,8	358,54
86	140	7,40	48,34	357,53
87	138	7,45	47,87	356,47
88	137	7,50	47,41	355,37
89	136	7,55	46,95	354,22
90	134	7,59	46,48	353,02
91	133	7,64	46,02	351,78
92	132	7,69	45,55	350,49
93	130	7,74	45,09	349,16
94	129	7,79	44,63	347,78
95	128	7,84	44,16	346,35
96	126	7,89	43,7	344,88
97	125	7,94	43,24	343,37
98	123	7,99	42,77	341,8
99	122	8,04	42,31	340,2
100	121	8,09	41,85	338,54
101	119	8,14	41,38	336,84
102	118	8,19	40,92	335,1
103	117	8,24	40,46	333,3
104	115	8,29	39,99	331,47
105	114	8,34	39,53	329,58
106	113	8,39	39,07	327,65
107	111	8,44	38,6	325,68
108	110	8,49	38,14	323,66
109	109	8,54	37,68	321,59
110	107	8,58	37,21	319,48
111	106	8,63	36,75	317,32
112	105	8,68	36,29	315,11
113	103	8,73	35,82	312,86
114	102	8,78	35,36	310,56
115	101	8,83	34,9	308,22
116	99	8,88	34,43	305,83

117	98	8,93	33,97	303,4
118	97	8,98	33,51	300,92
119	95	9,03	33,04	298,39
120	94	9,08	32,58	295,82
121	93	9,13	32,12	293,2
122	91	9,18	31,65	290,54
123	90	9,23	31,19	287,83
124	89	9,28	30,73	285,08
125	87	9,33	30,26	282,27
126	86	9,38	29,8	279,43
127	85	9,43	29,34	276,53
128	83	9,48	28,87	273,6
129	82	9,53	28,41	270,61
130	81	9,57	27,95	267,58
131	79	9,62	27,48	264,5
132	78	9,67	27,02	261,38
133	77	9,72	26,56	258,21
134	75	9,77	26,09	255
135	74	9,82	25,63	251,74
136	72	9,87	25,17	248,43
137	71	9,92	24,7	245,08
138	70	9,97	24,24	241,68
139	68	10,02	23,78	238,24
140	67	10,07	23,31	234,75
141	66	10,12	22,85	231,22
142	64	10,17	22,39	227,63
143	63	10,22	21,92	224,01
144	62	10,27	21,46	220,33
145	60	10,32	21	216,62
146	59	10,37	20,53	212,85
147	58	10,42	20,07	209,04
148	56	10,47	19,61	205,18
149	55	10,52	19,14	201,28
150	54	10,56	18,68	197,33
151	52	10,61	18,21	193,34
152	51	10,66	17,75	189,3
153	50	10,71	17,29	185,21
154	48	10,76	16,82	181,08
155	47	10,81	16,36	176,91
156	46	10,86	15,9	172,68
157	44	10,91	15,43	168,41
158	43	10,96	14,97	164,1
159	42	11,01	14,51	159,74

160	40	11,06	14,04	155,33
161	39	11,11	13,58	150,88
162	38	11,16	13,12	146,38
163	36	11,21	12,65	141,83
164	35	11,26	12,19	137,24
165	34	11,31	11,73	132,61
166	32	11,36	11,26	127,92
167	31	11,41	10,8	123,2
168	30	11,46	10,34	118,42
169	28	11,51	9,87	113,6
170	27	11,55	9,41	108,74
171	26	11,60	8,95	103,83
172	24	11,65	8,48	98,87
173	23	11,70	8,02	93,87
174	21	11,75	7,56	88,82
175	20	11,80	7,09	83,72
176	19	11,85	6,63	78,58
177	17	11,90	6,17	73,39
178	16	11,95	5,7	68,16
179	15	12,00	5,24	62,88
180	13	12,05	4,78	57,56
181	12	12,10	4,31	52,19
182	11	12,15	3,85	46,77
183	9	12,20	3,39	41,31
184	8	12,25	2,92	35,8
185	7	12,30	2,46	30,25
186	5	12,35	2	24,65
187	4	12,40	1,53	19
188	3	12,45	1,07	13,31
189	1	12,50	0,61	7,57
190	0	12,54	0,14	1,79

Valor máximo de velocidad a la que el motor ayuda
Intervalo de velocidad en el que el motor no ayuda

### 3.1.5.2 ALIMENTACIÓN DEL MOTOR

Para la alimentación del motor se considera que para una misma velocidad de pedaleo del ciclista, se tiene:

- a. Diferentes velocidades de la bicicleta, las mismas que dependen de en que disco de la llanta de atrás sé este pedaleando, por ejemplo para la mínima velocidad  $0.5 \text{ rev/seg}$  se tiene:

Con el Disco más grande de la llanta de atrás se tiene:

$$\text{Velocidad Disco de atras} = 1.35 * \text{velocidad catalina}$$

$$\text{Velocidad Disco de atras} = 1.35 * 0.5 \text{ rev/seg}$$

$$\text{Velocidad Disco de atras} = 0.675 \text{ rev/seg}$$

Es decir la velocidad de la bicicleta es de:

$$\frac{0.675 \text{ rev}}{\text{seg}} * \frac{207.34 \text{ cm}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{1 \text{ Km}}{1000 \text{ m}} * \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ hora}} = 5.03 \text{ Km/h}$$

Con la misma velocidad de pedaleo en la catalina, pero con el disco más pequeño de la llanta de atrás se obtiene:

$$\text{Velocidad Disco de atras} = 2.71 * \text{velocidad catalina}$$

$$\text{Velocidad Disco de atras} = 2.71 * 0.5 \text{ rev/seg}$$

$$\text{Velocidad Disco de atras} = 1.355 \text{ rev/seg}$$

Es decir la velocidad de la bicicleta es de:

$$\frac{1.355 \text{ rev}}{\text{seg}} * \frac{207.34 \text{ cm}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{1 \text{ Km}}{1000 \text{ m}} * \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ hora}} = 10.11 \text{ Km/h}$$

- b. Para mantener la velocidad de pedaleo con el disco más pequeño, es obvio que el esfuerzo va ser mayor que si se pedalea con el disco de mayor número de dientes, por lo que para una misma velocidad, puede haber diferentes niveles de esfuerzo, que dependen lógicamente de la contextura física del ciclista
- c. El motor mínimo debe ayudar a la misma velocidad de pedaleo del ciclista, ya que si este gira a menos revoluciones que la imprimida por el ciclista el motor no ayuda, y estaría haciendo un trabajo nulo, consumiendo energía de una manera ineficiente.

En base a estas consideraciones se realiza una tabla de la siguiente manera:

- Se divide el dominio del esfuerzo total que un ciclista promedio realiza en 5 rangos, de la siguiente manera:

Tabla 3.3 Niveles de Esfuerzo de acuerdo a la pendiente del terreno

Zona con una pendiente aproximada de 30° (Maximo esfuerzo)
Zona con una pendiente aproximada de 20° (Avanzado esfuerzo)
Zona con una pendiente aproximada de 10° (Moderado II esfuerzo)
Zona con una pendiente aproximada de 5° (Moderado I esfuerzo)
Zona de mínimo esfuerzo donde el motor no ayuda (Plano)

En cada una de estas zonas el motor girará un porcentaje mayor al que el ciclista pedalea, dependiendo de que tanta ayuda necesite este para mantener el esfuerzo muscular de las piernas con la mejor eficiencia posible.

- Conforme el ciclista empieza a subir la velocidad de pedaleo, el esfuerzo en los pedales va disminuyendo, por lo tanto para mayores velocidades el motor eléctrico debe ayudar en menor porcentaje que a menores velocidades.

Para este fin se divide todo el rango de velocidad en cuatro partes:

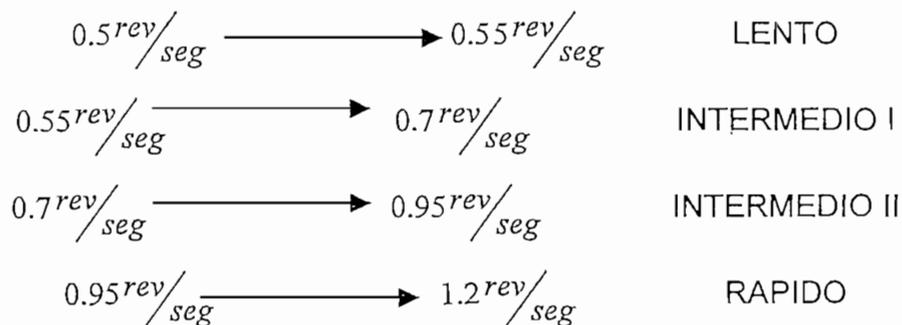
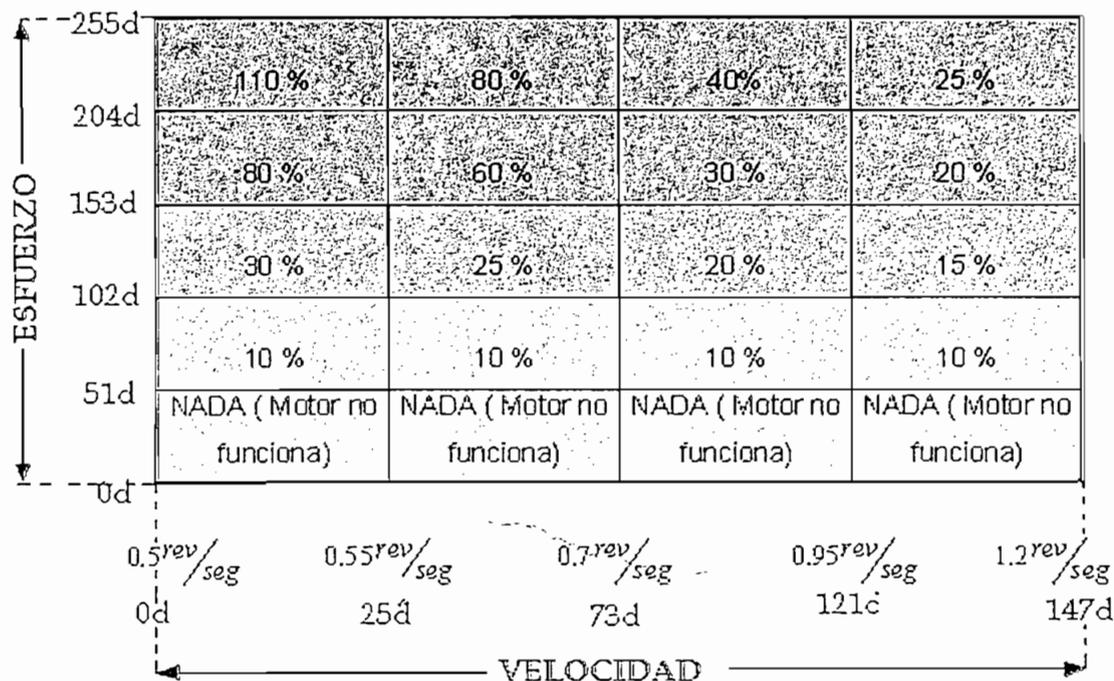


Tabla 3.4 Porcentajes de sobre velocidad del Motor para intervalos de Esfuerzo y Velocidad



Para el control de la velocidad del motor de CD se utiliza la técnica PWM (Modulación por Ancho de Pulso). El control de la velocidad del motor se obtiene variando (modulando) el ancho de los pulsos.

Se utiliza una resolución de 8 bits,(los más significativos) los dos bits de menor peso se ponen a 0, es decir para cambiar el tiempo en alto se cambiará el valor del registro CCPR1L que es el encargado de gobernar la relación de trabajo del módulo del PWM del Microcontrolador PIC16F873.

El periodo del PWM es:

$$\begin{aligned} PERIODO &= 255 * CICLO DE MAQUINA \\ &= 255 * 1 \times 10^{-6} \text{ seg} \\ &= 0.000255 \text{ seg} \end{aligned}$$

Y la frecuencia es:

$$\begin{aligned} Frecuencia &= \frac{1}{PERIODO} \\ &= \frac{1}{0.000255 \text{ seg.}} \\ &= 3921.56 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Como el motor opera a una velocidad mínima de  $0.5 \text{ rev/seg}$ , también tendrá un valor mínimo con el cual se debe cargar el PWM, la velocidad máxima es de  $1.2 \text{ rev/seg}$ , cuando se carga con 255 el registro CCPR1L, y para  $0.5 \text{ rev/seg}$  se carga con:

$$\frac{255 * 0.5}{1.2} = 108$$

Con lo que se tiene:



## **CAPITULO 4**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

## CAPITULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

La capacidad de trabajo físico ha sido objeto de estudio desde finales del siglo pasado y principios del actual. La capacidad de rendimiento se define como la aptitud para realizar un trabajo fuerte o de larga duración sin la sensación de fatiga. La capacidad física es una tolerancia de las modificaciones del medio interior que ocurren durante la ejecución de un esfuerzo muy intenso<sup>[1]</sup>.

Para determinar la capacidad de trabajo del sistema motriz automático para bicicletas se toma una muestra de 4 personas, (se trata de un prototipo y las personas involucradas son pocas) de diferente constitución física y un trayecto con varios niveles de pendientes; dónde se toma en cuenta los siguientes factores comparados a los obtenidos si se utiliza una bicicleta normal:

- Sensación de fatiga
- Distancia recorrida en un tiempo determinado

En la tabla 4.1 se muestra los datos antropométricos de la muestra estudiada.

Tabla 4.1 Datos antropométricos del grupo estudiado

	<b>Medias</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Edad (años)	25	23	31
Peso (lb)	133.75	125	146
Talla (cm)	167.75	164	171

Es importante conocer las características físicas de la muestra puesto que las fuentes de energía son dos, el comportamiento de una de ellas influye notablemente sobre las reservas de la otra.

En la tabla 4.2 se expone el resultado de las variables utilizadas en la valoración de la capacidad de trabajo físico, para cada individuo.

Tabla 4.2 Variables utilizadas en la valoración de la capacidad física para cada individuo.

Nº Muestra	Sistema Motriz Automático		Bicicleta Normal
	Sensación Fatiga*	Distancia Recorrida (vueltas)**	Distancia Recorrida (vueltas)
Muestra 1	30%	6	5.5
Muestra 2	28%	5	5
Muestra 3	35%	7	6
Muestra 4	25%	5	5

\*Sensación de fatiga, indica el porcentaje en que la muestra siente que ayuda el sistema motriz de bicicletas comparado con una bicicleta normal.

\*\*Es el número de vueltas en el circuito, sector entrada de La "Escuela Politécnica Nacional" frente al Coliseo "Rumiñahui", en un tiempo promedio de 10 minutos.

Tabla 4.3 Variables utilizadas en la valoración de la capacidad física

Parámetro	Sistema Motriz Automático			Bicicleta Normal		
	Media	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo
Sensación de Fatiga	29.5%	25%	35%	---	---	---
Distancia Recorrida (vueltas)	5.75	5	7	5.37	5	6

A pesar que la distancia recorrida, tanto con una bicicleta normal como con la que posee el Sistema Motriz, es la misma para un tiempo dado, la sensación de confort que siente el ciclista es significativa.

## RESULTADOS

Ahora se cuenta con un Sistema Motriz Automático para Bicicletas capaz de reducir el esfuerzo de pedaleo del ciclista por un trayecto de topografía variable, se brinda el confort necesario para cubrir mayores distancias utilizando la misma energía muscular comparada al pedalear una bicicleta normal en un recorrido menor. El sistema consta básicamente:

- Motor DC, montado en el cuadro de la bicicleta de tal manera que no altere el correcto y normal funcionamiento del vehículo, además aprovecha al máximo la fuerza de tracción del motor directamente en los pedales.



