



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

PROYECTO DE GRADUACION

"Prototipo de un motor magnético"

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACIÓN ELECTRONICA

Presentado por:

Juan Carlos Villamar Briones

Manuel Vicente Santillán Sanisaca

Adolfo Efraín Piúa Herrera

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO

2001



ACTIVO FIJO 155529

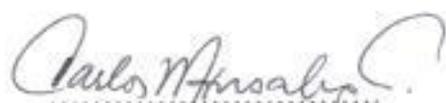
AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ing. Miguel Yapur Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A Dios y a nuestros padres
que en todo momento nos
brindaron su comprensión y
apoyo.

TRIBUNAL DE GRADUACION



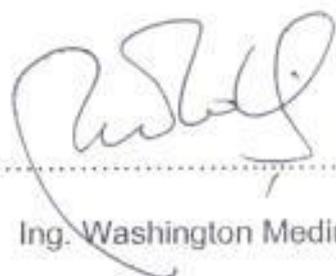
Ing. Carlos Monsalve

SUBDECANO DE LA FIEC



Ing. Miguel Yapur A.

DIRECTOR DE TOPICO



Ing. Washington Medina

VOCAL



Ing. Leo Salomón

VOCAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, reading "Juan Carlos Villamar Briones". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dotted line.

Juan Carlos Villamar Briones

A handwritten signature in black ink, reading "Manuel V. Santillán S.". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dotted line.

Manuel Vicente Santillán Sanisaca

A handwritten signature in black ink, reading "Adolfo Efraín Plúa Herrera". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dotted line.

Adolfo Efraín Plúa Herrera

RESUMEN

El trabajo presentado consiste en una innovación tecnológica a los motores de combustión interna que todos conocemos, amoldando sus características a las del diseño descrito más adelante. El trabajo tiene como finalidad presentar el primer prototipo de motor magnético recíprocante como una alternativa ecológica a los motores de hoy en día, los cuales por trabajar sobre la base de la combustión interna desperdician mucha energía además de contaminar el medio ambiente.

En la primera parte de este trabajo se presentan las bases teóricas que han permitido culminar con éxito cada una de las etapas del proyecto.

Luego se presentan en orden cronológico las partes que conformaron cada una de las etapas de este trabajo, para finalmente hacer las conclusiones y recomendaciones del caso para futuros trabajos que se desarrollen en torno a este tema.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
ABREVIATURAS.....	XI
SIMBOLOGIA.....	XII
INDICE DE FIGURAS	XIV
INTRODUCCIÓN	1

I. BASES TEÓRICAS PARA LA OBTENCIÓN DEL PRIMER

PROTOTIPO	2
1.1 Tipos básicos de motores de combustión interna y su funcionamiento	2
1.1.1. El motor de cuatro carreras encendido por chispa	3
1.1.2. El motor de cuatro carreras encendido por compresión	5
1.1.3. Motores por la disposición de los cilindros	8
1.2 Magnetismo en la materia	10
1.2.1. Magnetización e intensidad de campo.....	11
1.2.2. Ferromagnetismo	13
1.2.3. Paramagnetismo	14

1.2.4. Diamagnetismo	15
1.2.5. Materiales duros y suaves	16
1.3 Energía y fuerzas magnéticas.....	17
1.3.1. Energía magnética	17
1.3.2. Expresiones para la transferencia de energía magnética	18
1.3.3. Fuerza de reluctancia.....	21
II. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PROTOTIPOS DISEÑADOS E IMPLEMENTADOS	23
2.1. Diagrama de bloques y descripción general de las partes constituyentes	23
2.2. Funcionamiento y operación del sistema	27
III. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA MAGNETO-MECANICO	33
3.1. Breve resumen de las alternativas consideradas	33
3.2. Detalle de los objetivos de este sistema en el funcionamiento del motor	35
IV. EL SISTEMA DE ELECTROIMANES	37
4.1. Breve descripción de los objetivos y el funcionamiento	37
4.2. Datos de los electroimanes obtenidos experimentalmente	38

V. DETALLE DEL ACOPLADOR OPTICO Y EL CIRCUITO DE CONTROL	40
5.1. Breve descripción del acoplador óptico como parte del circuito de sincronismo	40
5.2. Descripción y funcionamiento del circuito de control	43
5.2.1. Funcionamiento del circuito de control	43
5.2.2. Cálculos y detalle de cada una de las partes del circuito de control.....	45
VI. EL SISTEMA DE ALIMENTACION.....	59
6.1. Sistema de alimentación para el circuito de control	59
6.1.1. Visión general del circuito.....	59
6.1.2. Cálculos de los parámetros del circuito.....	60
6.2. Sistema de alimentación para los electroimanes	66
6.2.1. Visión general del circuito.....	66
6.2.2. Cálculos de los parámetros del circuito	67
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
7.1. Conclusiones.....	70
7.2. Recomendaciones.....	72
7.3. Implicaciones a futuro	75

APENDICES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABREVIATURAS

CLK	Reloj
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
Vol	Volumen

SIMBOLOGÍA

A	Amperio
B	Densidad de flujo
C	Constante de Curie
E	Fuerza electromotriz
H	Intensidad de campo
I	Corriente eléctrica
L	Inductancia
M	Magnetización
mH	Milihenrios
N	Número de vueltas
q	Carga eléctrica
R	Resistencia
T	Temperatura de Curie
v	Velocidad de la carga
V	Voltaje
V _{cc}	Voltaje de la fuente de voltaje continuo
χ	Susceptibilidad magnética
μ_0	Permeabilidad en el vacío
μ	Permeabilidad de la sustancia

\mathfrak{R}	Reluctancia
ϕ	Flujo magnético
W	Energía eléctrica

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1 Secuencia de funcionamiento para el motor de émbolo reciprocante	4
Figura 1.2 Motores por la disposición de los cilindros.....	10
Figura 2.1 Diagrama de bloques del primer prototipo construido con éxito.....	25
Figura 2.2 Diagrama de bloques del segundo prototipo construido con éxito.....	27
Figura 5.1 Diagrama del opto acoplador y la rueda ranurada.....	42
Figura 5.2 Esquema del acoplador óptico y el circuito de entrada.....	45
Figura 5.3 Detalle del circuito de un solo disparo	46
Figura 5.4 Simulación de las señales en el circuito de un solo disparo	47
Figura 5.5 Esquemático del circuito eliminador de rebotes.....	49
Figura 5.6 Simulación de señales en el circuito eliminador de rebotes.....	50
Figura 5.7 Esquemático final del circuito de entrada al circuito de control.....	54
Figura 5.8 Circuito digital generador de la secuencia de salida.....	55
Figura 5.9 Simulación de señales en el circuito generador de pulsos	56
Figura 5.10 Circuito de salida para activación de electroimanes	57

Figura 6.1 Esquemático de la fuente de +12V	63
Figura 6.2 Esquemático de la fuente de +5V	66
Figura 6.3 Esquemático de la fuente de +25V	70
Figura 7.1 Esquema de una de las posibles aplicaciones de una máquina electromagnética reciprocante	74

INTRODUCCIÓN

El trabajo trata acerca del diseño de un prototipo de motor magnético sobre la base de ciertos parámetros conocidos acerca del funcionamiento de los motores de combustión interna, así como también la aplicación de ciertos criterios acerca de teoría electromagnética y de electrónica para controlar el funcionamiento del sistema en general.

Hay que acotar que si bien es cierto en la primera parte de éste proyecto se consiguió un movimiento lineal solamente, en la segunda parte del mismo (luego de muchos intentos), se pudo obtener un movimiento rotacional a una frecuencia casi constante.

Este trabajo trata de motivar a otras personas a continuar con la investigación de formas alternativas de conseguir movimiento, con el único propósito final de lograr un desarrollo sustentable en esta área.

CAPITULO 1

1. BASES TEÓRICAS PARA LA OBTENCIÓN DEL PRIMER PROTOTIPO

1.1. Tipos básicos de motores de combustión interna y su funcionamiento

Han transcurrido unos setenta años, desde que el motor de combustión interna hizo su primera proclama como una fuente de energía. Durante estos años, el motor de combustión ha reemplazado con largueza al motor de vapor y en la actualidad, solamente la turbina de vapor es comparable con él, por lo que respecta a la cantidad de energía producida. El progreso del mundo ha sido influido en gran parte, por este tipo de motor y en un campo, en la aviación, no se ha encontrado un sustituto satisfactorio. Actualmente, la construcción de motores de combustión para automóviles, lanchas, aeroplanos y trenes, lo mismo que para

pequeñas plantas de energía, constituye una de las más grandes industrias en el mundo.

En la primera parte de éste capítulo se verá algunos de los motores de combustión interna más conocidos, los cuales sirvieron de base para planteamientos iniciales previos al diseño final que se obtuvo.

1.1.1. El motor de cuatro carreras encendido por chispa

La mayoría de los motores de combustión interna, utilizan el principio de émbolo recíprocante, mostrado en la figura 1-1, según el cual, un émbolo se desliza dentro de un cilindro hacia atrás y hacia delante y trasmite fuerza a la flecha motriz, por lo general, mediante un mecanismo de biela y manivela. En 1862 Beau de Rochas propuso la secuencia de funcionamiento para el motor de émbolo recíprocante, que aún hoy en día es típica de la generalidad de motores encendidos por chispa y que es:

1. Una carrera de admisión para inducir una mezcla de combustible hacia el interior del cilindro del motor, Fig. 1-1a.
2. Una carrera de compresión, para elevar la temperatura de la mezcla Fig. 1-1b.