Figura 4.1 Motor DC montado en el cuadro de la bicicleta

- Sistema de control y el de potencia,

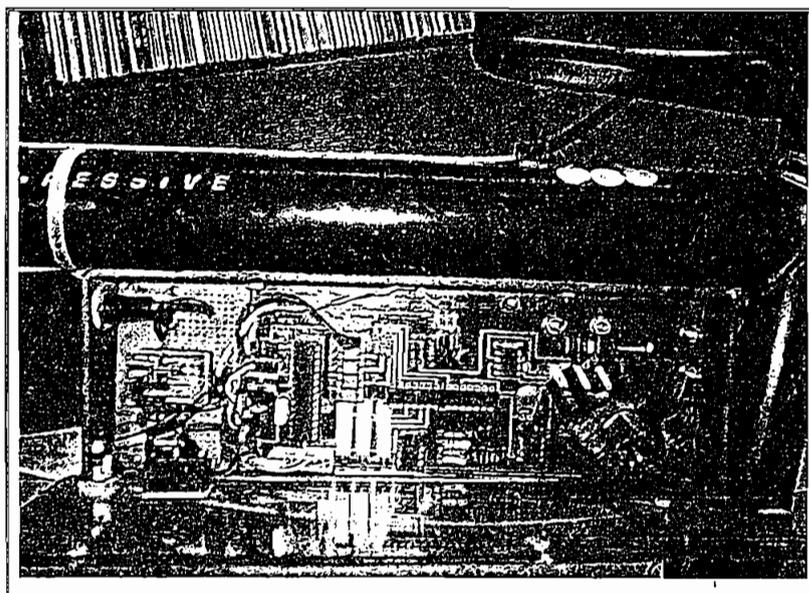


Figura 4.2 Sistema de Control y Potencia

➤ Baterías



Figura 4.3 Baterías de Control y Potencia

➤ Biela y escobillas que se acoplan a la catalina

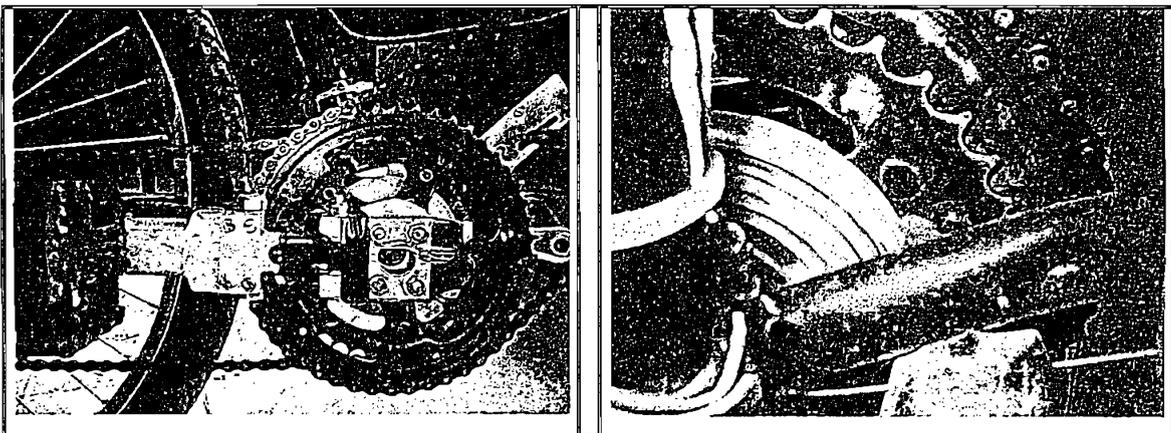


Figura 4.4 Biela y Escobillas

La bicicleta utilizada es mecánicamente buena, permite pedalear cómodamente. El hecho de llevar un motor eléctrico, batería, el sistema de control y de potencia no significa un detrimento de las cualidades mecánicas y ergonómicas del vehículo, a fin de que la aportación y el aprovechamiento de energía muscular sea lo mas elevada posible. El sistema Motriz Automático para Bicicletas terminado se muestra en la Figura 4.5

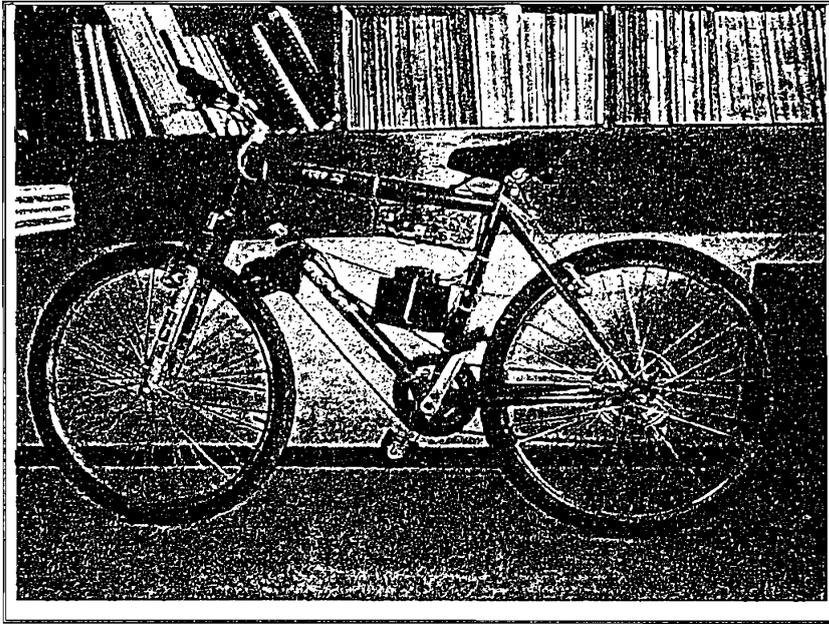


Figura 4.5 Sistema Motriz Automático para Bicicletas Terminado

## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la realización de las pruebas con las diferentes muestras se concluye que si es posible implantar un sistema motriz automático de reducción de esfuerzo al pedalear y que además su costo es significativamente menor a los sistemas que se pueden encontrar en el mercado.

Con los resultados se comprobó la viabilidad de desarrollar el Sistema Motriz Automático de reducción de los esfuerzos de pedaleo en bicicletas en nuestro país, a pesar que la distancia recorrida en un determinado tiempo no varía mucho la reducción de fatiga es considerable y para trayectos en especial como Quito dónde la topografía es variada El Sistema Motriz es una alternativa para utilizar la bicicleta como medio alternativo de transporte.

La reducción del esfuerzo del ciclista al pedalear, va a depender de los siguientes parámetros: estilo de conducción y colaboración del ciclista, estado de la bicicleta (engrase, presión de los neumáticos etc), estado de la batería, temperatura ambiente, viento, topografía del recorrido, peso total bicicleta-usuario, edad y estado físico de la persona.

Se pueden mejorar las ventajas del Sistema Motriz Automático si se encuentra un motor de las características diseñadas en el Capítulo 2, fue imposible encontrar uno en el mercado local y el costo de importación no conviene ya que se trata de un prototipo, pero a pesar de esto el sistema responde satisfactoriamente ya que el motor DC utilizado posee una gran velocidad y con la caja reductora se logra tener un buen torque, que es el encargado de mover la carga ya que la potencia es el tiempo que se demora en realizar esta acción.

El sistema motriz necesita para su correcto funcionamiento una fuerza mínima aplicada en la biela y pedalear a una velocidad mínima y máxima, en la práctica se determinó que el valor mínimo de velocidad era muy alto, ya que en pendientes se iba a menos velocidad y se necesitaba la ayuda del motor por lo que se disminuyó a 1 revolución en 3 segundos (inicialmente la velocidad mínima para ayudar era 1 revolución por 2 segundos), con lo que se obtuvo los resultados esperados y que se muestran en el anterior capítulo.

El hardware está construido de tal manera que permite que el sistema funcione de manera automática, éste se simplifica notablemente al utilizar el Microcontrolador PIC16F873 y el amplificador de instrumentación AD627 el cual es capaz de amplificar un máximo de 1000 veces simplemente variando una resistencia y funciona de manera estable.

Para seleccionar una batería, se tiene que el voltaje está más relacionado con el tamaño que con el peso y la corriente por el contrario con el peso que con el tamaño, esto es para una misma potencia teniendo la oportunidad de jugar con los valores de voltaje y corriente. Al escoger el voltaje del motor a utilizar, por cualquiera de los lados que se vaya, ya sea para un voltaje mayor o menor, se tiene como inconveniente ya sea el tamaño o el peso de la o las baterías para una misma potencia (dependiente del motor). Se tuvo la oportunidad de utilizar un motor de 72V/0.33A o uno de 12V/3A (ninguno de estos de la potencia calculada, puesto que no existen estos tipos de motores en el mercado nacional) pero aquí tiene mucho que ver la relación tamaño-peso. Por ejemplo si se desea una capacidad de 12Ah se necesitan para cubrir los 72V seis baterías de 12V de 2Ah cada una, lo cual implica gran tamaño en relación a la bicicleta y además peso. Por el otro lado se puede conseguir una batería de 12V/12Ah pero el peso es un inconveniente y el tamaño también (aunque menor que para 72V).

En la selección del motor de corriente continúa, el tipo de conexión, a utilizar esta directamente relacionada con la aplicación, es decir se requiere un buen torque a baja velocidad, esto no deja mas elección que un motor serie. En un principio se intentó utilizar un motor de arranque para automóviles (son motores DC serie) pero se descartaron ya que estos consumen alta corriente incluso en vacío, en el orden de las decenas de amperios.

En un principio además se pensó la posibilidad de recargar la batería en la bicicleta misma aprovechando que con el movimiento se puede generar energía eléctrica o mediante el uso de celdas fotovoltaicas (paneles). Los paneles son una fuente de energía ideal, pero por su tamaño físico no es factible su utilización, para recargar una batería de 12V se tiene que el tamaño del panel es de 1.5X 0.5 metros. Por otro lado, para recargar una batería en base al movimiento de la bicicleta se requiere un suministro constante de corriente lo cual implica una velocidad constante y determinada del vehículo durante un tiempo que va en el orden de las horas (una batería de 6.5Ah se recarga con una corriente recomendable del 10% de su capacidad esto implica 10horas de recarga) lo cual es imposible mantener. Por estas razones la batería debe ser recargada con la red pública o alguna otra fuente capaz de hacerlo en forma adecuada (por ejemplo utilizando una planta de luz a combustible).

Se escogió de entre los tipos de sensores para medir velocidad, los magnéticos puesto que estos son inmunes a las vibraciones y al medio ambiente, trabajan a una buena frecuencia de switcheo y en un amplio rango de temperatura.

La medición del esfuerzo muscular a partir de una celda de carga es la más apropiada para el sistema de sensores de la bicicleta eléctrica, debido la alta capacidad de medición de esfuerzo, físicamente apropiada para montarla o acoplarla en el pedal de la bicicleta y por ser insensible a los golpes y las

vibraciones que se dan comúnmente al utilizar una bicicleta, obviamente si se la utiliza de manera adecuada y no se excede de su capacidad.

Se recomienda para cualquier aplicación que implique circuitos de control y potencia, aislarlos adecuadamente ya que cuando el motor esta trabajando en sobre carga su fuente varía considerablemente ante lo cual es delicado el circuito de control si se utilizara una sola fuente.

Para un correcto funcionamiento del Sistema Motriz se recomienda seguir el manual de empleo que se muestra en el Anexo A y mantener en buen estado mecánico a la bicicleta, el Sistema Motriz no necesita de ningún tipo de mantenimiento, solo se recomienda cargar inmediatamente la batería cuando se detecta que esta baja.

Para futuros proyectos es posible mejorar las características del Sistema Motriz adaptando un control automático de cambio de velocidades y diseñar una catalina especial dónde las pérdidas por movimiento sean mínimas y se mejore la ergonomía al pedalear.

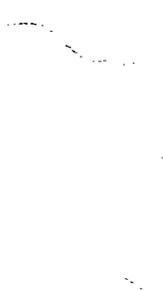
## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] FLYER HANDLE BICYCLES 2002 ([www.flyerbike.com](http://www.flyerbike.com))
- [2] Normas EU (Unión Europea) para Bicicletas Eléctricas, 2002
- [3] BIOELECTRONICA, Principios Básicos de Electrocardiografía (ECG)
- [4] Normas de estandarización alemana, DIN
- [5] BBM23-100 DataSheet. Dallas, TX: Dallas semiconductor, 1994
- [6] CORRALES Luis , "Instrumentación Industrial" , Escuela Politécnica Nacional, Quito 1998.
- [7] GTZ, Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit, Tecnología Industrial Tomo 2, Edición especial para proyector de formación profesional en el área de la cooperación técnica, Editorial Reverté, Alemania 1985.
- [8] Revista *Suplemento de Salud*.( <http://www.el-mundo.es/salud/>).
- [9] AD627 DataSheet. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A, Site: <http://www.analog.com> Analog Devices, Inc., 2000.
- [10] G.KASSAKIAN John; Principios de Electrónica; Instituto Tecnológico Tecnológico de Massachussets, Segunda Edición, 1991.
- [11] Dra. SÁNCHEZ Ruth, Dr. VELARDE Ernesto Dr. ÁLVAREZ Eduardo; Hospital Militar Central "Dr. Carlos J. Finlay"; Valoración de la capacidad física mediante prueba ergométrica en jóvenes sanos;\_Rev Cubana Med

2000.

- [12] SALAS, Juan Carlos; GRUPO AS DEPORTE, Frecuencia Cardíaca, Medicina Deportiva, junio del 2003
  
- [13] LAVERDE D. ;RIVERA ; Grado (Ingeniero Electrónico). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. "Suspensión inteligente para bicicletas de montaña" Bogotá, 1999..
  
- [14] SANTANDER Mario; Thunder Tigre TS – 4N, Baterías, [www.lycos.es/koldolo/Baterías](http://www.lycos.es/koldolo/Baterías)
  
- [15] REPRESENTACIONES EXCLUSIVAS PASTOR SL, Equipo para Bicicleta que Duplica la Velocidad Pedaleando, Inventores e Invenciones en gestiona, Valencia 2002
  
- [16] MINISTERIO DE INTERIOR - DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO, Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructuras, señalización, balizamiento; conservación y mantenimiento de bicicletas, "CARRIL-BICI: ", Madrid:, 2001, pp 5-16.



**ANEXO A**

**MANUAL DEL USUARIO**

## MANUAL DEL USUARIO

La bicicleta eléctrica supone un nuevo sistema de transporte en nuestra localidad, no contamina, no se necesita licencia de conducción, ni estar asegurada, no es ruidosa. Es ideal para recorridos urbanos y buenos caminos, el medio ideal de desplazamiento para cualquier ciclista en ciudad. Su exclusivo sistema de sensores informan al sistema mediante el pedaleo la necesidad de fuerza adicional. Además el sistema es totalmente extraíble.

En el desarrollo de la Bicicleta Eléctrica se tuvo muy en cuenta que la conducción y manejo del sistema sea lo más fácil posible, para conductores sin experiencia, esta dispone de unas funciones y elementos adicionales respecto a una bicicleta convencional.

A continuación se presentan las instrucciones para un funcionamiento adecuado que mantenga la eficiencia y la seguridad.

- Conducir sin motor
- Conducir con motor

### **1. Conducir sin motor**

Si no se enciende el motor eléctrico, se puede conducir el vehículo como una bicicleta normal. El motor no opone ninguna resistencia, de modo que se puede circular perfectamente como si de una bicicleta convencional se tratara. El cambio de velocidades y los frenos funcionan igualmente con el motor desconectado.

### **2. Conducir con motor**

1. Girar la llave de contacto a la posición "ON" (se enciende el indicador de batería en buen estado, led verde). Para más seguridad se recomienda sacar la llave una vez en esta posición.

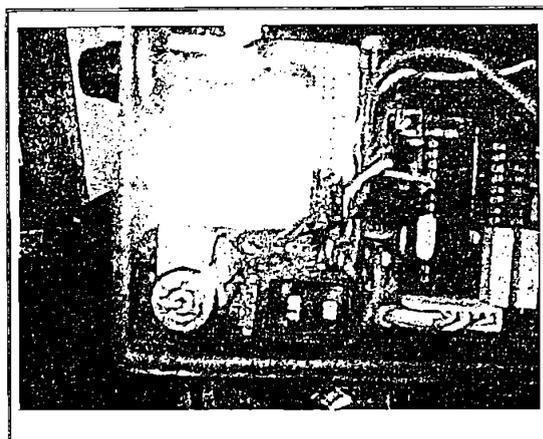


Figura A.1 Llave e interruptor de encendido / apagado

2. Pulsar el interruptor "ON / OFF", se enciende el LED (rojo) que indica que la bicicleta eléctrica esta lista para trabajar
  
3. Así es que al pedalear, el motor empieza automáticamente a trabajar cuando sea requerido, si se deja de pedalear el motor se desconecta de inmediato automáticamente.
  
4. Para apagar la Bicicleta. Eléctrica, pulsar nuevamente la tecla ON / OFF, se apaga el LED que indica encendido y posteriormente mover la llave a la posición OFF. Así todo el sistema eléctrico queda desconectado.

**Nota:** Se recomienda al encender la bicicleta eléctrica esta esté inmóvil.

#### **Sistema de luces indicadoras:**

Las condiciones bajo la cual se encuentra funcionando el Sistema Motriz se indican en base a 8 leds de diferentes colores. A continuación se muestra una ilustración de lo dicho.

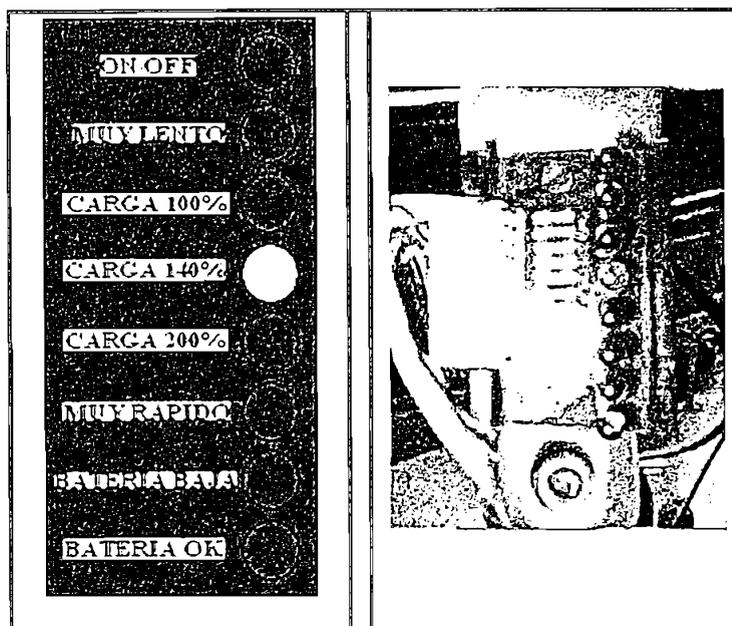


Figura A.2 Sistema de luces Indicadoras

#### NOTAS:

Muy lento, significa que se está pedaleando por debajo de la velocidad mínima a la cual empieza a responder el sistema.

Muy rápido, significa que se está pedaleando por encima de la velocidad máxima hasta la cual responde el sistema.

Carga 100%, 140% y 200%, son el porcentaje en el cual está siendo cargado el motor.

Cuando la batería está en buen estado solo se enciende la luz verde, y cuando lo está en mal estado la luz verde y la roja.

Cuando la batería está baja el sistema da dos oportunidades para ser reencendido a la tercera vez ya no responde hasta que se recargue la batería.

**ANEXO B**

**ESQUEMÁTICOS Y CIRCUITOS IMPRESOS**

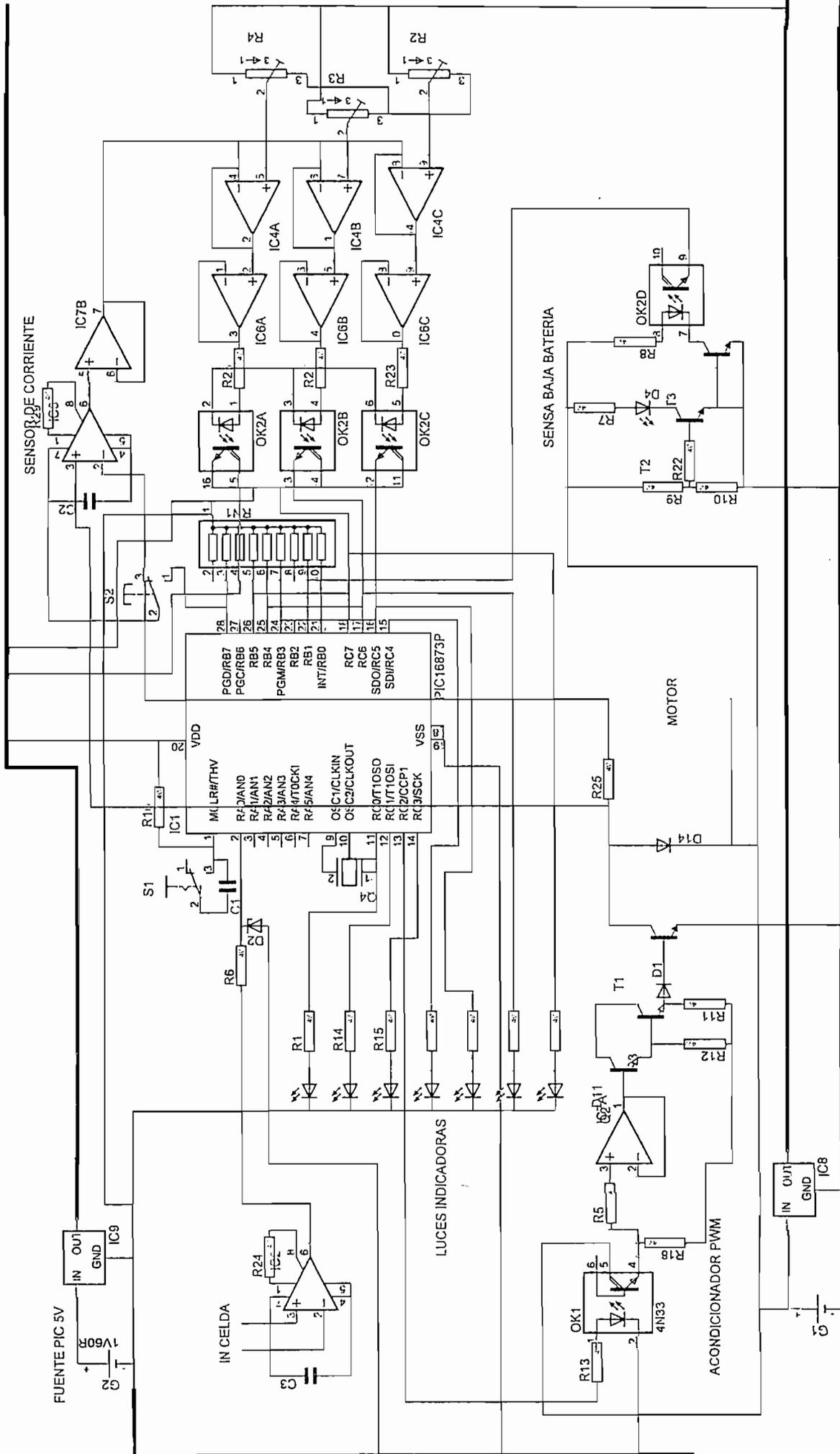


Figura B-1. Esquemático de la tarjeta implementada

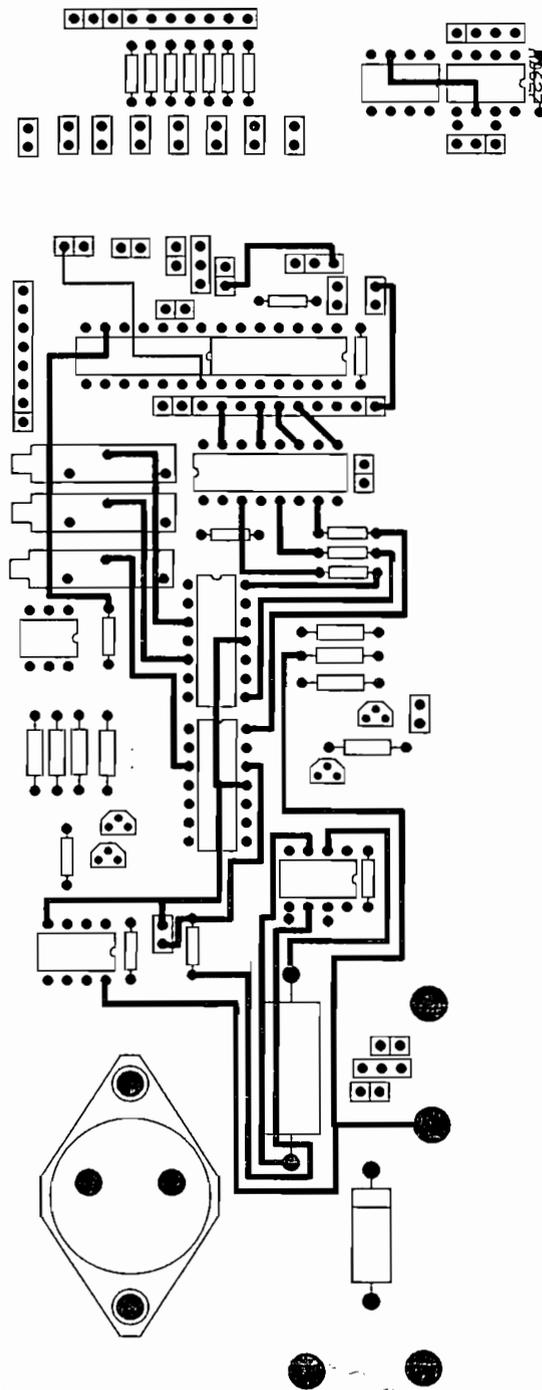


Figura B-2. Ruteado superior de la Placa

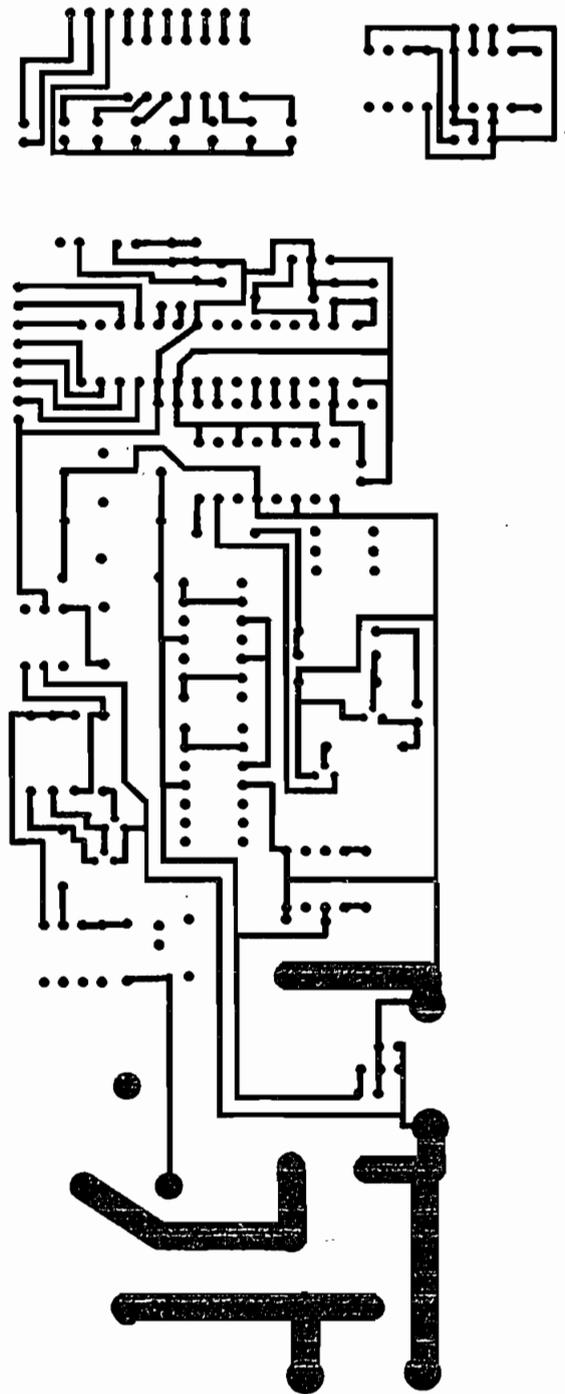


Figura B-2. Ruteado inferior de la Placa

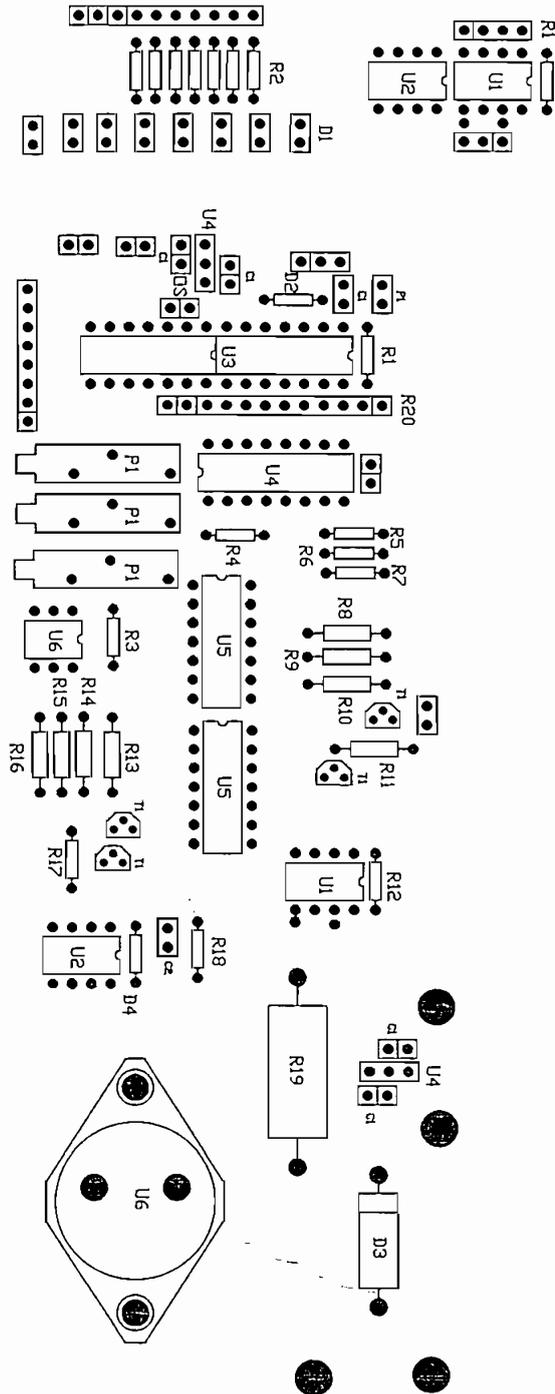


Figura B-4. Posición física de los elementos en la placa

Tabla B-1 Lista de Componentes

ELEMENTO	VALOR	DESCRIPCION
R1	10 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R2, R3,R5,R6,R7	330 $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R4	0.98 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R8	0.9 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R9	54 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R10	4.2 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R11	1 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R12	1.5 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R13	1 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R14, R16	100 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R15	20 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R17	0.1 K $\Omega$	Resistencia de ½ w
R18	20 K $\Omega$	Resistencia de ¼ w
R19	0.005 $\Omega$	Resistencia de 5 w
R20	10 K $\Omega$	Banco de 10 resistencias de ¼ w
U1	AD627	Amplificador de Instrumentación
U2	LM358	Amplificador Operacional
U3	PIC16F873	Microcontrolador PIC (28 Patitas)
U4	ECG3221	Optoacoplador cuádruple
U5	LM324	Amplificador Operacional cuádruple
U6	Motorota 8744	Transistor de Potencia NPN (Máx 7A)
P1	1 K $\Omega$	Potenciómetro de precisión
C1	0.1 $\mu$ F	Condensador Cerámico
C2	0.47 $\mu$ F	Condensador Cerámico
T1	2N3904	Transistor de señal NPN
OS	4 MHz	Oscilador
D1	ECG3007	Leds
D2	1N4733	Diodo Zener 5.1 V
D3	ECG581	Diodo de recuperación Rápida