3. Al final de la carrera de compresión, ocurre la chispa y el encendido consecuente de la mezcla homogénea, liberando energía que aumenta la temperatura y la presión de los gases; enseguida el émbolo de la carrera de expansión o de potencia, Fig. 1-1c.
4. Una carrera de escape, para barrer al cilindro, dejándolo libre de los gases quemados, Fig. 1-1d

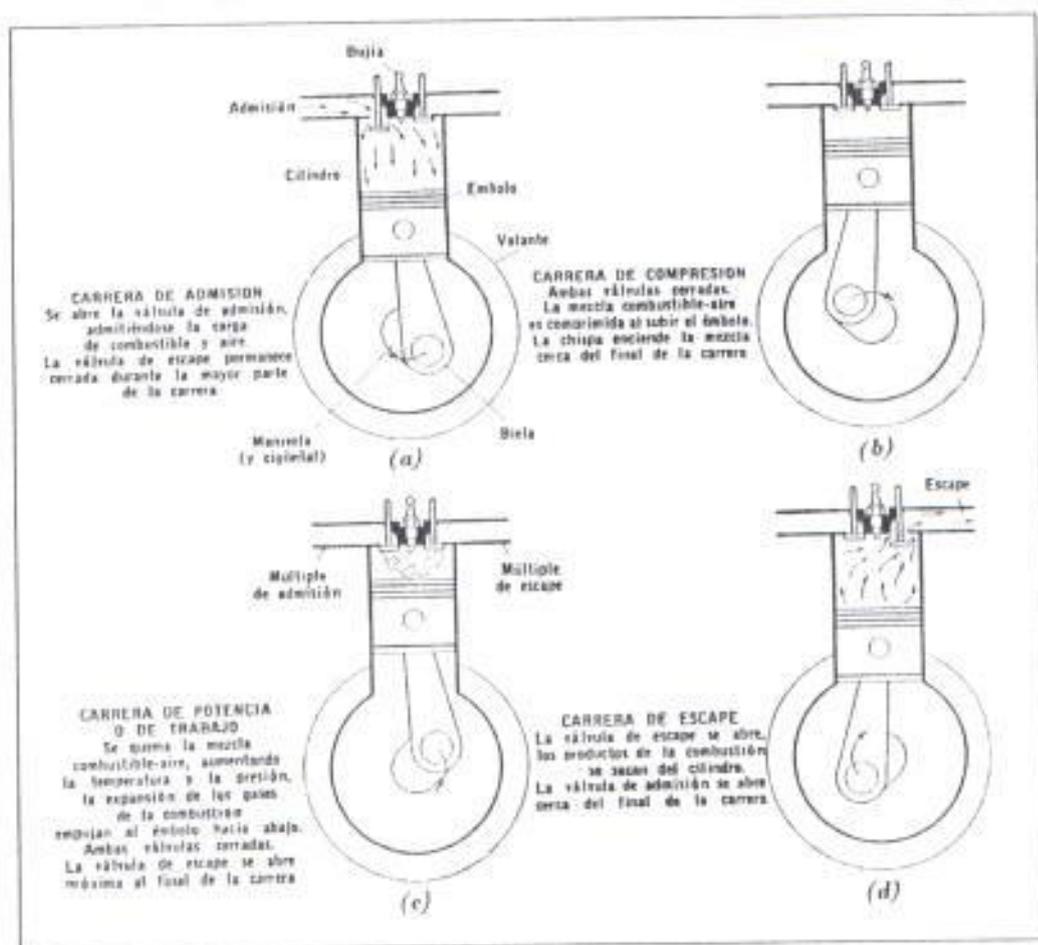


Figura 1.1. Secuencia de funcionamiento para el motor de émbolo recíprocante

En 1876, Nikolaus Otto, un Ingeniero alemán, aprovechando el principio de Beau Rochas, construyó un motor con ciclo de trabajo de cuatro carreras que resultó muy afortunado, habiéndose conocido el ciclo de sucesos, como ciclo de Otto.

En todos los motores de émbolo recíprocante, éste llega necesariamente a una completa inmovilidad, en dos posiciones particulares del cigüeñal antes de invertir la dirección de su movimiento. En la Fig.1-1d el émbolo ha pasado precisamente del límite inferior de su carrera; a esta posición se le llama punto muerto inferior (abreviado PMI). Existe una posición "muerta" semejante, o etapa sin movimiento del émbolo, en el instante en que éste llega al *punto muerto superior* (abreviado PMS). En vista de que la carrera de potencia sólo existe en una parte del tiempo total del ciclo, se emplea a un volante para hacer uniformes dichos impulsos, obteniendo así, esencialmente, una rotación uniforme del cigüeñal.

1.1.2. El motor de cuatro carreras encendido por compresión

En 1892, Rudolph Diesel, diseñó un nuevo tipo de motor capaz de quemar polvo de carbón. El ciclo de Diesel era similar al

ciclo de Otto, excepto que debía tenerse una alta relación de compresión, admitiendo solamente aire, en lugar de la mezcla de combustible, en la carrera de admisión. Era bien sabido que la rápida compresión del aire hasta presiones elevadas, podía elevar su temperatura hasta un valor tal, que si se surtía dentro de la cámara de combustión un combustible, éste se incendiaba espontáneamente sin depender de una chispa para iniciar la combustión o de una mezcla homogénea para propagar la llama. Diesel propuso al principio, regular la inyección del combustible para tener la combustión a temperatura constante, pero encontró que esto no era práctico. Posteriormente trató de regular la inyección del combustible para conseguir una combustión a presión constante, siendo más afortunado este arreglo. Muy pronto encontró Diesel que el polvo de carbón no era un combustible satisfactorio y que los combustibles líquidos darían mejores resultados.

Se puede emplear la Fig. 1-1, para visualizar el motor Diesel o de encendido por compresión, reemplazando la bujía por una válvula inyectora de combustible y aumentando la relación de compresión hasta más o menos 15 a 1. El afortunado motor de Diesel incorpora los siguientes ciclos de sucesos:

1. Una carrera de admisión para inducir dentro del cilindro, solamente aire Fig. 1-1a. (válvula de admisión abierta).
2. Una carrera de compresión para llevar al aire hasta una temperatura superior a la del punto de encendido del combustible, Fig. 1-1b (ambas válvulas cerradas).
3. Inyección del combustible durante la primera parte de la carrera de expansión con una rapidez tal, que la presión se mantenga en un valor constante, siguiendo la expansión, hasta el volumen inicial del cilindro Fig. 1-1c (ambas válvulas cerradas).
4. Una carrera de escape para purgar del cilindro los gases quemados Fig. 1-1d (válvula de escape abierta).

Uno de los primeros métodos empleados para inyectar combustible, fue el de valerse de una corriente aire a presión, para arrastrarlo al interior de la cámara de combustión. No obstante en la actualidad raramente se emplea la inyección por aire porque es necesario disponer de un gran compresor que resulta un auxiliar costoso.

1.1.3. Motores por la disposición de los cilindros

En vista de que la velocidad y consecuentemente la potencia de un motor son limitadas por las fuerzas de inercia originadas al acelerar y desacelerar algunas de sus partes, es conveniente dividir el motor en un cierto número de cilindros individuales. Mediante este recurso, se reducen las fuerzas de inercia por cilindro; incluso, las fuerzas en uno de ellos pueden contrarrestarse o "desbalancearse", con un acomodo conveniente de los otros. En la Fig. 1-2 se muestran diferentes arreglos. El *motor en línea* es el diseño usual para aplicaciones tanto estacionarias como de transportación, porque ofrece la solución más simple de construcción y mantenimiento. Un motor con menor longitud que el del tipo en línea y de la misma potencia, es el *motor en V*, que consiste en dos bancadas de cilindros en línea, colocadas una con respecto a la otra con un cierto ángulo (generalmente 90°) para formar la letra V. En este caso se sujetan dos bielas a un muñón del cigüeñal. Cuando se presenta el problema de falta de espacio, como es el caso de los motores colocados en la parte posterior para accionar vehículos, puede ser preferible un motor plano con cilindros horizontales. En el motor *horizontal opuesto* de la Fig. 1-2, los émbolos están

desalineados y se requiere un muñón por separado por cada cilindro.

También se muestra un motor de *émbolos opuestos* y que controla la lumbrera de admisión en tanto que el émbolo inferior, controla la lumbrera de escape. En ésta forma se obtiene el barrido de flujo unidireccional o lineal. La disposición de cilindros *radiales*, con todos los cilindros en un plano y con igual separación angular entre sus ejes, es muy común para motores de aviación enfriados por aire, este motor presenta el problema de sujetar 3, 5, 7 o 9 bielas a un solo muñón.

Los motores en línea y en V pueden diseñarse para trabajar con el cigüeñal arriba de los cilindros, en cuyo caso se dice que el motor es invertido.

Todos los diseños anteriores pueden ser igualmente enfriados por aire o por agua. El enfriamiento por agua es el más común, pero cuando se desea simplicidad (motores de motocicleta) o se requiere un poco de peso (motores de aviación), lo usual es el enfriamiento por aire.

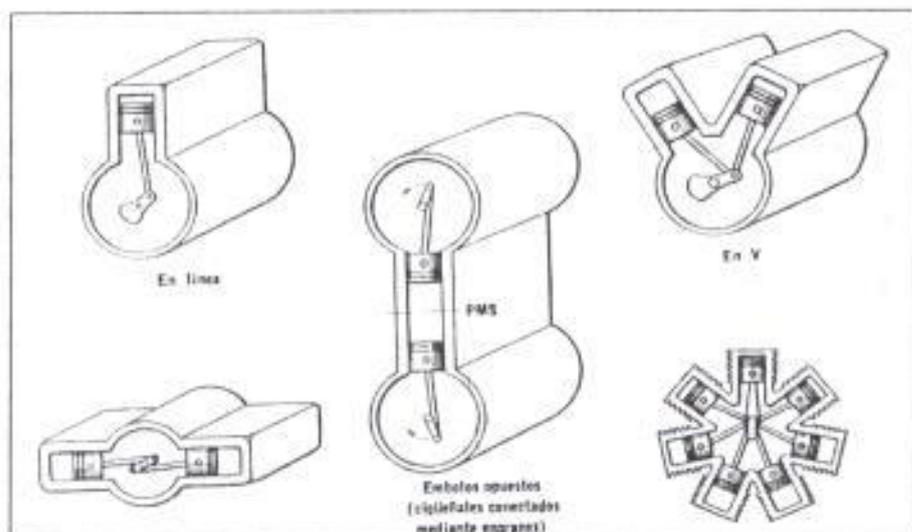


Figura 1.2. Motores por la disposición de los cilindros

1.2. Magnetismo de la materia

El campo magnético producido por una corriente en una bobina nos ayuda a comprender la causa de que ciertos materiales presenten fuertes propiedades magnéticas. En general cualquier espira de corriente tiene un campo magnético y su correspondiente momento magnético. En forma similar, los momentos magnéticos en sustancias magnetizadas están asociados con corrientes atómicas internas.