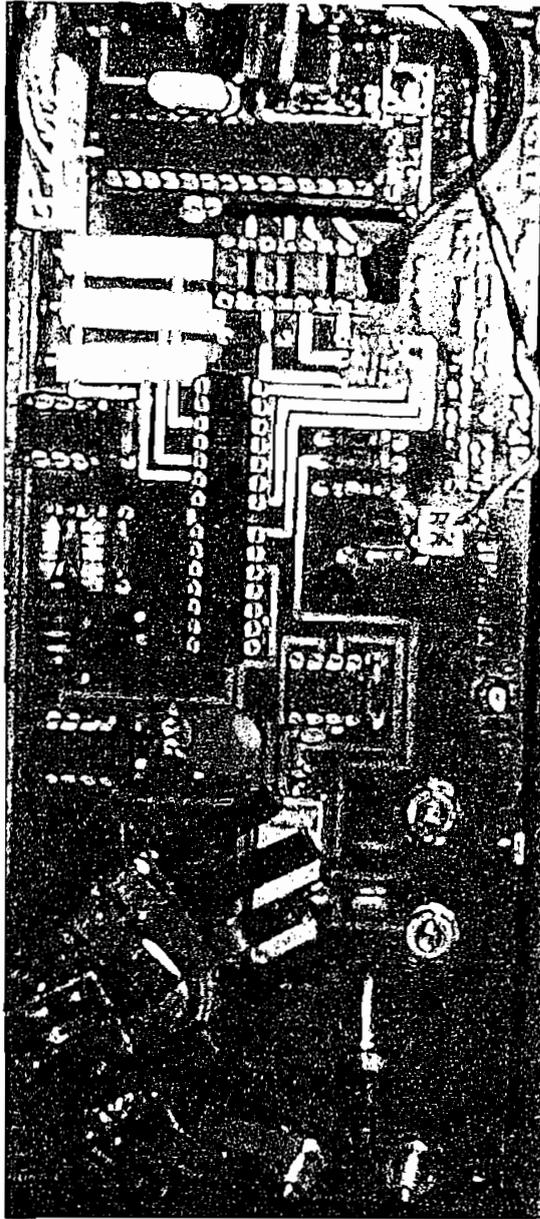


Figura B-5. Placa Final

**ANEXO C**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

### FEATURES

- Micropower, 85  $\mu$ A Max Supply Current
- Wide Power Supply Range (+2.2 V to  $\pm$ 18 V)
- Easy to Use
  - Gain Set with One External Resistor
  - Gain Range 5 (No Resistor) to 1,000
- Higher Performance than Discrete Designs
- Rail-to-Rail Output Swing
- High Accuracy DC Performance
  - 0.10% Gain Accuracy ( $G = +5$ ) (AD627A)
  - 10 ppm Gain Drift ( $G = +5$ )
  - 125  $\mu$ V Max Input Offset Voltage (AD627B)
  - 200  $\mu$ V Max Input Offset Voltage (AD627A)
  - 1  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Max Input Offset Voltage Drift (AD627B)
  - 3  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C Max Input Offset Voltage Drift (AD627A)
  - 10 nA Max Input Bias Current
- Noise: 38 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  RTI Noise @ 1 kHz ( $G = +100$ )
- Excellent AC Specifications
  - 77 dB Min CMRR ( $G = +5$ ) (AD627A)
  - 83 dB Min CMRR ( $G = +5$ ) (AD627B)
  - 80 kHz Bandwidth ( $G = +5$ )
  - 135  $\mu$ s Settling Time to 0.01% ( $G = +5$ , 5 V Step)

### APPLICATIONS

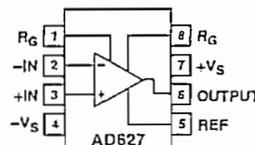
- 4 mA-to-20 mA Loop Powered Applications
- Low Power Medical Instrumentation—ECG, EEG
- Transducer Interfacing
- Thermocouple Amplifiers
- Industrial Process Controls
- Low Power Data Acquisition
- Portable Battery Powered Instruments

### PRODUCT DESCRIPTION

The AD627 is an integrated, micropower, instrumentation amplifier that delivers rail-to-rail output swing on single and dual (+2.2 V to  $\pm$ 18 V) supplies. The AD627 provides the user with excellent ac and dc specifications while operating at only 85  $\mu$ A max.

The AD627 offers superior user flexibility by allowing the user to set the gain of the device with a single external resistor, and by conforming to the 8-lead industry standard pinout configuration. With no external resistor, the AD627 is configured for a gain of 5. With an external resistor, it can be programmed for gains of up to 1000.

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM 8-Lead Plastic DIP (N) and SOIC (R)



Wide supply voltage range (+2.2 V to  $\pm$ 18 V), and micropower current consumption make the AD627 a perfect fit for a wide range of applications. Single supply operation, low power consumption and rail-to-rail output swing make the AD627 ideal for battery powered applications. Its rail-to-rail output stage maximizes dynamic range when operating from low supply voltages. Dual supply operation ( $\pm$ 15 V) and low power consumption make the AD627 ideal for industrial applications, including 4 mA-to-20 mA loop-powered systems.

The AD627 does not compromise performance, unlike other micropower instrumentation amplifiers. Low voltage offset, offset drift, gain error, and gain drift keep dc errors to a minimum in the users system. The AD627 also holds errors over frequency to a minimum by providing excellent CMRR over frequency. Line noise, as well as line harmonics, will be rejected, since the CMRR remains high up to 200 Hz.

The AD627 provides superior performance, uses less circuit board area and does it for a lower cost than micropower discrete designs.

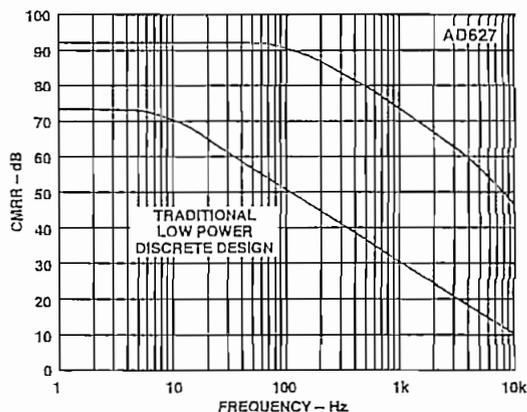


Figure 1. CMRR vs. Frequency,  $\pm$ 5  $V_S$ , Gain = +5

### REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

# AD627—SPECIFICATIONS

**SINGLE SUPPLY** (Typical @ 25°C Single Supply,  $V_S = 3\text{ V}$  and  $5\text{ V}$  and  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ , unless otherwise noted.)

Model Specification	Conditions	AD627A			AD627B			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>GAIN</b>								
Gain Range	$G = +5 + (200\text{ k}\Omega/R_G)$	5		1000	5		1000	V/V
Gain Error <sup>1</sup>	$V_{OUT} = (-V_S) + 0.1$ to $(+V_S) - 0.15$							%
$G = +5$			0.03	0.10		0.01	0.06	%
$G = +10$			0.15	0.35		0.10	0.25	%
$G = +100$			0.15	0.35		0.10	0.25	%
$G = +1000$			0.50	0.70		0.25	0.35	%
Nonlinearity								ppm
$G = +5$			10	100		10	100	ppm
$G = +100$			20	100		20	100	ppm
Gain vs. Temperature <sup>1</sup>								ppm/°C
$G = +5$			10	20		10	20	ppm/°C
$G > 5$			-75			-75		ppm/°C
<b>VOLTAGE OFFSET</b>								
Input Offset, $V_{OSI}$ <sup>2</sup>	$V_{CM} = V_{REF} = +V_S/2$		50	250		25	150	$\mu\text{V}$
Over Temperature				445			215	$\mu\text{V}$
Average TC			0.1	3		0.1	1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, $V_{OSO}$				1000			500	$\mu\text{V}$
Over Temperature				1650			1150	$\mu\text{V}$
Average TC			2.5	10		2.5	10	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSRR)								dB
$G = +5$		86	100		86	100		dB
$G = +10$		100	120		100	120		dB
$G = +100$		110	125		110	125		dB
$G = +1000$		110	125		110	125		dB
<b>INPUT CURRENT</b>								
Input Bias Current			3	10		3	10	nA
Over Temperature				15			15	nA
Average TC			20			20		pA/°C
Input Offset Current			0.3	1		0.3	1	nA
Over Temperature				2			2	nA
Average TC			1			1		pA/°C
<b>INPUT</b>								
Input Impedance								$G\Omega_{  }\text{pF}$
Differential			20  2			20  2		$G\Omega_{  }\text{pF}$
Common-Mode			20  2			20  2		$G\Omega_{  }\text{pF}$
Input Voltage Range <sup>3</sup>	$V_S = 2.2\text{ V}$ to $36\text{ V}$	$(-V_S) - 0.1$		$(+V_S) - 1$	$(-V_S) - 0.1$		$(+V_S) - 1$	V
Common-Mode Rejection <sup>3</sup>	$V_{REF} = V_S/2$							dB
Ratio DC to 60 Hz with 1 k $\Omega$ Source Imbalance								dB
$G = +5$	$V_S = 3\text{ V}, V_{CM} = 0\text{ V}$ to $1.9\text{ V}$	77	90		83	96		dB
$G = +5$	$V_S = 5\text{ V}, V_{CM} = 0\text{ V}$ to $3.7\text{ V}$	77	90		83	96		dB
<b>OUTPUT</b>								
Output Swing	$R_L = 20\text{ k}\Omega$ $R_L = 100\text{ k}\Omega$	$(-V_S) + 25$ $(-V_S) + 7$		$(+V_S) - 70$ $(+V_S) - 25$	$(-V_S) + 25$ $(-V_S) + 7$		$(+V_S) - 70$ $(+V_S) - 25$	mV mV
Short-Circuit Current	Short-Circuit to Ground		$\pm 25$		$\pm 25$			mA
<b>DYNAMIC RESPONSE</b>								
Small Signal -3 dB Bandwidth								kHz
$G = +5$			80			80		kHz
$G = +100$			3			3		kHz
$G = +1000$			0.4			0.4		kHz
Slew Rate			+0.05/-0.07			+0.05/-0.07		V/ $\mu\text{s}$
Settling Time to 0.01%	$V_S = 3\text{ V}, 1.5\text{ V}$ Output Step							$\mu\text{s}$
$G = +5$			65			65		$\mu\text{s}$
$G = +100$			290			290		$\mu\text{s}$
Settling Time to 0.01%	$V_S = 5\text{ V}, 2.5\text{ V}$ Output Step							$\mu\text{s}$
$G = +5$			85			85		$\mu\text{s}$
$G = +100$			330			330		$\mu\text{s}$
Overload Recovery	50% Input Overload		3			3		$\mu\text{s}$

## NOTES

<sup>1</sup>Does not include effects of external resistor  $R_G$ .

<sup>2</sup>See Table III for total RTI errors.

<sup>3</sup>See Applications section for input range, gain range and common-mode range.

Specifications subject to change without notice.

**DUAL SUPPLY** (Typical @ 25°C Dual Supply,  $V_S = \pm 5\text{ V}$  and  $\pm 15\text{ V}$  and  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ , unless otherwise noted.)

Model Specification	Conditions	AD627A			AD627B			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>GAIN</b>	$G = +5 + (200\text{ k}\Omega/R_G)$							
Gain Range		5		1000	5		1000	V/V
Gain Error <sup>1</sup>	$V_{OUT} = (-V_S) + 0.1$ to $(+V_S) - 0.15$							
$G = +5$			0.03	0.10		0.01	0.06	%
$G = +10$			0.15	0.35		0.10	0.25	%
$G = +100$			0.15	0.35		0.10	0.25	%
$G = +1000$			0.50	0.70		0.25	0.35	%
Nonlinearity								
$G = +5$	$V_S = \pm 5\text{ V}/\pm 15\text{ V}$		10/25	100		10/25	100	ppm
$G = +100$	$V_S = \pm 5\text{ V}/\pm 15\text{ V}$		10/15	100		10/15	100	ppm
Gain vs. Temperature <sup>1</sup>								
$G = +5$			10	20		10	20	ppm/°C
$G > 5$			-75			-75		ppm/°C
<b>VOLTAGE OFFSET</b>	Total RTI Error = $V_{OS1} + V_{OSOIC}$							
Input Offset, $V_{OS1}$ <sup>2</sup>			25	200		25	125	$\mu\text{V}$
Over Temperature	$V_{CM} = V_{REF} = 0\text{ V}$			395			190	$\mu\text{V}$
Average TC			0.1	3		0.1	1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, $V_{OSO}$				1000			500	$\mu\text{V}$
Over Temperature				1700			1100	$\mu\text{V}$
Average TC			2.5	10		2.5	10	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSRR)								
$G = +5$		86	100		86	100		dB
$G = +10$		100	120		100	120		dB
$G = +100$		110	125		110	125		dB
$G = +1000$		110	125		110	125		dB
<b>INPUT CURRENT</b>								
Input Bias Current			2	10		2	10	nA
Over Temperature				15			15	nA
Average TC			20			20		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current			0.3	1		0.3	1	nA
Over Temperature				5			5	nA
Average TC			5			5		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
<b>INPUT</b>								
Input Impedance								
Differential			20  2			20  2		$G\Omega  \text{pF}$
Common-Mode			20  2			20  2		$G\Omega  \text{pF}$
Input Voltage Range <sup>3</sup>	$V_S = \pm 1.1\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$		$(-V_S) - 0.1$	$(+V_S) - 1$		$(-V_S) - 0.1$	$(+V_S) - 1$	V
Common-Mode Rejection <sup>3</sup>								
Ratio DC to 60 Hz with 1 k $\Omega$ Source Imbalance								
$G = +5-1000$	$V_S = \pm 5\text{ V}, V_{CM} = -4\text{ V}$ to $+3.0\text{ V}$	77	90		83	96		dB
$G = +5-1000$	$V_S = \pm 15\text{ V}, V_{CM} = -12\text{ V}$ to $+10.9\text{ V}$	77	90		83	96		dB
<b>OUTPUT</b>								
Output Swing	$R_L = 20\text{ k}\Omega$		$(-V_S) + 25$	$(+V_S) - 70$		$(-V_S) + 25$	$(+V_S) - 70$	mV
	$R_L = 100\text{ k}\Omega$		$(-V_S) + 7$	$(+V_S) - 25$		$(-V_S) + 7$	$(+V_S) - 25$	mV
Short-Circuit Current	Short Circuit to Ground		$\pm 25$			$\pm 25$		mA
<b>DYNAMIC RESPONSE</b>								
Small Signal -3 dB Bandwidth								
$G = +5$			80			80		kHz
$G = +100$			3			3		kHz
$G = +1000$			0.4			0.4		kHz
Slew Rate			+0.05/-0.06			+0.05/-0.06		V/ $\mu\text{s}$
Settling Time to 0.01%	$V_S = \pm 5\text{ V}, +5\text{ V}$ Output Step							$\mu\text{s}$
$G = +5$			135			135		$\mu\text{s}$
$G = +100$			350			350		$\mu\text{s}$
Settling Time to 0.01%	$V_S = \pm 15\text{ V}, +15\text{ V}$ Output Step							$\mu\text{s}$
$G = +5$			330			330		$\mu\text{s}$
$G = +100$			560			560		$\mu\text{s}$
Overload Recovery	50% Input Overload		3			3		$\mu\text{s}$

## NOTES

<sup>1</sup>Does not include effects of external resistor  $R_G$ .<sup>2</sup>See Table III for total RTI errors.<sup>3</sup>See Applications section for input range, gain range and common-mode range.