Las fuerzas mutuas entre estos dipolos magnéticos y sus interacciones con un campo magnético externo son fundamentalmente importantes en el entendimiento del

comportamiento de los materiales magnéticos. Se describirán tres categorías de materiales, ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos. Pero antes de realizar una descripción de estos materiales veremos los conceptos de magnetización e intensidad de campo magnético.

1.2.1. Magnetización e intensidad de campo magnético

El estado magnético de una sustancia se describe mediante una cantidad llamada vector de magnetización, M . La magnitud del vector de magnetización es igual al momento magnético por unidad de volumen de una sustancia. Como es de esperarse el campo magnético total de una sustancia depende tanto del campo magnético externo aplicado como de la magnetización de la sustancia.

Es conveniente introducir otra cantidad de campo H , llamada intensidad de campo magnético. Esta cantidad vectorial se define por la relación $H = (B / \mu_0)$. Así el campo magnético total en un arreglo toroidal es:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1.1)$$

Para un gran grupo de sustancias, especialmente sustancias paramagnéticas y diamagnéticas, la magnetización M es

proporcional a la intensidad del campo magnético H . En estas sustancias lineales, se puede escribir:

$$M = \chi H \quad (1.2)$$

Donde χ es un factor adimensional llamado susceptibilidad magnética. Si una muestra es paramagnética, χ es positiva, por lo cual M está en la misma dirección que H . Si la sustancia es diamagnética, χ es negativa, y M es opuesto a H . Es importante hacer notar que esta relación lineal no es aplicable a las sustancias ferromagnéticas. Sustituyendo M en la ecuación (1.1) se obtiene

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu H \quad (1.3)$$

Donde μ es la permeabilidad de la sustancia, este parámetro también permite diferenciar a las diferentes sustancias comparando μ con μ_0 (permeabilidad en el espacio libre) como sigue:

Paramagnético	$\mu > \mu_0$
Diamagnético	$\mu < \mu_0$
Ferromagnético	$\mu \gg \mu_0$

1.2.2. Ferromagnetismo

El hierro, cobalto, níquel, gadolinio y disprosio son materiales fuertemente magnéticos y suele llamárseles ferromagnéticos. Las sustancias ferromagnéticas se utilizan para fabricar imanes permanentes. Tales sustancias contiene momentos magnéticos atómicos que tienden a alinearse paralelamente unos de otros en presencia de un fuerte campo magnético externo. Esta alineación permanente se debe a los fuertes acoplamientos entre momentos vecinos, que solo puede ser entendido en términos de la mecánica cuántica.

Todos los materiales ferromagnéticos contienen regiones microscópicas llamadas dominios, en los cuales todos los momentos están alineados. Las fronteras entre varios dominios que tienen diferentes orientaciones se llaman paredes de dominio. En una muestra no magnetizada, los dominios están orientados al azar de tal manera que el campo magnético total es cero, cuando la muestra se coloca en un campo externo, los dominios tienden a alinearse con el campo girando ligeramente, con lo cual resulta una muestra magnetizada. A temperaturas ambientes, la agitación térmica

no es suficientemente alta para alterar esta orientación preferencial de los momentos magnéticos.

1.2.3. Paramagnetismo

Las sustancias paramagnéticas tienen un pequeño y positivo valor de susceptibilidad ($0 < \chi < 1$), lo cual se debe a la presencia de átomos con momentos magnéticos permanentes. Estos dipolos solo interactúan fuertemente entre ellos y están orientados en forma aleatoria en ausencia de un campo magnético externo. Cuando la sustancia se coloca en un campo magnético externo, sus dipolos atómicos tienden a alinearse con el campo. Sin embargo, este proceso de alineamiento debe competir con los efectos del movimiento térmico, el cual tiende a desorientar los dipolos.

Por vía experimental, se encuentra que la magnetización en una sustancia paramagnética es proporcional al campo aplicado e inversamente proporcional a la temperatura absoluta sobre una amplia gama de condiciones. Es decir,

$$M = C (B / T) \quad (1.4)$$

Esto se conoce como ley de Curie en honor a su descubridor Pierre Curie, y la constante C se llama constante de Curie. Es

importante hacer notar que cuando la temperatura de una sustancia ferromagnética se acerca o excede una temperatura crítica, llamada temperatura de Curie, la sustancia pierde su magnetización espontánea y se convierte en paramagnética.

1.2.4. Diamagnetismo

Una sustancia diamagnética es aquella cuyos átomos no tiene momento dipolar magnético permanente. Cuando se aplica un campo magnético externo a una sustancia diamagnética como el bismuto o la plata, un momento dipolar débil es inducido en la dirección opuesta al campo aplicado. Aún cuando el efecto diamagnético está presente en toda la materia, éste es más débil que el paramagnetismo y el ferromagnetismo.

Se puede comprender el diamagnetismo al considerar dos electrones de un átomo orbitando el núcleo en direcciones opuestas pero con la misma rapidez. Los electrones permanecerán en sus órbitas debido a la fuerza electrostática atractiva de la carga positiva del núcleo. Dado que los momentos magnéticos de los dos electrones son iguales en magnitud y opuestos en dirección, se cancelan uno al otro y el momento dipolar del átomo es cero. Cuando se aplica un

campo magnético externo, los electrones experimentan una fuerza adicional $q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$. Esta fuerza adicional modifica la fuerza centrípeta incrementando la rapidez orbital del electrón cuyo momento magnético es antiparalelo al campo y disminuyendo la rapidez del electrón cuyo momento es paralelo al campo. Como resultado de esto, los momentos magnéticos de los electrones no se cancelan y la sustancia adquiere un momento dipolar neto opuesto al campo aplicado.

1.2.5. Materiales duros y suaves

Las curvas de histéresis de saturación de los materiales magnéticos fuertes muestran una amplia variación. En ingeniería se emplean dos clases particulares de curvas:

- a) Curvas largas y estrechas. Estos materiales suaves se magnetizan rápidamente, con un valor grande de μ , y con misma rapidez pierden su magnetización cuando se retira el campo H , ya que tienen una coercitividad pequeña. Entre tales materiales incluimos el hierro puro cuyo tamaño de grano es grande y, en especial las aleaciones de hierro, silicio y níquel, así como ciertas ferritas. Algunos nombres comerciales son Supermalloy, Permalloy y Mumetal. Como el área de las curvas es pequeña, también lo será la energía perdida por ciclo, de modo que estos materiales se

utilizan en los casos en que se tiene campos variables, como en los núcleos de transformadores y en algunas partes de la maquinaria electromagnética.

- b) Curvas de área grande. Estos materiales "duros" retienen su magnetización incluso en presencia de campos moderados y, por ello, se utilizan para construir imanes permanentes. El acero con alto contenido de carbono y de grano fino funciona moderadamente bien, pero son mucho mejores las aleaciones de aluminio, níquel y cobalto, así como algunas ferritas. Entre los nombres comerciales en uso están Alnico y Ferroxdur.

1.3. Energía y Fuerzas magnéticas

1.3.1. Energía magnética

Los experimentos muestran que si el núcleo de una bobina que porta corriente se jala hacia fuera existe una fuerza que se opone al movimiento, de modo que es claro que hay un cambio de energía. Como el flujo magnético es proporcional al campo magnético, que a su vez es proporcional a la corriente del circuito, la fem autoinducida siempre será proporcional a la razón de cambio de la corriente en el tiempo. Para una bobina de N espiras muy juntas y de geometría fija se encuentra que :

$$E = -Nd\phi/dt = -LdI/dt \quad (1.5)$$

De esta última ecuación se puede ver que la inductancia de una bobina de N espiras se puede calcular con la ecuación:

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad (1.6)$$

$$\phi = \frac{NI}{\mathfrak{R}} = \frac{LI}{N} \quad (1.7)$$

por tanto,

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\frac{LdI}{dt} - \frac{IdL}{dt} \quad (1.8)$$

Ahora se tiene una ecuación compleja para cubrir los cambios en corriente y reluctancia y se la puede aplicar a problemas de fuerza y energía.

1.3.2. Expresiones para la transferencia de energía magnética

La transferencia de potencia está dada por $P = VI$. Si se la integra para expresar el cambio de energía en términos de la diferencia de potencial y la corriente aplicadas,

$$\text{Transferencia de energía } W = \int VI dt \quad (1.9)$$

Si se toma la ecuación (1.8), se cambia su signo para indicar que no se está tratando con una fem inducida sino con el

voltaje V aplicado para contrarrestarla, y se cancela dt con la suposición de que solo se considerarán cambios suaves:

$$W = \int (LIdI + I^2 dL) \quad (1.10)$$

Esta es una ecuación para el cambio externo de energía. Se puede aplicar de inmediato a inductores lineales fijos para los cuales solo existe el primer término, y L puede salir de la integral. Considerando el incremento desde cero hasta I ,

$$W = L \int_0^I IdI = LI^2 / 2 \quad (1.11)$$

Como W es la energía suministrada al inductor para tener una corriente de cero a I , y no hay pérdida de energía, $LI^2/2$ también puede representar la energía almacenada en el inductor cuando pasa un corriente I .