Specifications subject to change without notice.

# AD627—SPECIFICATIONS

## BOTH DUAL AND SINGLE SUPPLIES

Model Specification	Conditions	AD627A			AD627B			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>NOISE</b>								
Voltage Noise, 1 kHz	Total RTI Noise = $\sqrt{(en_i)^2 + (en_o/G)^2}$  f = 1 kHz							
Input, Voltage Noise, en <sub>i</sub>			38		38			nV/√Hz
Output, Voltage Noise, en <sub>o</sub>			177		177			nV/√Hz
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz								
G = +5				1.2		1.2		μV p-p
G = +1000				0.56		0.56		μV p-p
Current Noise			50		50		fA/√Hz	
0.1 Hz to 10 Hz			1.0		1.0		pA p-p	
<b>REFERENCE INPUT</b>								
R <sub>IN</sub>	R <sub>G</sub> = ∞		125		125			kΩ
Gain to Output			1		1			
Voltage Range <sup>1</sup>								
<b>POWER SUPPLY</b>								
Operating Range	Dual Supply	±1.1		±18	±1.1		±18	V
	Single Supply	2.2		36	2.2		36	V
Quiescent Current			60	85		60	85	μA
Over Temperature			200		200			nA/°C
<b>TEMPERATURE RANGE</b>								
For Specified Performance		-40		+85	-40		+85	°C

### NOTES

<sup>1</sup>See Applications section for input range, gain range and common-mode range. Specifications subject to change without notice.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>1</sup>

Supply Voltage	±18 V
Internal Power Dissipation <sup>2</sup>	
Plastic Package (N)	1.3 W
Small Outline Package (R)	0.8 W
-IN, +IN	-V <sub>S</sub> - 20 V to +V <sub>S</sub> + 20 V
Common-Mode Input Voltage	-V <sub>S</sub> - 20 V to +V <sub>S</sub> + 20 V
Differential Input Voltage (+IN - (-IN))	+V <sub>S</sub> - (-V <sub>S</sub> )
Output Short Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range N, R	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range	-40°C to +85°C
Lead Temperature Range (Soldering 10 sec)	300°C

### NOTES

<sup>1</sup>Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

<sup>2</sup>Specification is for device in free air.

8-Lead Plastic DIP Package: θ<sub>JA</sub> = 90°C/W.

8-Lead SOIC Package: θ<sub>JA</sub> = 155°C/W.

### ORDERING GUIDE

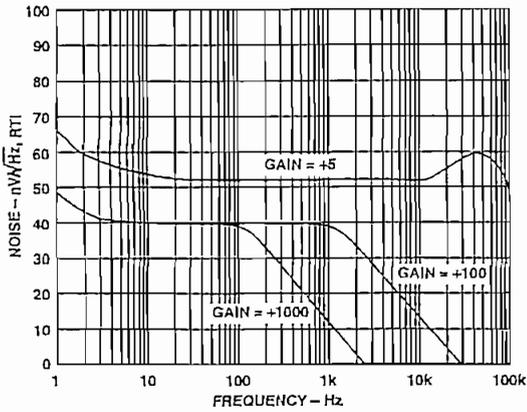
Model	Temperature Range	Package Descriptions	Package Options
AD627AN	-40°C to +85°C	Plastic DIP	N-8
AD627AR	-40°C to +85°C	Small Outline (SOIC)	SO-8
AD627AR-REEL	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC 13" Reel	SO-8
AD627AR-REEL7	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC 7" Reel	SO-8
AD627BN	-40°C to +85°C	Plastic DIP	N-8
AD627BR	-40°C to +85°C	Small Outline (SOIC)	SO-8
AD627BR-REEL	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC 13" Reel	SO-8
AD627BR-REEL7	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC 7" Reel	SO-8

### CAUTION

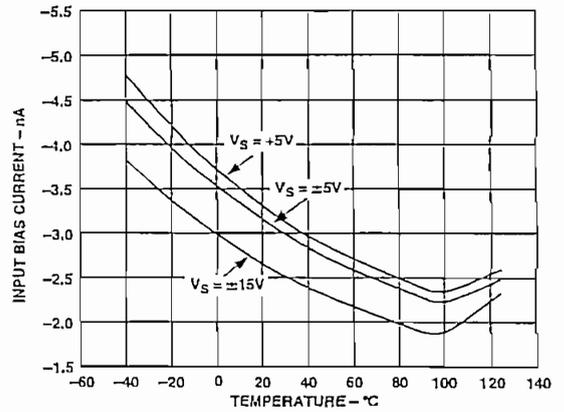
ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the AD627 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high-energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



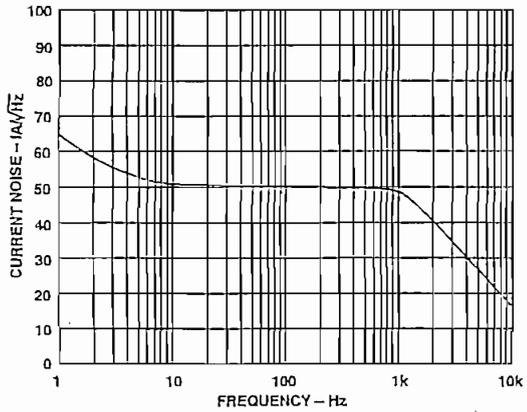
Typical Performance Characteristics (@ 25°C  $V_S = \pm 5\text{ V}$ ,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$  unless otherwise noted.)



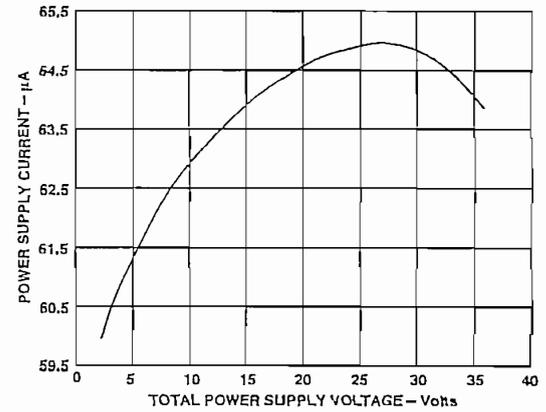
TPC 1. Voltage Noise Spectral Density vs. Frequency



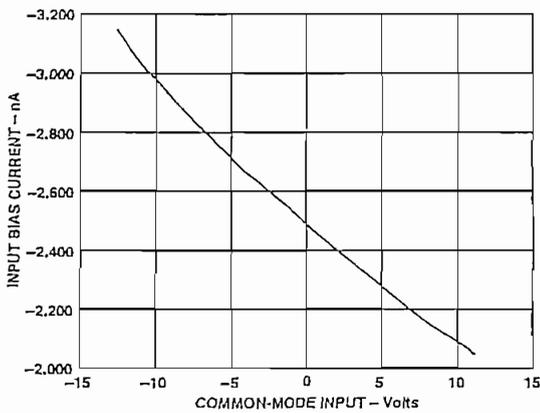
TPC 4. Input Bias Current vs. Temperature



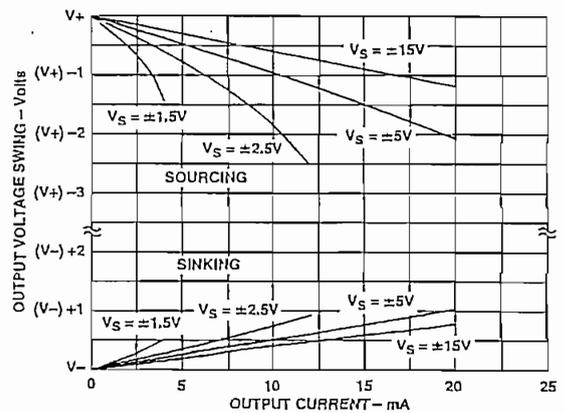
TPC 2. Current Noise Spectral Density vs. Frequency



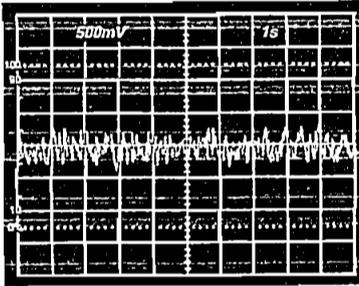
TPC 5. Supply Current vs. Supply Voltage



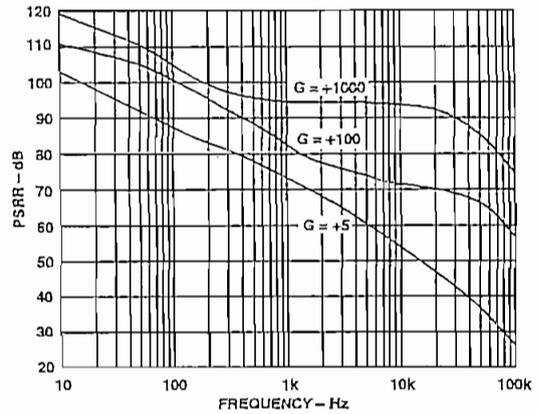
TPC 3.  $I_{BIAS}$  vs. CMV,  $V_S = \pm 15\text{ V}$



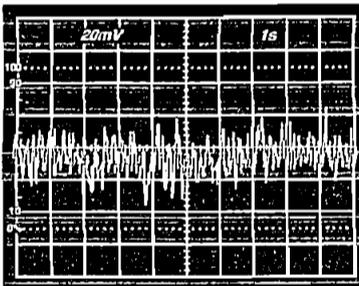
TPC 6. Output Voltage Swing vs. Output Current



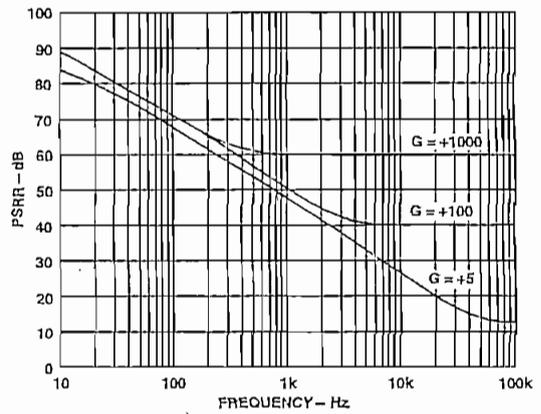
TPC 7. 0.1 Hz to 10 Hz Current Noise (0.71 pA/DIV)



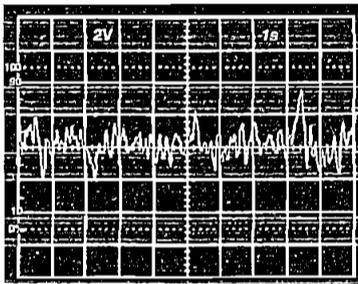
TPC 10. Positive PSRR vs. Frequency, ±5 V



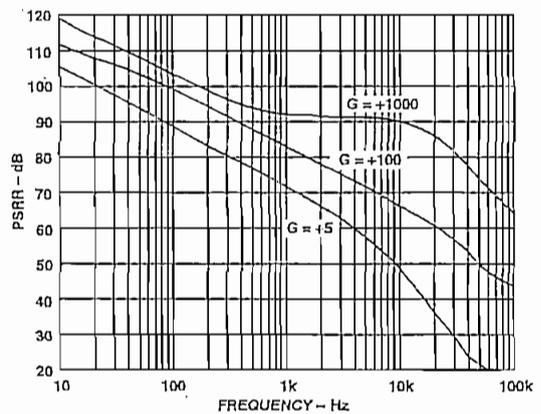
TPC 8. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (400 nV/DIV), G = +5



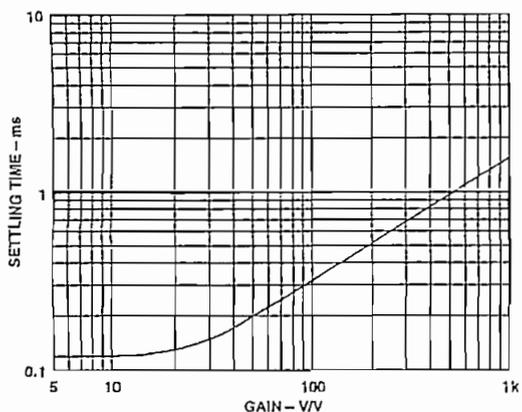
TPC 11. Negative PSRR vs. Frequency, ±5 V



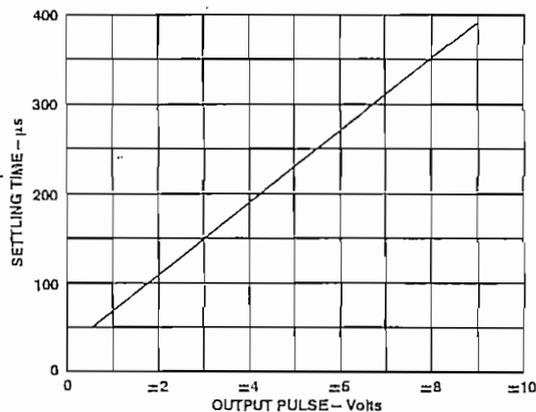
TPC 9. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (200 nV/DIV), G = +1000



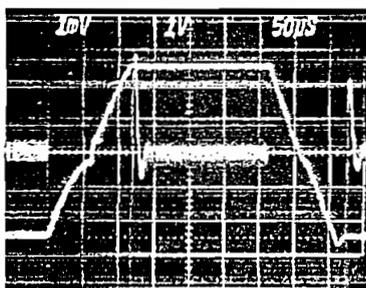
TPC 12. Positive PSRR vs. Frequency ( $V_S = 5 V, 0 V$ )



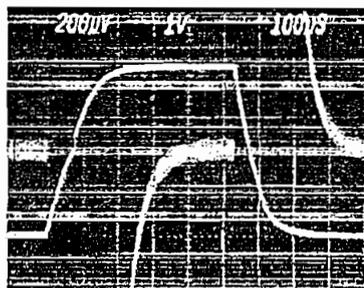
TPC 13. Settling Time to 0.01% vs. Gain for a 5 V Step at Output,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ ,  $C_L = 100\text{ pF}$ ,  $V_S = \pm 5\text{ V}$