Como es el caso electroestático se puede preguntar donde se almacena la energía y se llegará a una expresión que el campo mismo contiene la energía y que ésta puede describirse en términos de H y B . En una etapa intermedia se encontrará la energía en una forma que se ajuste al circuito magnético dentro del inductor, de manera que pueda aplicarse a cualquier circuito magnético.

De la expresión simple de la ley de Faraday, con el signo cambiado para considerar una diferencia de potencial aplicada en lugar de una fem inducida:

$$W = \int VI dt = \int NI d\phi = \int \mathfrak{R} \phi d\phi = \mathfrak{R} \phi^2 / 2 \quad (1.12)$$

Estas ecuaciones representan la energía almacenada dentro de un circuito magnético; la ecuación (1.12) está por completo en términos de unidades internas.

Se considerará ahora la energía almacenada en una pequeña parte del circuito magnético, aplicando la ecuación (1.12) y permitiendo que B varíe se tiene:

$$W = \int H I A dB = \int H dB Vol \quad , \text{donde Vol es el volumen} \quad (1.13)$$

Por tanto, $\int H dB$ representa la energía almacenada por unidad de volumen dentro de un circuito magnético. Para un material lineal ésta es simplemente:

$$W = \int \mu_0 \mu_r H dH = \mu_0 \mu_r H^2 / 2 \text{ por unidad de volumen} \quad (1.14)$$

Como aparecen las cantidades H y B , la energía debe considerarse como si estuviera almacenada en el espacio dentro del campo mismo.

Si se establece un campo magnético, la energía W que se necesita para establecerlo es $\int HdB$ por unidad de volumen.

Para un material reversible, ésta energía se recupera por completo. Al quitar H , la disminución de flujo resultante podría generar una fem y establecer una corriente que transfiera toda la energía. Si ocurre histéresis solo se puede recuperar parte de la energía.

1.3.3. Fuerza de reluctancia

En principio se conoce lo siguiente:

$$Fuerza = -\frac{dU}{dx}, \text{ donde } U \text{ es la energía potencial} \quad (1.15)$$

Con la ecuación anterior se puede determinar las fuerzas en los sistemas magnéticos. La fuerza producida completamente por cambios de energía debidos a su vez a una reluctancia variable se conoce como fuerza de reluctancia. Por ejemplo, si una pieza de hierro se mantiene justo en el extremo exterior

de una bobina a través de la cual fluye corriente, dicha pieza experimentará una fuerza. Si la reluctancia se puede determinar en términos de la posición del hierro, entonces en principio, se puede hallar la fuerza en todos los puntos. Esto no suele ser fácil a menos que el problema se haga artificialmente directo suponiendo que las líneas de flujo son paralelas.

CAPITULO 2

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PROTOTIPOS DISEÑADOS E IMPLEMENTADOS

2.1. Diagrama de bloques y visión general de las partes

constituyentes

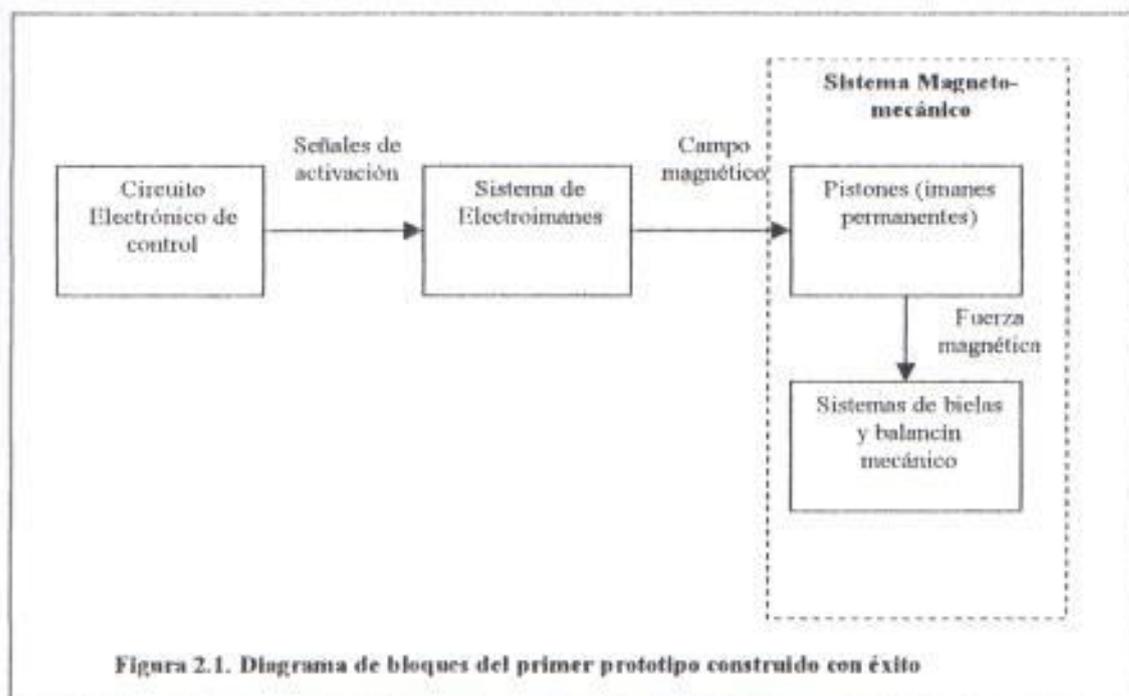
Como se mencionó en la introducción de este trabajo, el objetivo es el de presentar una innovación tecnológica a los motores de combustión interna ya existentes, para ello se tuvo que afrontar a varias etapas antes de conseguir el primer ensayo exitoso en el laboratorio. Una de estas etapas fue la construcción de un dispositivo que permitiera conocer la magnitud de la fuerza magnética producida por un par electroimán-imán permanente, para luego aplicar ese conocimiento y construir un segundo dispositivo que produzca un movimiento rotacional continuo.

En primer lugar se describirá el primer prototipo, para luego hacer algunas anotaciones en el segundo diseño.

En el apéndice D se muestra el diagrama del primer prototipo construido con éxito, el cual sirvió para conseguir el objetivo antes mencionado. Este primer prototipo consta fundamentalmente de tres partes:

- **El sistema Magneto-mecánico:** Está formado por un balancín, las bielas, los pistones (imanes permanentes), los cilindros por donde viajan los pistones y el bloque de madera en el cual se sustentan las partes anteriormente mencionadas.
- **El sistema de electroimanes:** Está constituido por dos electroimanes los cuales se encuentran encima de los cilindros, y son los que en definitiva producen el movimiento de los pistones.
- **El sistema de control electrónico:** Está formado por un oscilador que genera las señales apropiadas al circuito de salida, de ésta forma se puede activar o desactivar a los electroimanes.

Una vez descritas las partes principales de este diseño se pasará a ver a continuación su diagrama de bloques.



Como se mencionó este trabajo consta de dos etapas, la primera fue descrita anteriormente en forma general. Ahora se pasará a ver la segunda etapa de este proyecto también en forma general.

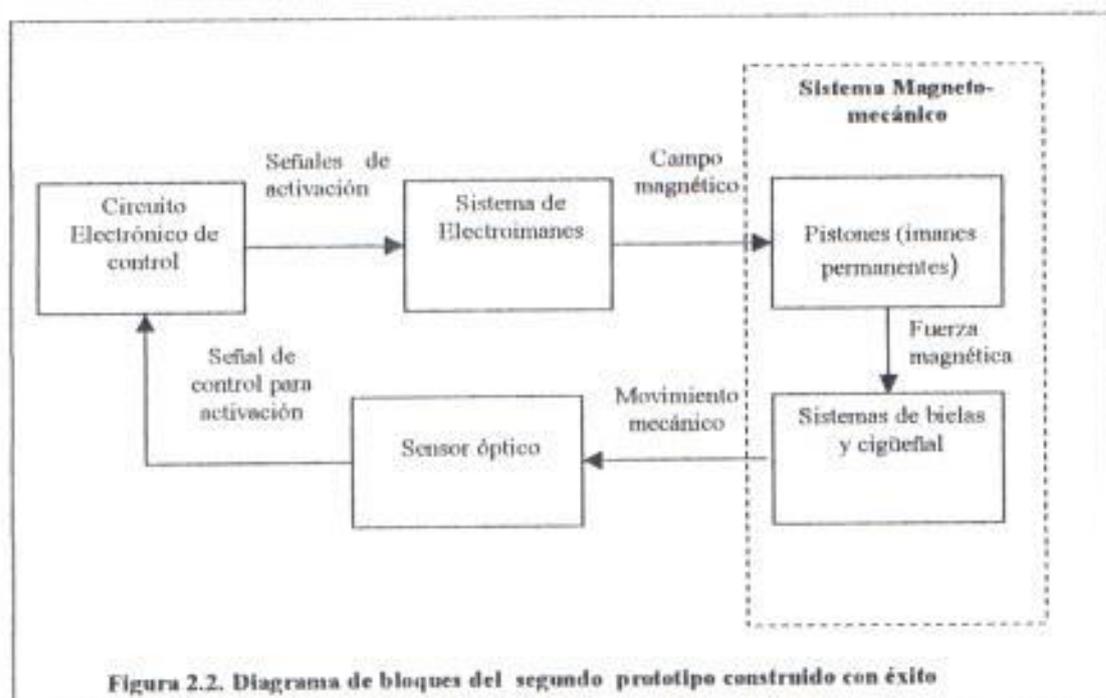
En el apéndice E se muestra el diagrama del segundo prototipo que se construyó, en este se pueden notar grandes diferencias con respecto al primero, sobretodo en la parte magneto-mecánica y en la

forma de enviar los pulsos de sincronismo para activar los electroimanes.