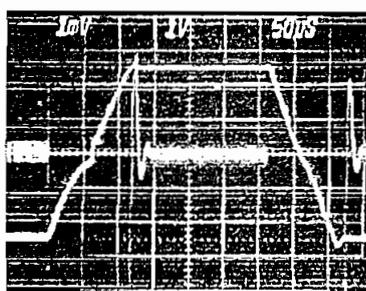
TPC 16. Settling Time to 0.01% vs. Output Swing,  $G = +5$ ,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ ,  $C_L = 100\text{ pF}$



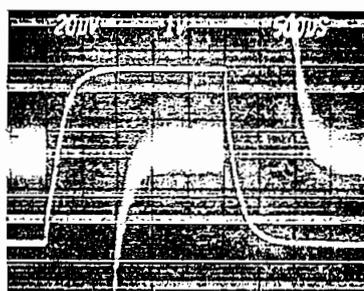
TPC 14. Large Signal Pulse Response and Settling Time,  $G = -5$ ,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ ,  $C_L = 100\text{ pF}$  ( $1.5\text{ mV} = 0.01\%$ )



TPC 17. Large Signal Pulse Response and Settling Time,  $G = -100$ ,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ ,  $C_L = 100\text{ pF}$  ( $100\text{ }\mu\text{V} = 0.01\%$ )

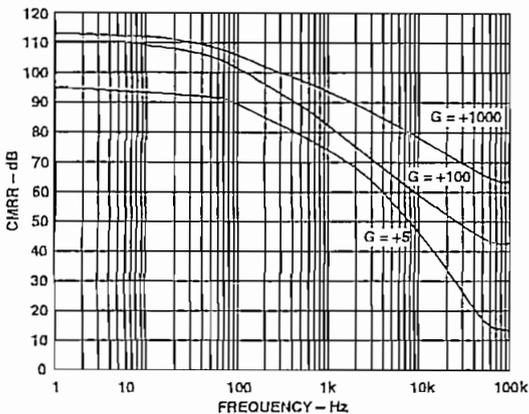


TPC 15. Large Signal Pulse Response and Settling Time,  $G = -10$ ,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ ,  $C_L = 100\text{ pF}$  ( $1.0\text{ mV} = 0.01\%$ )

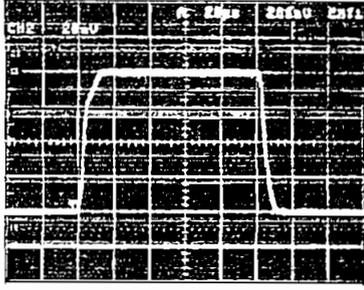


TPC 18. Large Signal Pulse Response and Settling Time,  $G = -1000$ ,  $R_L = 20\text{ k}\Omega$ ,  $C_L = 100\text{ pF}$  ( $10\text{ }\mu\text{V} = 0.01\%$ )

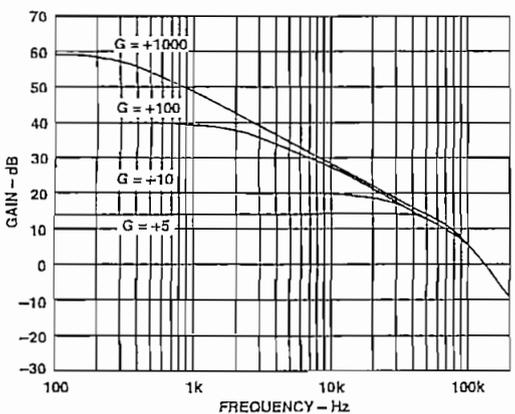
# AD627



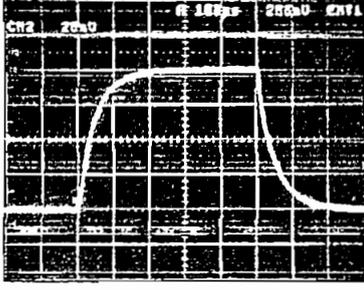
TPC 19. CMRR vs. Frequency,  $\pm 5 V_S$ , (CMV = 200 mV p-p)



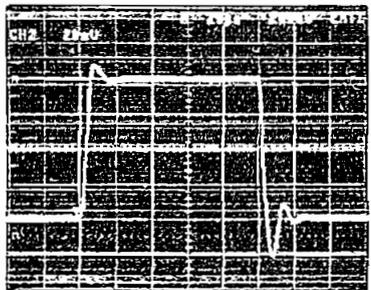
TPC 22. Small Signal Pulse Response,  $G = +10$ ,  $R_L = 20 k\Omega$ ,  $C_L = 50 pF$



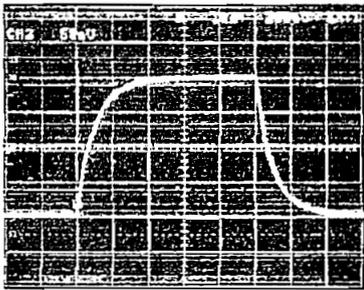
TPC 20. Gain vs. Frequency ( $V_S = 5 V$ ,  $0 V$ ),  $V_{REF} = 2.5 V$



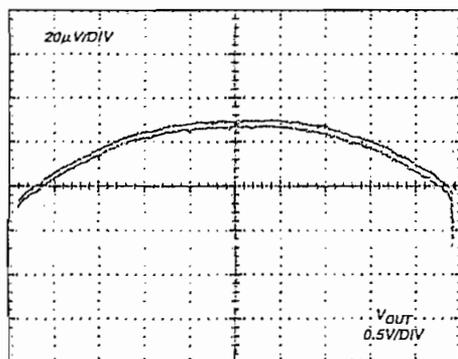
TPC 23. Small Signal Pulse Response,  $G = +100$ ,  $R_L = 20 k\Omega$ ,  $C_L = 50 pF$



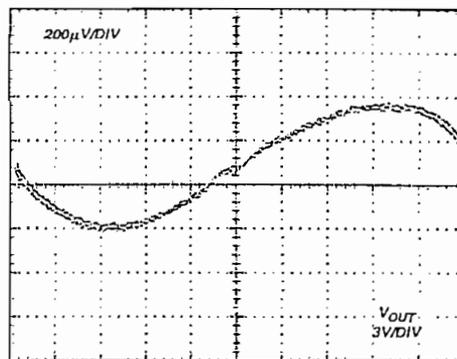
TPC 21. Small Signal Pulse Response,  $G = +5$ ,  $R_L = 20 k\Omega$ ,  $C_L = 50 pF$



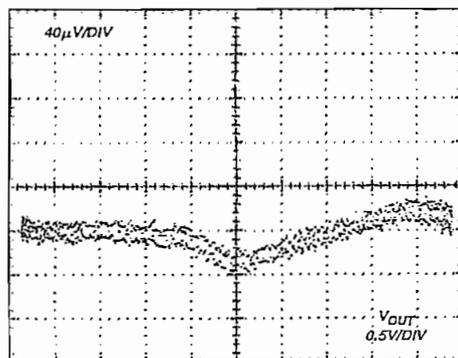
TPC 24. Small Signal Pulse Response,  $G = +1000$ ,  $R_L = 20 k\Omega$ ,  $C_L = 50 pF$



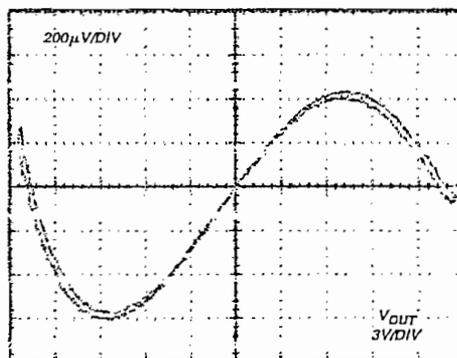
TPC 25. Gain Nonlinearity,  $V_S = \pm 2.5 \text{ V}$ ,  $G = +5$   
(4 ppm/DIV)



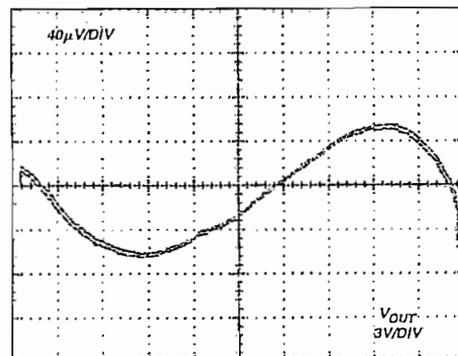
TPC 28. Gain Nonlinearity,  $V_S = \pm 15 \text{ V}$ ,  $G = +100$   
(7 ppm/DIV)



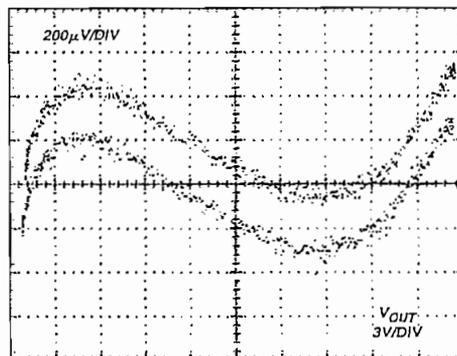
TPC 26. Gain Nonlinearity,  $V_S = \pm 2.5 \text{ V}$ ,  $G = +100$   
(8 ppm/DIV)



TPC 29. Gain Nonlinearity,  $V_S = \pm 15 \text{ V}$ ,  $G = +5$  (7 ppm/DIV)



TPC 27. Gain Nonlinearity,  $V_S = \pm 15 \text{ V}$ ,  $G = +5$   
(1.5 ppm/DIV)



TPC 30. Gain Nonlinearity,  $V_S = \pm 15 \text{ V}$ ,  $G = +100$  (7 ppm/DIV)

# AD627

## THEORY OF OPERATION

The AD627 is a true "instrumentation amplifier" built using two feedback loops. Its general properties are similar to those of the classic "two op amp" instrumentation amplifier configuration, and can be regarded as such, but internally the details are somewhat different. The AD627 uses a modified "current feedback" scheme which, coupled with interstage feedforward frequency compensation, results in a much better CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) at frequencies above dc (notably the line frequency of 50 Hz–60 Hz) than might otherwise be expected of a low power instrumentation amplifier.

Referring to the diagram, (Figure 2), A1 completes a feedback loop which, in conjunction with V1 and R5, forces a constant collector current in Q1. Assume that the gain-setting resistor ( $R_G$ ) is not present for the moment. Resistors R2 and R1 complete the loop and force the output of A1 to be equal to the voltage on the inverting terminal with a gain of (almost exactly) 1.25. A nearly identical feedback loop completed by A2 forces a current in Q2 which is substantially identical to that in Q1, and A2 also provides the output voltage. When both loops are balanced, the gain from the noninverting terminal to  $V_{OUT}$  is equal to 5, whereas the gain from the output of A1 to  $V_{OUT}$  is equal to -4. The inverting terminal gain of A1, (1.25) times the gain of A2, (-4) makes the gain from the inverting and noninverting terminals equal.

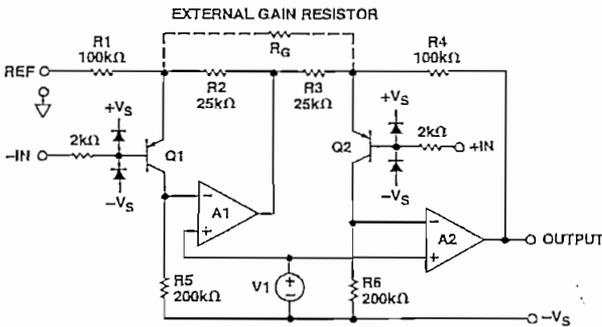


Figure 2. Simplified Schematic

The differential mode gain is equal to  $1 + R4/R3$ , nominally five and is factory trimmed to 0.01% final accuracy. Adding an external gain setting resistor ( $R_G$ ) increases the gain by an amount equal to  $(R4 + R1)/R_G$ . The output voltage of the AD627 is given by the following equation.

$$V_{OUT} = [V_{IN(+)} - V_{IN(-)}] \times (5 + 200 \text{ k}\Omega/R_G) + V_{REF}$$

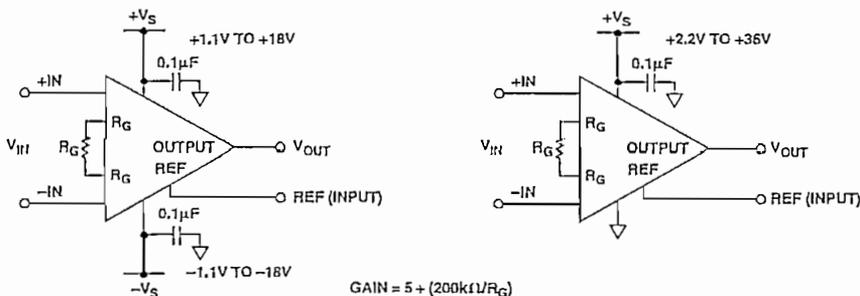


Figure 3. Basic Connections for Single and Dual Supplies

Laser trims are performed on R1 through R4 to ensure that their values are as close as possible to the absolute values in the gain equation. This ensures low gain error and high common-mode rejection at all practical gains.

## USING THE AD627

### Basic Connections

Figure 3 shows the basic connection circuit for the AD627. The  $+V_S$  and  $-V_S$  terminals are connected to the power supply. The supply can either be bipolar ( $V_S = \pm 1.1 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$ ) or single supply ( $-V_S = 0 \text{ V, } +V_S = +2.2 \text{ V to } +36 \text{ V}$ ). The power supplies should be capacitively decoupled close to the devices power pins. For best results, use surface mount  $0.1 \mu\text{F}$  ceramic chip capacitors.

The input voltage, which can be either single ended (tie either  $-IN$  or  $+IN$  to ground) or differential. The difference between the voltage on the inverting and noninverting pins is amplified by the programmed gain. The programmed gain is set by the gain resistor (see below). The output signal appears as the voltage difference between the output pin and the externally applied voltage on the REF pin (see below).

### Setting the Gain

The AD627's gain is resistor programmed by  $R_G$ , or more precisely, by whatever impedance appears between Pins 1 and 8. The gain is set according to the equation:

$$\text{Gain} = 5 + (200 \text{ k}\Omega/R_G)$$

or

$$R_G = 200 \text{ k}\Omega(\text{Gain} - 5)$$

It follows that the minimum achievable gain is 5 (for  $R_G = \infty$ ). With an internal gain accuracy of between 0.05% and 0.7% depending on gain and grade, a 0.1% external gain resistor would seem appropriate to prevent significant degradation of the overall gain error. However, 0.1% resistors are not available in a wide range of values and are quite expensive. Table I shows recommended gain resistor values using 1% resistors. For all gains, the size of the gain resistor is conservatively chosen as the closest value from the standard resistor table that is higher than the ideal value. This results in a gain that is always slightly less than the desired gain. This prevents clipping of the signal at the output due to resistor tolerance.

The internal resistors on the AD627 have a negative temperature coefficient of  $-75 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  max for gains  $> 5$ . Using a gain resistor that also has a negative temperature coefficient of  $-75 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  or less will tend to reduce the overall circuit's gain drift.