El segundo diseño está conformado por las siguientes partes principalmente:

- **El sistema magneto-mecánico:** El cual consta del cigüeñal, las bielas, los pistones (imanes permanentes), los cilindros y el bloque de madera que soporta a las demás piezas antes mencionadas.
- **El sistema de Electroimanes:** Esta parte está conformada por tres electroimanes que son activados en forma secuencial y sincronizada por el sistema de control.
- **El sistema de sincronismo y acoplador óptico:** Esta es una parte muy importante en el funcionamiento correcto del motor, está conformado por un acoplador óptico montado sobre una rueda metálica con características que más adelante se mencionarán.
- **El sistema de control electrónico:** Consiste de un generador de pulsos y un circuito digital secuencial, que envía los pulsos en el momento indicado a los electroimanes.

Una vez detalladas en forma general cada una de las partes, se pasará a continuación a ver el diagrama de bloques del segundo prototipo.



2.2. Funcionamiento y operación del sistema

En primer lugar se describirá el funcionamiento del primer prototipo construido para los objetivos antes mencionados.

En esta primera etapa, el objetivo era tener una idea general de la fuerza que se produciría con las condiciones que se presentaban por delante, en cuanto a las características de los imanes que se poseía

y su interacción con los electroimanes que se había construido. Para ello se debía poseer un sistema de balanceo autónomo, que permitiera aprovechar al máximo el campo producido por los imanes permanentes y así generar un movimiento mecánico.

Visualizando de esta forma el problema, se construyó un balancín mecánico sobre un bloque de madera, el mismo que serviría como un medio de soporte para las fuerzas que se generarían en la parte superior. Con el principio del motor de combustión interna, se construyó dos cilindros con sus respectivas bielas y pistones, con la particularidad de que los pistones en su parte superior tenían acoplados imanes permanentes.

Para producir el movimiento de este balancín mecánico por así llamarlo, necesitaríamos provocar fuerzas de repulsión y atracción en la parte superior del cilindro, por lo cual se colocó encima de los cilindros electroimanes, los cuales se activarían en tiempos determinados experimentalmente. La activación por supuesto estaría controlada por un circuito electrónico básico de generación de pulsos.

En este caso por tratarse un movimiento lineal y no rotacional de dos bielas, la sincronización no fue crítica. Por esta razón el circuito de

control podría funcionar independientemente de la posición de cada una de las bielas al inicio.

Hay que anotar que se realizó un artificio con el fin de provocar un movimiento amortiguado de las bielas. Este consistía en colocar imanes con una determinada polaridad en la parte inferior de cada uno de los cilindros, con esto a más de lo ya mencionado, la máquina ganó en fuerza y se pudo obtener un movimiento a una frecuencia casi constante.

En su parte fundamental el balancín funciona como sigue:

El circuito de control genera un pulso que activa un electroimán mientras el otro está apagado, el que está activo adquiere una polaridad que es contraria a la que se encuentra en su respectivo pistón (imán permanente), de esta forma se produce una fuerza de repulsión que baja ese pistón y por acoplamiento mecánico sube al otro, en ese momento el segundo electroimán es activado y el primero es desactivado. En el segundo electroimán ocurre cosa similar a la del primero, es decir, adquiere una polaridad contraria a la de su respectivo pistón, con lo cual este último es repelido. Este proceso se repite obteniéndose así un movimiento lineal a una frecuencia casi constante.

Es importante hacer notar, que el tiempo mínimo de activación de los electroimanes fue obtenido experimentalmente, y de ésta forma el circuito electrónico fue calibrado para simular varias velocidades que en realidad no eran mas que tiempos más grandes o más pequeños controlados en pleno movimiento por un potenciómetro. Además cabe anotar que la posición inicial de los brazos del balancín era indiferente, ya que ambas bielas al inicio se encontraban al mismo nivel. Esto se logró gracias a la presencia de los imanes en la parte inferior de los cilindros, los cuales suspendían literalmente en el aire a ambas bielas.

En segundo lugar se verá el funcionamiento del prototipo del motor magnético a breves rasgos, ya que la descripción detallada de cada una de sus partes será tema de análisis más adelante.

En esta etapa del proyecto el objetivo fundamental era aplicar los conocimientos adquiridos en el ensayo antes descrito, con el fin de obtener un movimiento rotacional a una frecuencia casi constante. Para lograrlo la constitución física se basó en las partes mecánicas de un motor convencional, esto es, desde la construcción del cigüeñal, las chapas de bielas, las chumaceras, las bielas, los pistones, los cilindros, además de tomar en cuenta todo lo que

implica generar la mínima fricción en el movimiento de cada una de estas partes.

Es indiscutible que se tuvo asistencia en la parte mecánica puesto que era poca la experiencia adquirida en este campo, sin embargo, esto permitió conocer un sin número de problemas que se generarían al pasar de un movimiento lineal a uno rotacional. Uno de estos problemas fue la sincronización del movimiento de los pistones, la cual indiscutiblemente debía poseer una retroalimentación, ya que no se conocía como se iba a comportar el acoplamiento de la parte mecánica con la parte electromagnética. Esto último condujo el trabajo a la realización varios ensayos con diferentes sensores que permitieron conocer donde se encontraba cada pistón, hasta que finalmente se concluyó con un sensor óptico acoplado a una rueda metálica con ranuras, las cuales le indicaban al opto-acoplador la posición de uno u otro pistón. Esta última alternativa brindaba la señal necesaria para que el circuito de control enviara los pulsos a los electroimanes en el momento apropiado.

El funcionamiento de este prototipo de motor es como sigue:

Al principio es necesario posicionar los pistones en una determinada ubicación con el fin de arrancar el motor de manera apropiada, una

vez realizado esto último la rueda graduada le indicará al sensor óptico que electroimán dispara primero y con esto comenzará el movimiento. Una vez iniciado el movimiento cada pistón provocará un giro del cigüeñal de 120° , así pues, con 3 pistones tendremos una vuelta completa y luego se repetirá el ciclo.

El sensor óptico en este caso es el que controla y a la vez autorregula la velocidad del motor, ya que si un pistón se dispara con más fuerza esto lo conocerá el circuito de control y luego los electroimanes, que producirán en los pistones la fuerza de repulsión necesaria para provocar el giro del cigüeñal.

De aquí en adelante se describe en forma detallada a este último prototipo, por tratarse del más adecuado y con menos dificultades mecánicas que se pudo construir en este proyecto.

CAPITULO 3

3. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA MAGNETO - MECÁNICO

3.1. Breve resumen de las alternativas consideradas

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema magneto-mecánico está basado en los motores de combustión interna en muchos de sus aspectos, sin embargo, para llegar a la forma final que se obtuvo se debió pasar por varias etapas de evolución.

En primer lugar se procuró de que el medio en el que se desplacen los pistones presente la mínima fricción posible, así como también sea fácil de implementar. En un principio se pensó en un bloque de plástico hecho a la medida de los imanes que se poseía, sin embargo esto fue muy difícil de implementar, por lo cual al final se usaron tubos de PVC que fueron cortados y luego torneados a la medida de los imanes, además se procuró hacer que este medio presente poca

fricción y a la vez los pistones no se balanceen en el interior del mismo.

La segunda parte en la que se debió tomar atención era en la construcción del cigüeñal, aquí se tuvo la asesoría de una persona que trabajaba haciendo piezas torneadas. La preocupación mayor se centraba en el hecho de que la pieza junto con las chumaceras presenten poca fricción al producirse el giro, de esta forma el movimiento que se produjese tendría las mínimas interrupciones posibles.

En esta segunda parte se tuvo que construir tres cigüeñales; uno se estropeó por la fragilidad de la pieza, otro fue hecho para dos cilindros, sin embargo en este caso el motor no desarrolló la fuerza suficiente para hacer girar los 180° a cada uno de los pistones y el tercero que se construyó, fue el definitivo y el más exitoso de los tres anteriormente mencionados.

En tercer lugar el conjunto formado por las chapas de biela, las bielas y los pistones debían ensamblarse de tal forma de producir la menor fricción posible, con el único fin de tener una facilidad tanto en la

construcción como en el movimiento ya con las piezas ensambladas en el motor.

Como último punto cabe anotar que los pistones jugaron un papel fundamental en la generación de más o de menos fuerza. Puesto que en ellos se encontraban los imanes permanentes, estos al acercarse a los electroimanes respectivos generaban la fuerza de repulsión suficiente para provocar un giro de 120° en el cigüeñal. En este caso la forma y el ensamblaje de los imanes fue considerado de igual forma durante todo el proyecto.

3.2. Detalle de los objetivos de este sistema en el funcionamiento del motor

Los principales objetivos de ésta parte del motor son:

- Sustentar los electroimanes y los pistones.
- Proveer el medio adecuado para convertir la energía eléctrica en energía mecánica.

Para cumplir con los objetivos arriba mencionados, la caja en donde debía ir el cigüeñal fue construida de madera, los cilindros fueron hechos de plástico y sujetos a la caja por arandelas. Además en el interior de los cilindros se hizo un "encamisado", de tal manera que

los pistones pudieran desplazarse sin mucha fricción y con el espacio justo para que no se balancearan de un lugar a otro.

Los brazos y el cigüeñal debían ser de un material que no se presente como un medio fácil para el transporte del campo magnético, es decir, que presente una reluctancia apropiada a las líneas de campo generadas tanto por el electroimán como por los pistones(imanes permanentes).

Otra característica que se requería era el poco peso que presentase el sistema ya en movimiento. El material escogido fue el aluminio por ser el que más cercanamente se adaptaba a los requerimientos.

CAPITULO 4

4. EL SISTEMA DE ELECTROIMANES

4.1. Breve descripción de los objetivos y el funcionamiento

Los principales objetivos que debieron cumplir los electroimanes son los siguientes:

- a) Proveer un campo magnético suficientemente fuerte para mover los pistones (imanes permanentes), por repulsión.
- b) Que éste campo magnético no acarree un gasto excesivo de corriente, que por efecto joule se traduzca en pérdidas.
- c) Que los electroimanes tengan un tamaño adecuado.
- d) Que presenten una baja resistencia y una relación L/R baja para aumentar su rapidez de conmutación.
- e) Deben presentar pocas pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

La realización de los objetivos planteados se explicará en más detalle con los cálculos, aunque algunos de ellos no se pudieron cumplir en su totalidad por falta de mano de obra calificada y la poca información acerca del tema.

Los electroimanes basan su funcionamiento en pulsos de corriente recibidos del circuito de control, que generan un campo magnético lo suficientemente fuerte como para mover a los pistones a lo largo del recorrido generado por la construcción del cigüeñal. Su construcción se realizó basándose en pruebas experimentales que se llevaron a cabo con diferentes electroimanes construidos, ya que información al respecto existió en muy poco volumen.

4.2. Datos de los electroimanes obtenidos experimentalmente

Los electroimanes están conformados por tres mil vueltas de alambre esmaltado calibre 25 que soporta 0.475 A como corriente máxima, sin embargo dado que nosotros lo que enviamos son pulsos de corriente, el consumo de potencia promedio disminuye.

Su resistencia calculada experimentalmente es de 41.9 ohmios y su inductancia también calculada experimentalmente es de 730 mH.

La laminación del núcleo del electroimán no fue posible, ya que las personas que consultamos al respecto nos informaron que ellos embobinaban sobre núcleos ya contruidos, y además de la forma que deseábamos el núcleo era complicada su construcción, por lo que se optó por hacer un núcleo sólido de acero de forma cilíndrica, confiando en eliminar los efectos de las corrientes parásitas con el uso de corriente continua la mayor parte del tiempo.

CAPITULO 5

5. DETALLE DEL ACOPLADOR ÓPTICO Y EL CIRCUITO DE CONTROL

5.1. Breve descripción del acoplador óptico como parte del circuito de sincronismo

El sincronismo alcanzado entre la posición de los pistones y el tiempo exacto de disparo no hubiera podido ser alcanzado sin la presencia de un sensor óptico como parte del circuito de control.

El sensor óptico está conformado por un LED infrarrojo como transmisor y un fototransistor como receptor, el principal objetivo de éste acople era el de conocer la posición de cada uno de los pistones durante el movimiento, para así activar al electroimán apropiado. Puesto que la secuencia de activación no era aleatoria sino fija, cualquier descalibración de ésta parte del circuito provocaría una mal funcionamiento del motor.

El opto-acoplador se lo hizo funcionar para que nos presentará dos posibles resultados 0V cuando pasaba luz o 5V cuando no pasaba luz. Estos dos estados fueron factibles gracias a la presencia de una rueda metálica acoplada al cigüeñal, la cual poseía unas ranuras hechas a la medida de la ranura del opto-acoplador y además con una diferencia de 120° entre ellas, este último detalle fue crucial ya que de ésta manera cada uno de los pistones sería repelido en el momento exacto y no necesitaríamos conocer el tiempo requerido para producir un giro de 120° . Por lo tanto el mismo circuito de acuerdo a la posición de la rueda se encargaba de activar o no a cada uno de los electroimanes.

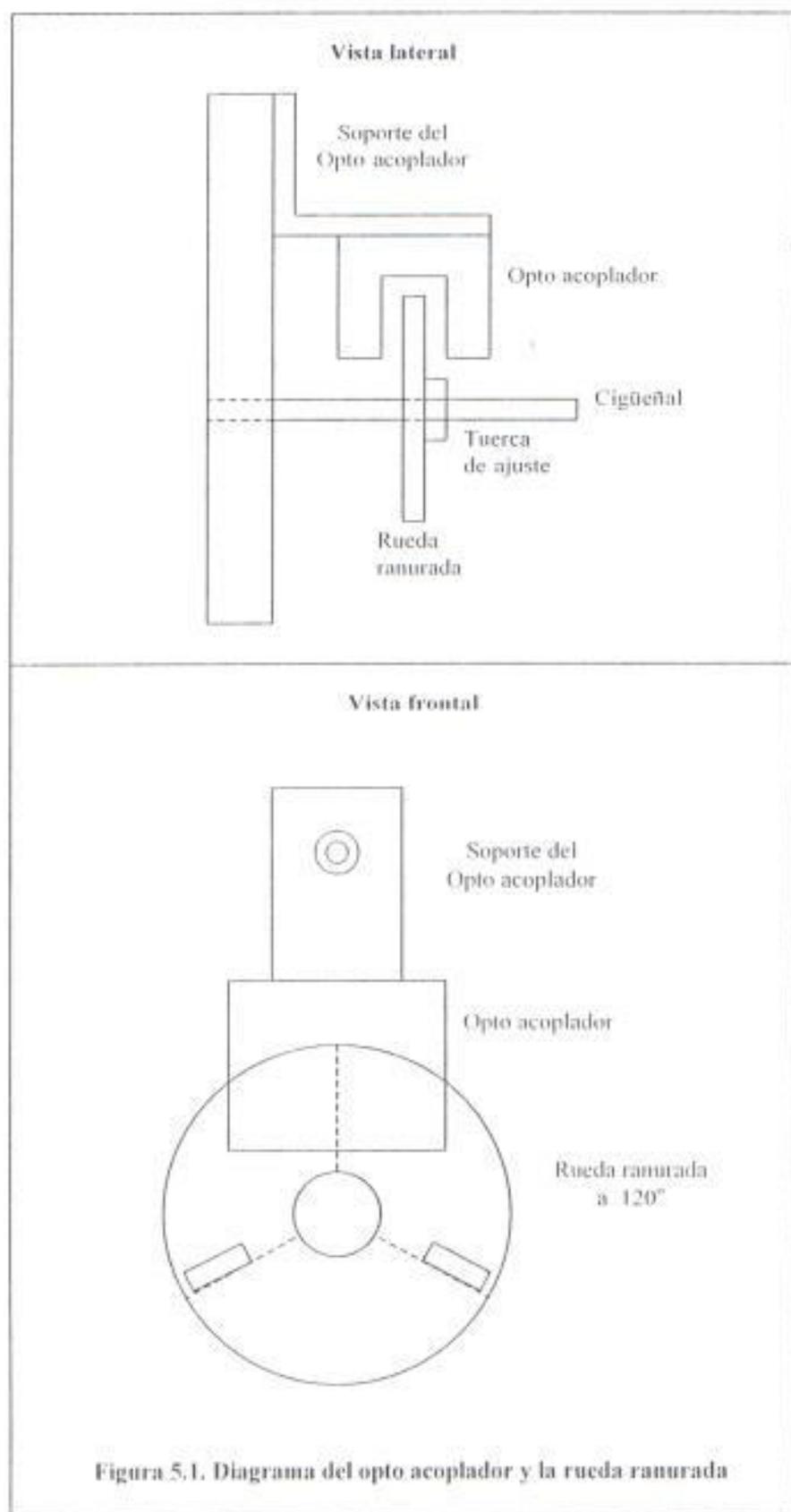


Figura 5.1. Diagrama del opto acoplador y la rueda ranurada

En la figura 5.1. se muestra con más claridad el objetivo de esta parte del circuito de control, como podemos observar cada uno de los electroimanes en forma secuencial se disparan cuando pasa luz por la respectiva ranura en la rueda metálica, quedando encendido el electroimán respectivo durante 120° del giro del cigüeñal, mientras que los otros dos permanecen apagados. Es decir, cada electroimán solo permanece encendido una tercera parte del tiempo total que le toma al cigüeñal dar una vuelta.

La rueda metálica con las ranuras además posee una tuerca, la cual puede ser ajustada con el fin de calibrar una secuencia de encendido o establecer otra secuencia de disparo de los electroimanes.

5.2. Descripción y funcionamiento del circuito de control

5.2.1. Funcionamiento del circuito de control

El circuito de control está basado en el funcionamiento del CI 555 en modo de un solo disparo, este junto con un contador digital que es el que envía los pulsos a los transistores de conmutación, activan a cada uno de los relays que son los que finalmente dejan pasar o no corriente a los electroimanes respectivos.

La operación del circuito de control durante una vuelta del cigüeñal es como sigue:

En primera instancia cuando se arranca el motor manualmente, el opto-acoplador sensa el paso de la primera ranura, en ese momento el fototransistor se satura enviando una señal de aproximadamente 0V al circuito eliminador de ruido; este circuito elimina cualquier falso disparo producido quizás por la vibración del motor durante el movimiento. Luego una vez pasado este circuito previamente calibrado, la salida del CI 555 genera un pulso que inmediatamente es enviado a la entrada CLK del contador digital 74161, este último comienza a contar y genera un código en su salida que representa un "1" decimal, el mismo hace que el transistor correspondiente se sature y con esto el relay se active, haciendo que pase corriente por el respectivo electroimán. El electroimán en cuestión hace que el pistón respectivo salga disparado por la repulsión, permitiendo de esta forma que la siguiente ranura de la rueda metálica pase por el opto-acoplador. En este punto el proceso se repite, pero ahora el contador generará un "2" decimal en sus salidas, haciendo que el segundo electroimán se active, y con esto provocando que el cigüeñal y por lo tanto la rueda con las ranuras giren otros

120°. Por último la ranura restante indica la presencia del último pistón en la posición superior del cilindro, con esto se produce el último disparo en la vuelta.

De allí en adelante el proceso se repite, es decir, el contador vuelve a "1" decimal en sus salidas, luego al "2" y finalmente al "3", activando así a cada uno de los electroimanes en forma secuencial.