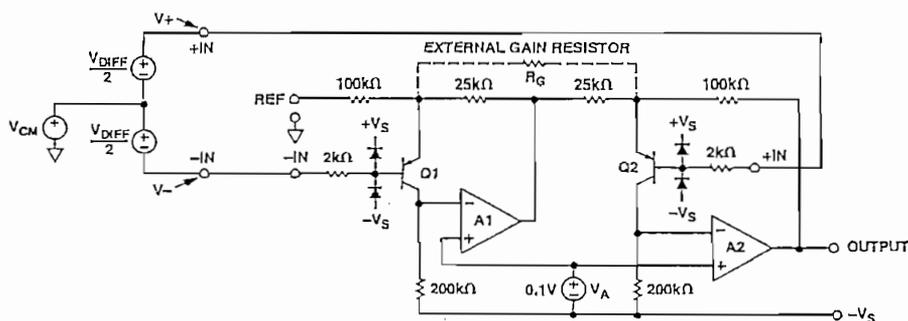


Figure 4. Amplifying Differential Signals with a Common-Mode Component

Table I. Recommended Values of Gain Resistors

Desired Gain	1% Std Table Value of $R_G$ , $\Omega$	Resulting Gain
5	$\infty$	5.00
6	200 k	6.00
7	100 k	7.00
8	68.1 k	7.94
9	51.1 k	8.91
10	40.2 k	9.98
15	20 k	15.00
20	13.7 k	19.60
25	10 k	25.00
30	8.06 k	29.81
40	5.76 k	39.72
50	4.53 k	49.15
60	3.65 k	59.79
70	3.09 k	69.72
80	2.67 k	79.91
90	2.37 k	89.39
100	2.1 k	100.24
200	1.05 k	195.48
500	412	490.44
1000	205	980.61

#### Reference Terminal

The reference terminal potential defines the zero output voltage and is especially useful when the load does not share a precise ground with the rest of the system. It provides a direct means of injecting a precise offset to the output. The reference terminal is also useful when bipolar signals are being amplified as it can be used to provide a virtual ground voltage.

Since the AD627 output voltage is developed with respect to the potential on the reference terminal, it can solve many grounding problems by simply tying the REF pin to the appropriate "local ground." The REF pin should however be tied to a low impedance point for optimal CMR.

#### Input Range Limitations in Single Supply Applications

In general, the maximum achievable gain is determined by the available output signal range. However, in single supply applications where the input common-mode voltage is close to or equal to zero, some limitations on the gain can be set. While the Input, Output and Reference Pins have ranges that are nominally defined on the specification pages, there is a mutual interdependence between the voltage ranges on these pins. Figure 4 shows the simplified schematic of the AD627, driven by a differential voltage  $V_{DIFF}$  which has a common-mode component,  $V_{CM}$ . The voltage on the output of op amp A1 is a function of  $V_{DIFF}$ ,  $V_{CM}$ , the voltage on the REF pin and the programmed gain. This voltage is given by the equation:

$$V_{A1} = 1.25 (V_{CM} + 0.5 V) - 0.25 V_{REF} - V_{DIFF} (25 k\Omega R_G - 0.625)$$

We can also express the voltage on A1 as a function of the actual voltages on the -IN and +IN pins ( $V_-$  and  $V_+$ )

$$V_{A1} = 1.25 (V_- + 0.5 V) - 0.25 V_{REF} - (V_+ - V_-) 25 k\Omega R_G$$

A1's output is capable of swinging to within 50 mV of the negative rail and to within 200 mV of the positive rail. From either of the above equations, it is clear that an increasing  $V_{REF}$ , (while it acts as a positive offset at the output of the AD627), tends to decrease the voltage on A1. Figures 5 and 6 show the maximum voltages that can be applied to the REF pin, for a gain of five for both the single and dual supply cases. Raising the input common-mode voltage will increase the voltage on the output of A1. However, in single supply applications where the common-mode voltage is low, a differential input voltage or a voltage on REF that is too high can drive the output of A1 into the ground rail. Some low side headroom is added by virtue of both inputs being shifted upwards by about 0.5 V (i.e., by the  $V_{BE}$  of Q1 and Q2). The above equations can be used to check that the voltage on amplifier A1 is within its operating range.

Table II gives values for the maximum gains for various single supply input conditions. The resulting output swings shown refer to 0 V. The voltages on the REF pins has been set to either

Table II. Maximum Gain for Low Common-Mode Single Supply Applications

$V_{IN}$	REF Pin	Supply Voltage	$R_G$ (1% Tolerance)	Resulting Max Gain	Output Swing WRT 0 V
$\pm 100$ mV, $V_{CM} = 0$ V	2 V	5 V to 15 V	28.7 k $\Omega$	12.0	0.8 V to 3.2 V
$\pm 50$ mV, $V_{CM} = 0$ V	2 V	5 V to 15 V	10.7 k $\Omega$	23.7	0.8 V to 3.2 V
$\pm 10$ mV, $V_{CM} = 0$ V	2 V	5 V to 15 V	1.74 k $\Omega$	119.9	0.8 V to 3.2 V
$V_- = 0$ V, $V_+ = 0$ V to 1 V	1 V	10 V to 15 V	78.7 k $\Omega$	7.5	1 V to 8.5 V
$V_- = 0$ V, $V_+ = 0$ mV to 100 mV	1 V	5 V to 15 V	7.87 k $\Omega$	31	1 V to 4.1 V
$V_- = 0$ V, $V_+ = 0$ mV to 10 mV	1 V	5 V to 15 V	7.87 $\Omega$	259.1	1 V to 3.6 V

# AD627

2 V or 1 V to maximize the available gain and output swing. Note that in most cases, there is no advantage to increasing the single supply to greater than 5 V (the exception being an input range of 0 V to 1 V).

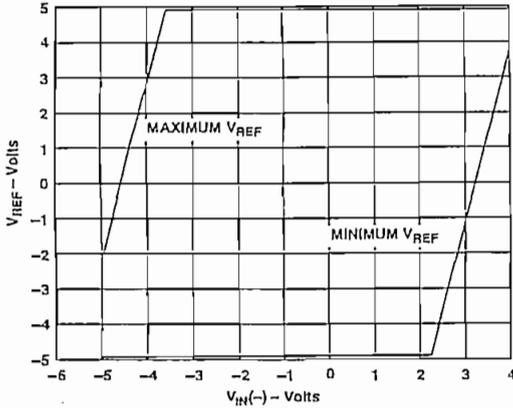


Figure 5. Reference Input Voltage vs. Negative Input Voltage,  $V_S = \pm 5$  V,  $G = +5$

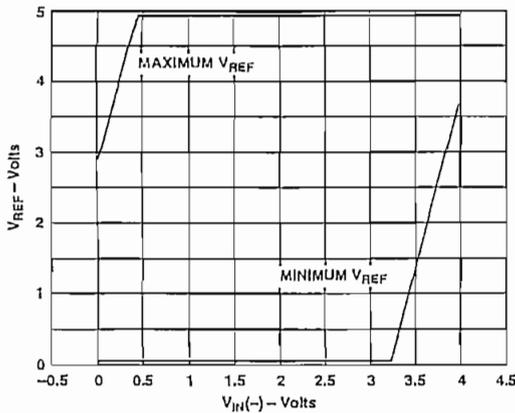


Figure 6. Reference Input Voltage vs. Negative Input Voltage,  $V_S = 5$  V,  $G = +5$

## Output Buffering

The AD627 is designed to drive loads of 20 k $\Omega$  or greater but can deliver up to 20 mA to heavier loads at lower output voltage swings (see TPC 6). If more than 20 mA of output current is required at the output, the AD627's output should be buffered with a precision op amp such as the OP113 as shown in Figure 7 (shown for the single supply case). This op amp can swing from 0 V to 4 V on its output while driving a load as small as 600  $\Omega$ .

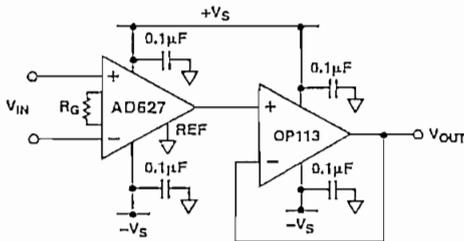


Figure 7. Output Buffering

## INPUT AND OUTPUT OFFSET ERRORS

The low errors of the AD627 are attributed to two sources, input and output errors. The output error is divided by  $G$  when referred to the input. In practice, the input errors dominate at high gains and the output errors dominate at low gains. The total offset error for a given gain is calculated as:

$$\text{Total Error RTI} = \text{Input Error} + (\text{Output Error}/\text{Gain})$$

$$\text{Total Error RTO} = (\text{Input Error} \times G) + \text{Output Error}$$

RTI offset errors and noise voltages for different gains are shown below in Table III.

Table III. RTI Error Sources

Gain	Max Total RTI Offset Error $\mu\text{V}$		Max Total RTI Offset Drift $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$		Total RTI Noise $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
	AD627A	AD627B	AD627A	AD627B	
+5	450	250	5	3	95
+10	350	200	4	2	66
+20	300	175	3.5	1.5	56
+50	270	160	3.2	1.2	53
+100	270	155	3.1	1.1	52
+500	252	151	3	1	52
+1000	251	151	3	1	52

## Make vs. Buy: A Typical Application Error Budget

The example in Figure 8 serves as a good comparison between the errors associated with an integrated and a discrete in amp implementation. A  $\pm 100$  mV signal from a resistive bridge (common-mode voltage = 2.5 V) is to be amplified. This example compares the resulting errors from a discrete two op amp in amp and from the AD627. The discrete implementation uses a four-resistor precision network (1% match, 50 ppm/ $^\circ\text{C}$  tracking).

The errors associated with each implementation are detailed in Table IV and show the integrated in amp to be more precise, both at ambient and over temperature. It should be noted that the discrete implementation is also more expensive. This is primarily due to the relatively high cost of the low drift precision resistor network.

Note, the input offset current of the discrete in amp implementation is the difference in the bias currents of the two op amps, not the offset currents of the individual op amps. Also, while the values of the resistor network are chosen so that the inverting and noninverting inputs of each op amp see the same impedance (about 350  $\Omega$ ), the offset current of each op amp will add an additional error which must be characterized.

## Errors Due to AC CMRR

In Table IV, the error due to common-mode rejection is the error that results from the common-mode voltage from the bridge 2.5 V. The ac error due to nonideal common-mode rejection cannot be calculated without knowing the size of the ac common-mode voltage (usually interference from 50 Hz/60 Hz mains frequencies).

A mismatch of 0.1% between the four gain setting resistors will determine the low frequency CMRR of a two op amp in amp. The plot in Figure 8 shows the practical results, at ambient temperature, of resistor mismatch. The CMRR of the circuit in Figure 9 (Gain = +11) was measured using four resistors which

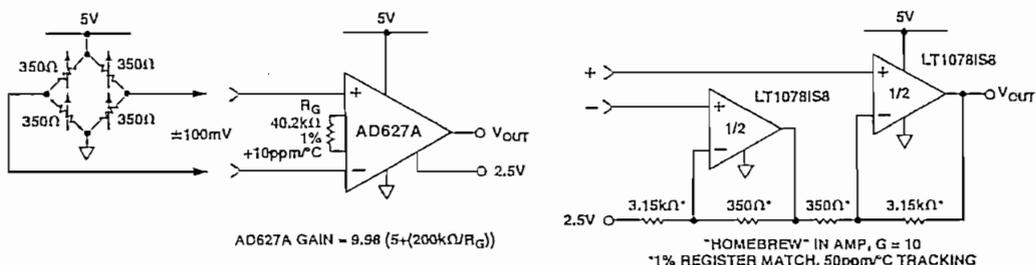


Figure 8. Make vs. Buy

Table IV. Make vs. Buy Error Budget

Error Source	AD627 Circuit Calculation	"Homebrew" Circuit Calculation	Total Error AD627-ppm	Total Error Homebrew-ppm
<b>ABSOLUTE ACCURACY at T<sub>A</sub> = 25°C</b>				
Total RTI Offset Voltage, mV	(250 μV + (1000 μV/10))/100 mV	(180 μV × 2)/100 mV	3500	3600
Input Offset Current, nA	1 nA × 350 Ω/100 mV	20 nA × 350 Ω/100 mV	3.5	70
Internal Offset Current (Homebrew Only)	Not Applicable	0.7 nA × 350 Ω/100 mV		2.45
CMRR, dB	77 dB → 141 ppm × 2.5 V/100 mV	(1% Match × 2.5 V)/10/100 mV	3531	25000
Gain	0.35% + 0.1%	1% Match	13500	10000
<b>DRIFT TO 85°C</b>			<b>Total Absolute Error</b>	<b>20535</b>
Gain Drift, ppm/°C	(-75 + 10) ppm/°C × 60°C	50 ppm/°C × 60°C	3900	3000
Total RTI Offset Voltage, mV/°C	(3.0 μV/°C + (10 μV/°C/10)) × 60°C/100 mV	(2 × 3.5 μV/°C × 60°C)/100 mV	2600	4200
Input Offset Current, pA/°C	(16 pA/°C × 350 Ω × 60°C)/100 mV	(33 pA/°C × 350 Ω × 60°C)/100 mV	3.5	7
<b>Total Drift Error</b>			<b>6504</b>	<b>7207</b>
<b>Grand Total Error</b>			<b>27039</b>	<b>45879</b>

had a mismatch of almost exactly 0.1% (R1 = 9999.5 Ω, R2 = 999.76 Ω, R3 = 1000.2 Ω, R4 = 9997.7 Ω). As expected the CMRR at dc was measured at about 84 dB (calculated value is 85 dB). However, as the frequency increases, the CMRR quickly degrades. For example, a 200 mV peak-peak harmonic of the mains frequency at 180 Hz would result in an output voltage of about 800 μV. To put this in context, a 12-bit data acquisition system with an input range of 0 V to 2.5 V, has an LSB weighting of 610 μV.

By contrast, the AD627 uses precision laser trimming of internal resistors along with patented CMR trimming to yield a higher dc CMRR and a wider bandwidth over which the CMRR is flat (see TPC 19).

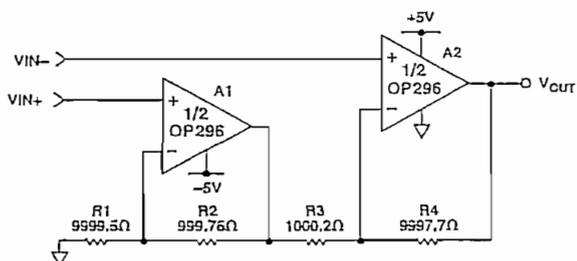


Figure 9. 0.1% Resistor Mismatch Example

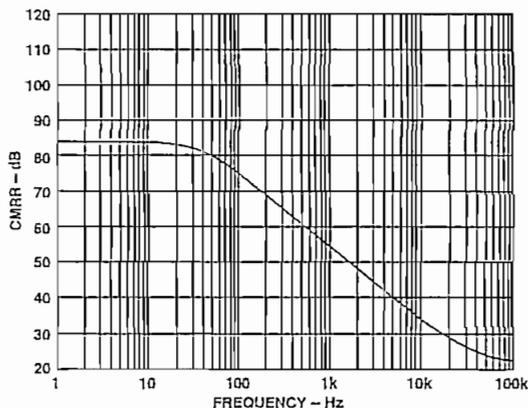


Figure 10. CMRR Over Frequency of Discrete In Amp in Figure 9

**Ground Returns for Input Bias Currents**  
 Input bias currents are those dc currents that must flow in order to bias the input transistors of an amplifier. These are usually transistor base currents. When amplifying "floating" input sources such as transformers, or ac-coupled sources, there must be a direct dc path into each input in order that the bias current can flow. Figure 11 shows how a bias current path can be provided for the case of transformer coupling, capacitive ac-coupling and for a thermocouple application.