5.2.2. Cálculos y detalle de cada una de las partes del circuito de control

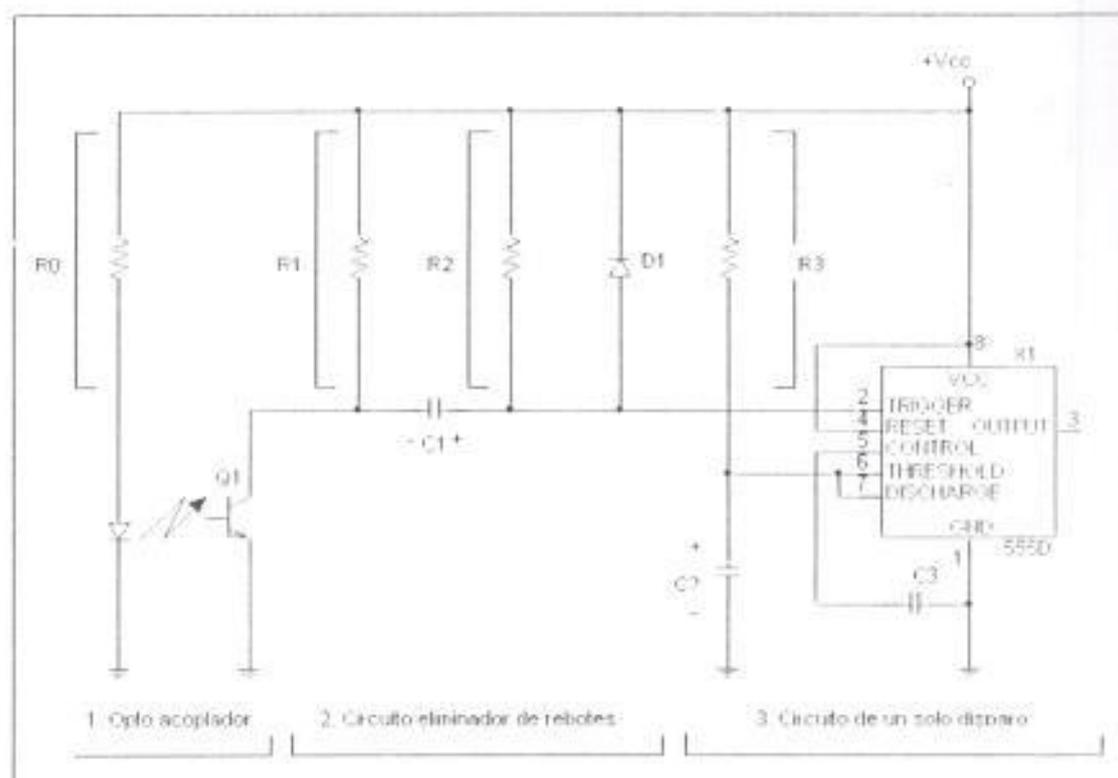


Figura 5.2. Esquema del acoplador óptico y el circuito de entrada

El acoplador óptico y el circuito de un solo disparo se muestran en la figura. Cada una de las partes de este circuito están relacionadas unas con otras, por lo tanto sus cálculos tendrán una cierta relación de dependencia.

En primer lugar se verá el funcionamiento de la tercera parte de éste circuito, cuyo esquema detallado se muestra en la figura 5.3.

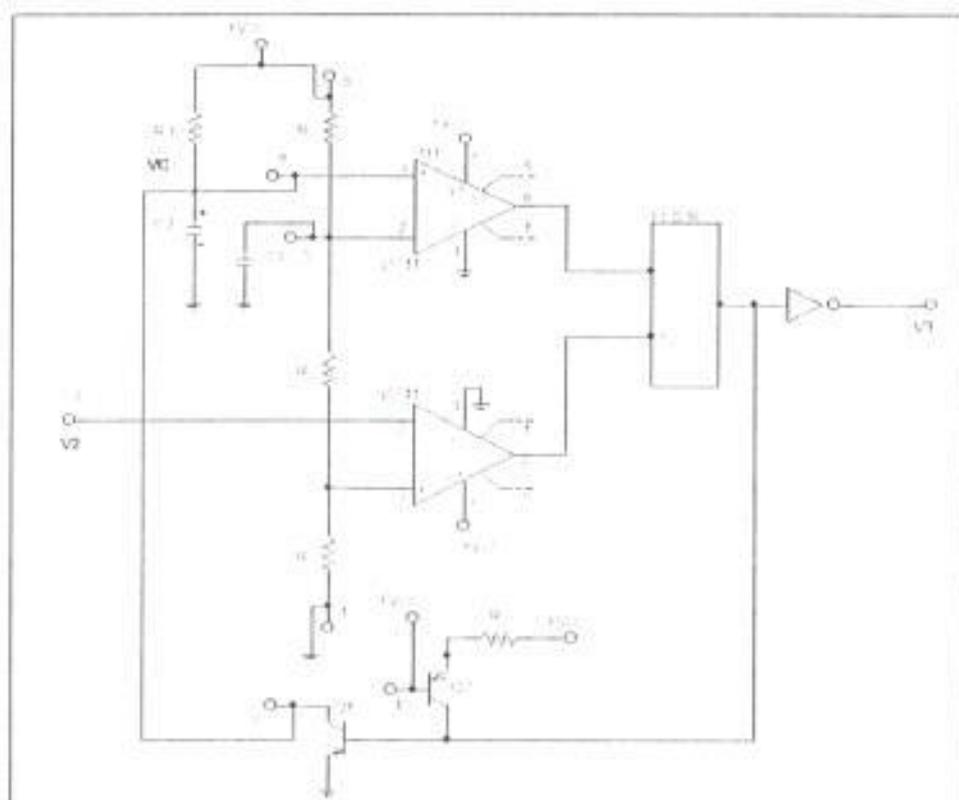


Figura 5.3. Detalle del circuito de un solo disparo

Para entender su funcionamiento se asumirá una señal en la entrada y se obtendrá la señal de salida, con el fin de obtener las ecuaciones que conduzcan a determinar los parámetros necesarios para un diseño óptimo.

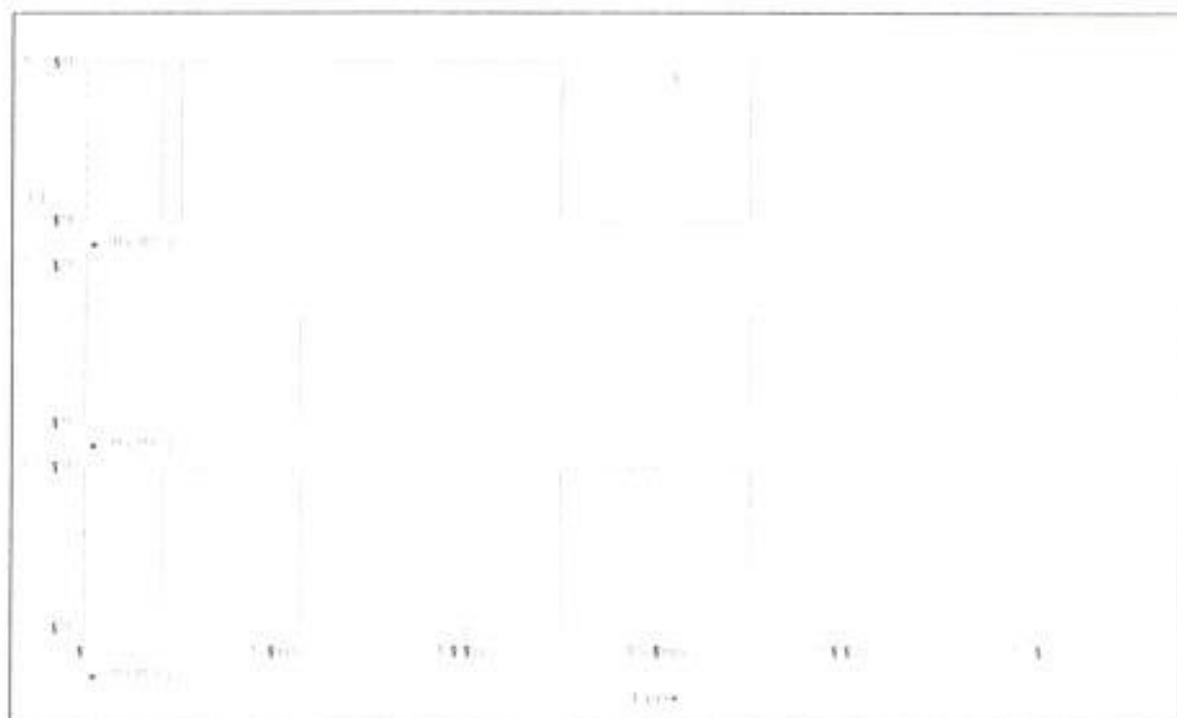


Figura 5.4. Simulación de señales en el circuito de un solo disparo

Dadas las señales arriba detalladas, se pueden plantear las siguientes ecuaciones:

$$V_c(t) = V_{cc} \left(1 - e^{(-t/\tau_c)} \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{2}{3} V_{cc} = V_{cc} \left(1 - e^{-t_c/\tau_c} \right)$$

$$t_{alto} = t_c = \tau_c \ln(3) = R3C2 \ln(3)$$

$$V_c(t) = \frac{2}{3} V_{cc} \left(e^{(-t/\tau_d)} \right) \quad (5.2)$$

Por lo tanto $V_c(t) \cong 0$ si $t_d \cong 5\tau_d = 5RQC2$

Ahora las condiciones para el funcionamiento deseado son las siguientes de acuerdo a lo visto hasta el momento:

□ Que no existan rebotes en V2.

$$\square t_{bajo} < t_c = R3C2 \ln(3) \quad (5.3)$$

$$\square t_d + t_c < t_{ed} \quad (5.4)$$

Donde:

τ_c : Constante de tiempo para la carga del capacitor.