# AD627

In dc-coupled resistive bridge applications, providing this path is generally not necessary as the bias current simply flows from the bridge supply, through the bridge and into the amplifier. However, if the impedance that the two inputs see are large, and differ by a large amount ( $>10\text{ k}\Omega$ ), the offset current of the input stage will cause dc errors comparable with the input offset voltage of the amplifier.

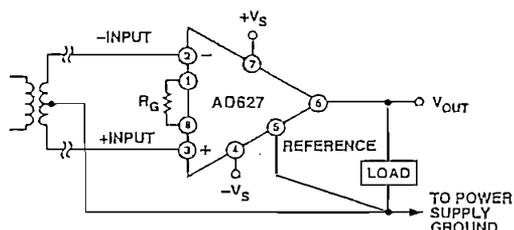


Figure 11a. Ground Returns for Bias Currents with Transformer Coupled Inputs

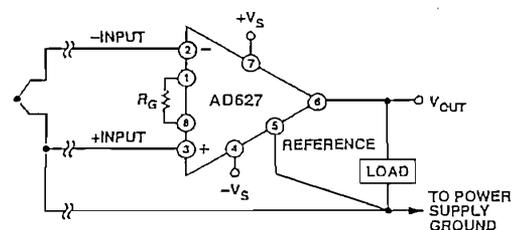


Figure 11b. Ground Returns for Bias Currents with Thermocouple Inputs

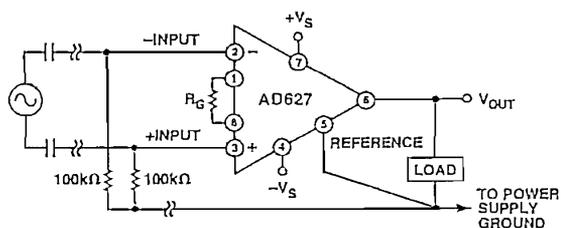


Figure 11c. Ground Returns for Bias Currents with AC Coupled Inputs

## Layout and Grounding

The use of ground planes is recommended to minimize the impedance of ground returns (and hence the size of dc errors). In order to isolate low level analog signals from a noisy digital environment, many data-acquisition components have separate analog and digital ground returns (Figure 12). All ground pins from mixed signal components such as analog-to-digital converters should be returned through the "high quality" analog ground plane. Digital ground lines of mixed signal components should also be returned through the analog ground plane. This may seem to break the rule of keeping analog and digital grounds separate. However, in general, there is also a requirement to keep the voltage difference between digital and analog grounds on a converter as small as possible (typically  $<0.3\text{ V}$ ). The increased noise, caused by the converter's digital return currents flowing through the analog ground plane, will generally be negligible. Maximum isolation between analog and digital is achieved by connecting the ground planes back at the supplies.

If there is only a single power supply available, it must be shared by both digital and analog circuitry. Figure 13 shows the how to minimize interference between the digital and analog circuitry. As in the previous case, separate analog and digital ground planes should be used (reasonably thick traces can be used as an alternative to a digital ground plane). These ground planes should be connected at the power supply's ground pin. Separate traces (or power planes) should be run from the power supply to the supply pins of the digital and analog circuits. Ideally each device should have its own power supply trace, but these can be shared by a number of devices as long as a single trace is not used to route current to both digital and analog circuitry.

## INPUT PROTECTION

As shown in the simplified schematic (Figure 2), both the inverting and noninverting inputs are clamped to the positive and negative supplies by ESD diodes. In addition to this a  $2\text{ k}\Omega$  series resistor on each input provides current limiting in the event of an overvoltage. These ESD diodes can tolerate a maximum continuous current of  $10\text{ mA}$ . So an overvoltage, (that is the amount by which input voltage exceeds the supply voltage), of  $\pm 20\text{ V}$  can be tolerated. This is true for all gains, and for power on and off. This last case is particularly important since the signal source and amplifier may be powered separately.

If the overvoltage is expected to exceed  $20\text{ V}$ , additional external series resistors current limiting resistors should be used to keep the diode current to below  $10\text{ mA}$ .

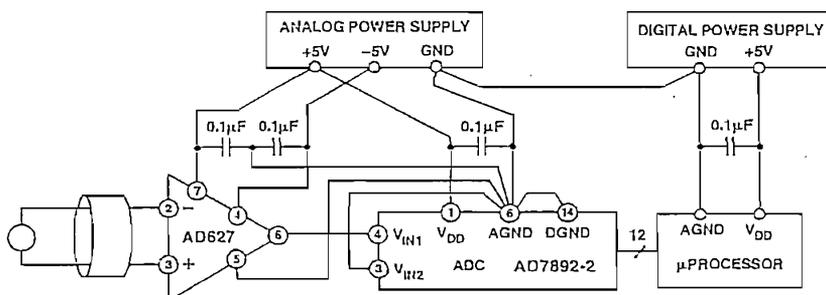
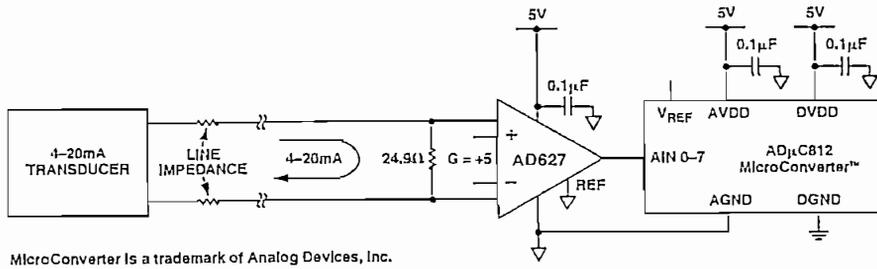


Figure 12. Optimal Grounding Practice for a Bipolar Supply Environment with Separate Analog and Digital Supplies





MicroConverter is a trademark of Analog Devices, Inc.

Figure 16. A 4 mA-to-20 mA Receiver Circuit

A 4 mA-to-20 mA Single Supply Receiver

Figure 16 shows how a signal from a 4 mA-to-20 mA transducer can be interfaced to the ADµC812, a 12-bit ADC with an embedded microcontroller. The signal from a 4 mA-to-20 mA transducer is single ended. This initially suggests the need for a simple shunt resistor, to convert the current to a voltage at the high impedance analog input of the converter. However, any line resistance in the return path (to the transducer) will add a current dependent offset error. So the current must be sensed differentially.

In this example, a 24.9 Ω shunt resistor generates a maximum differential input voltage to the AD627 of between 100 mV (for 4 mA in) and 500 mV (for 20 mA in). With no gain resistor present, the AD627 amplifies the 500 mV input voltage by a factor of 5, to 2.5 V, the full-scale input voltage of the ADC. The zero current of 4 mA corresponds to a code of 819 and the LSB size is 4.9 mA.

A Thermocouple Amplifier

Because the common-mode input range of the AD627 extends 0.1 V below ground, it is possible to measure small differential signals which have low, or no, common-mode component. Figure 17 shows a thermocouple application where one side of the J-type thermocouple is grounded.

Over a temperature range from -200°C to +200°C, the J-type thermocouple delivers a voltage ranging from -7.890 mV to 10.777 mV. A programmed gain on the AD627 of 100 ( $R_G = 2.1 \text{ k}\Omega$ ) and a voltage on the AD627 REF pin of 2 V, results in the AD627's output voltage ranging from 1.110 V to 3.077 V relative to ground. For a different input range or different voltage on the REF pin, it is important to check that the voltage on internal node A1 (see Figure 4) is not driven below ground. This can be checked using the equations in the section entitled Input Range Limitations in Single Supply Applications.

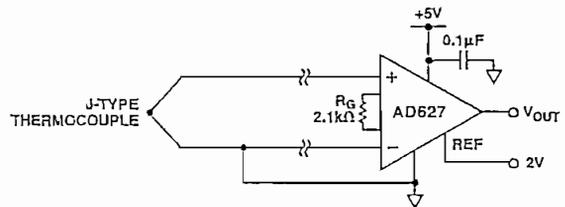
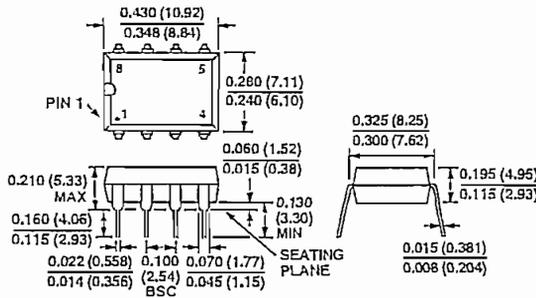


Figure 17. Amplifying Bipolar Signals with Low Common-Mode Voltage

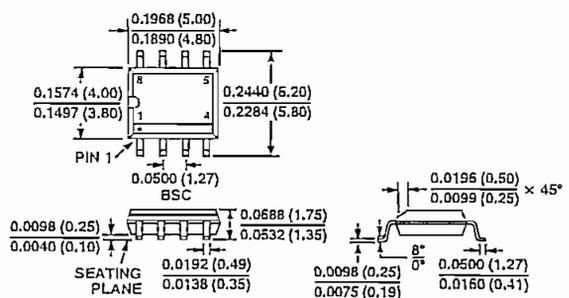
OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

8-Lead Plastic DIP (N-8)



8-Lead SOIC (SO-8)

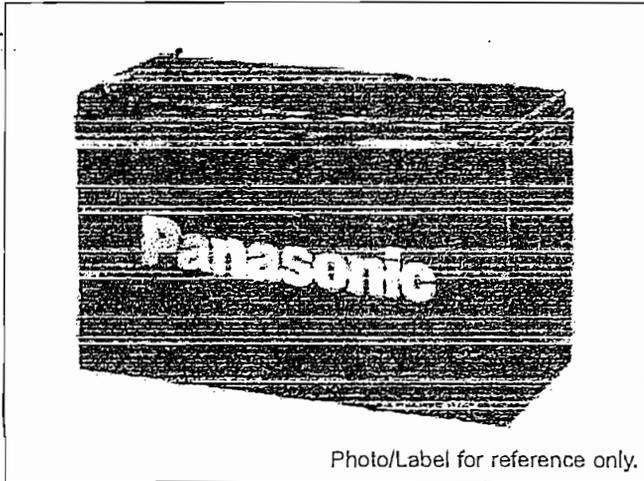


AD627—Revision History

Location	Page
Data Sheet changed from REV. A to REV. B.	
Changes to Figure 4 and Table I, Resulting Gain column	11
Change to Figure 9	13

# SEALED LEAD ACID BATTERIES: INDIVIDUAL DATA SHEET

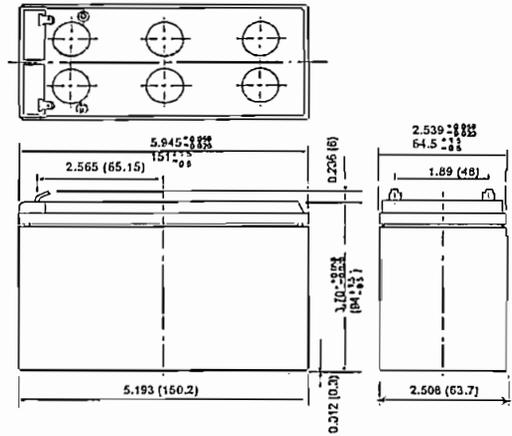
## LC-R127R2P



For main and standby power supplies.  
Expected trickle life: 3-5 years at 25°C, Approx. 5 years at 20°C.

### Dimensions (mm)

Terminal type: Faston 187 or Faston 250



Battery case resin: Standard (UL94HB) Color is black.  
Optional (UL94V-0) Color is grey.

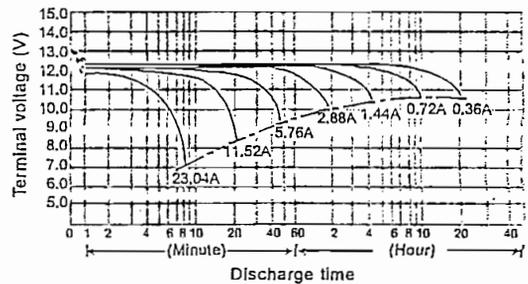
### Specifications

Nominal voltage		12V
Rated capacity (20 hour rate)		7.2Ah
Dimensions	Length	5.945 inches (151.0 mm)
	Width	2.539 inches (64.5 mm)
	Height	3.702 inches (94.0 mm)
Total Height*		3.937 inches (100.0 mm)
Approx. mass		5.45 lbs (2.47 kg)
Standard Terminals and Resin	UL94HB Faston 187	LC-R127R2P
	UL94HB Faston 250	LC-R127R2P1
Optional Terminals and Resin	UL94V-0 Faston 187	◆ LC-V127R2P
	UL94V-0 Faston 250	◆ LC-V127R2P1

\* The total height with #250 terminal is 101.5mm.

◆ Please contact Panasonic for availability on optional items. Optional items may be subject to minimum order quantities.

### Discharge characteristics 77°F (25°C) (Note)

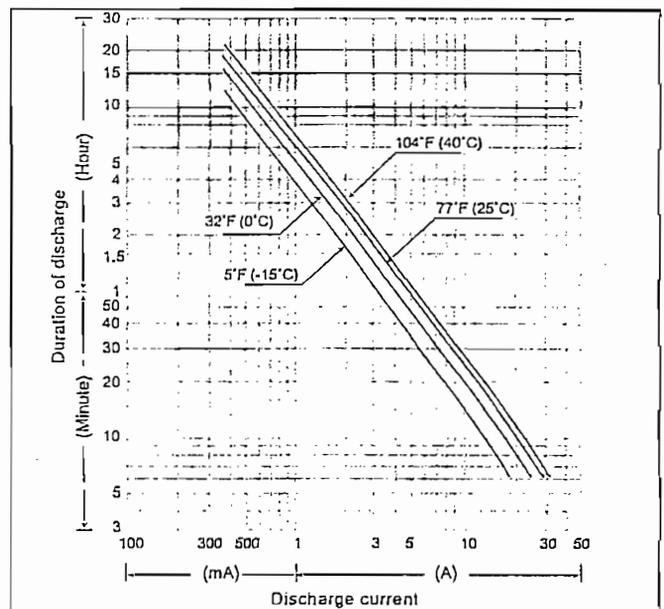


### Characteristics

Capacity (nom)	20 hour rate (360mA)	7.2Ah	
	10 hour rate (680mA)	6.8Ah	
	5 hour rate (1260mA)	6.3Ah	
	1 hour rate (4900mA)	4.9Ah	
1.5 hour rate discharge Cut-off voltage 10.5 V		3.5A	
Internal resistance	Fully charged battery 77°F (25°C)	Approx. 40mΩ	
Temperature dependency of capacity (20 hour rate)	104°F (40°C)	102%	
	77°F (25°C)	100%	
	32°F (0°C)	85%	
	5°F (-15°C)	65%	
Self discharge 77°F (25°C)	Residual capacity after standing 3 months	91%	
	Residual capacity after standing 6 months	82%	
	Residual capacity after standing 12 months	64%	
Charge Method (Constant Voltage)	Cycle use (Repeating use)	Initial current	2.88 A or smaller
		Control voltage	14.5V to 14.9 V (per 12V cell 25°C)
	Trickle use	Initial current	1.08 A or smaller
		Control voltage	13.6V to 13.8V (per 12V cell 25°C)

(Note) The above characteristics data are average values obtained within three charge/discharge. Cycles not the minimum values.

### Duration of discharge vs. Discharge current (Note)



**Panasonic**

SLA BATTERIES

JUNE 2000

This information is generally descriptive only and is not intended to make or imply any representation, guarantee or warranty with respect to any cells and batteries. Cell and battery designs/specifications are subject to modification without notice. Contact Panasonic for the latest information.