τ_d : Constante de tiempo para la descarga del capacitor.

t_c : Es el tiempo de carga del capacitor.

t_d : Es el tiempo de descarga del capacitor.

t_{bajo} : Es el tiempo que permanece en bajo la señal en el pin2.

t_{ed} : Es el tiempo entre disparos de los electroimanes.

t_{alto} : Es el tiempo que permanece en el alto la salida en el pin 3.

RQ: Es la resistencia de colector- emisor del transistor

Como se pudo ver en las condiciones anteriores, para un correcto funcionamiento es necesario un circuito que elimine la posibilidad de tener en la entrada una señal con rebotes. Por esta razón se planteará un circuito que cumpla con este objetivo.

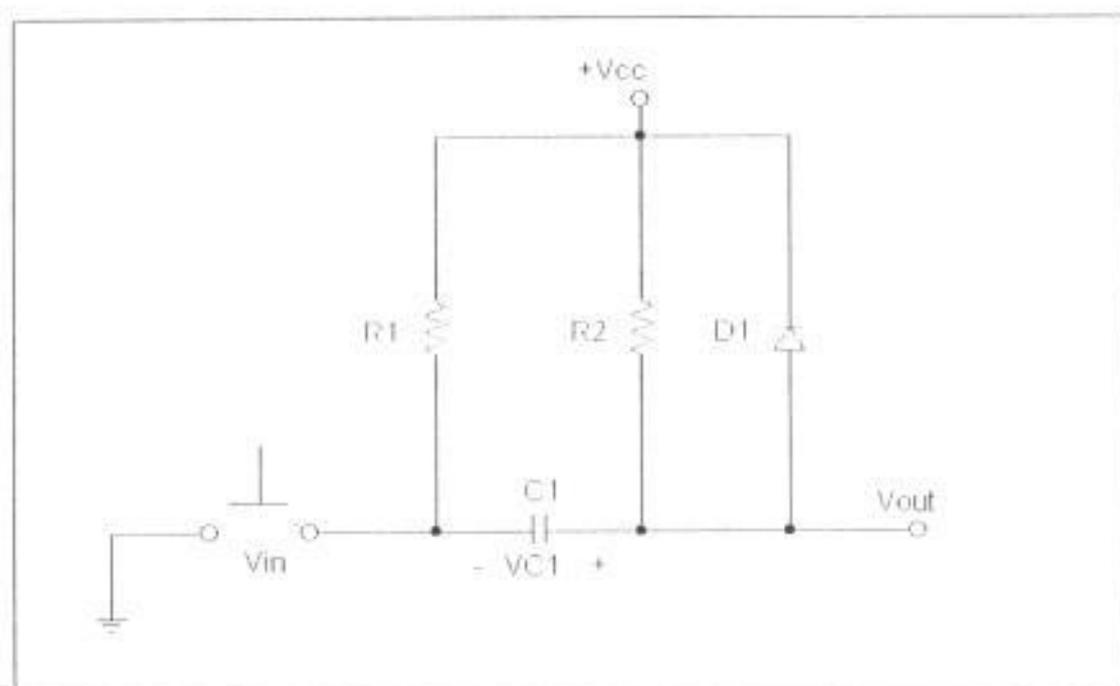


Figura 5.5. Esquemático del circuito eliminador de rebotes

En este circuito se asume que la entrada es la de una botonera, con el fin de plantear el peor de los casos, sin embargo, el mismo será válido para cualquier entrada que conmute entre dos valores posibles, alto y bajo.

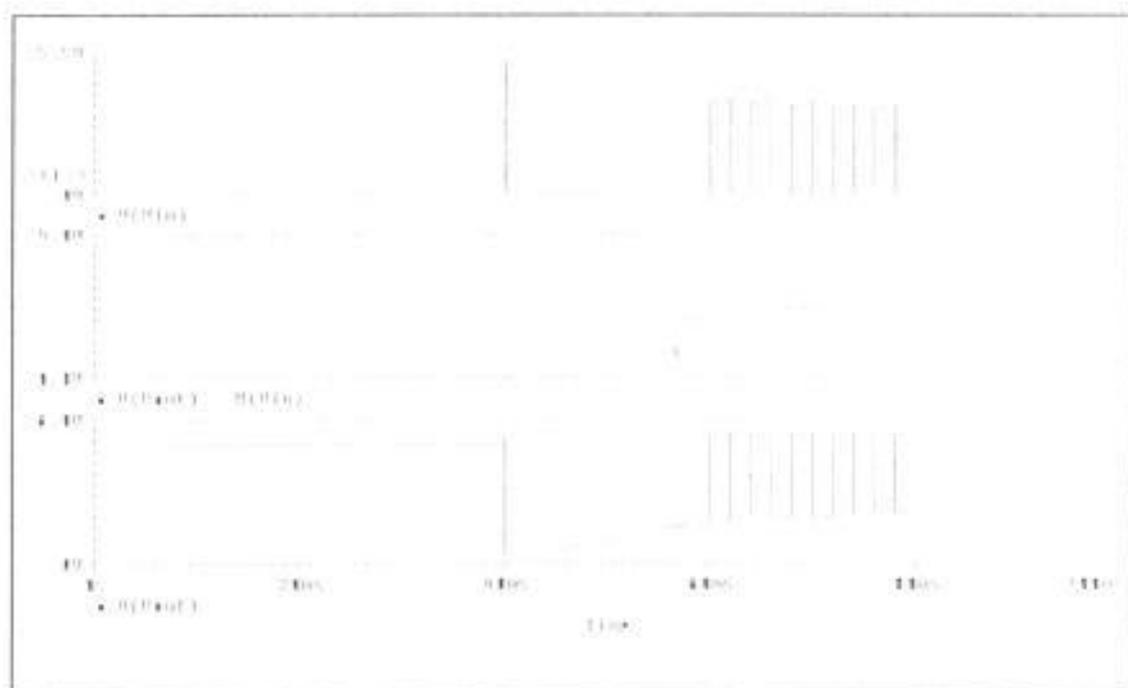


Figura 5.6. Simulación de señales en el circuito eliminador de rebotes

Dados los gráficos arriba se plantean las siguientes ecuaciones:

$$V_c(t) = V_{cc} \left(1 - e^{(-t/\tau_c1)} \right) \quad (5.5)$$

$$\frac{1}{3} V_{cc} = V_{cc} \left(1 - e^{(-tb2/\tau_c1)} \right)$$

$$tb2 = \tau_c1 \ln(3/2) = R2C1 \ln(3/2)$$

Además se deben dar las siguientes condiciones:

$$\tau_{d1} \cong 5(R_d // R2 + R1)C1 \gg \tau_{ar} \quad (5.6)$$

- $t_{c1} \cong 5R_2C_1 \gg t_{br}$ (5.7)
- $R_2 \cong R_1$, con el fin de evitar desbalances en la carga y descarga del capacitor.

Donde:

t_{c1} : Constante de tiempo para la carga del capacitor 1.

t_{b2} : Es el tiempo de carga del capacitor a un tercio del voltaje de la fuente.

t_{c1} : Es el tiempo de carga total del capacitor 1

t_{d1} : Es el tiempo de descarga total del capacitor 1

t_{ar} : Es el tiempo de alto durante el rebote.

t_{br} : Es el tiempo de bajo durante el rebote

R_d : Es la resistencia del diodo en conducción.

Como se puede observar con este circuito se eliminan dos problemas como son:

- La posibilidad de rebotes indeseados que dispararian erróneamente a los electroimanes.
- Tiempos de estado en bajo excesivos que también afectarían el correcto funcionamiento del circuito.

Examinando cada uno de los gráficos descritos anteriormente, se puede concluir que se necesita conocer el tiempo

aproximado en que el cigüeñal gira 120° . Para tener una idea de estos tiempos se tomará como base los tiempos de activación y desactivación de los electroimanes obtenidos en el primer prototipo, además se considerará un rango lo suficientemente amplio con el fin de asegurar que el valor correcto se encuentra incluido en el rango de valores escogido.

Resumiendo y combinando las ecuaciones anteriores se puede obtener lo siguiente:

$$t_{bajo} < t_c = R_3 C_2 \ln(3)$$

$$t_{bajo} = t_{b2} = R_2 C_1 \ln(3/2)$$

Por lo tanto:

$$\frac{R_2}{R_3} < \frac{C_2 \ln(3)}{C_1 \ln(3/2)}$$

Por otro lado:

$$t_c + t_d < t_{ed}$$

$$R_3 C_2 \ln(3) + 5 R_4 C_2 < t_{ed}$$

De las condiciones del segundo circuito se puede obtener la siguiente única condición:

$$t_{c1} \cong 5 R_2 C_1 \gg t_{br}$$

Se asumirá ahora los siguientes valores:

$$t_{ed_{\min}} = 50\text{ms} \quad RQ = 20\Omega = RD \quad t_{br_{\min}} = 2\text{ms}$$

$$t_{ed_{\max}} = 150\text{ms} \quad C1 = C2 = 1\mu\text{f} \quad t_{br_{\max}} = 5\text{ms}$$

Reemplazando en las respectivas ecuaciones se obtiene:

$$(a) \quad R2_{(1)} \gg \frac{(2 \times 10^{-3})}{5 \times 1 \times 10^{-6}} = 400\Omega$$

$$R2_{(2)} \gg \frac{(5 \times 10^{-3})}{5 \times 1 \times 10^{-6}} = 1000\Omega$$

$$(b) \quad R3_{(1)} < \frac{50 \times 10^{-3} - 5(20)(1 \times 10^{-6})}{1 \times 10^{-6} \ln(3)} = 45420.94\Omega$$

$$R3_{(2)} < \frac{150 \times 10^{-3} - 5(20)(1 \times 10^{-6})}{1 \times 10^{-6} \ln(3)} = 136444.86\Omega$$

$$(c) \quad \frac{R2}{R3} < \frac{C2 \ln(3)}{C1 \ln(3/2)}$$

$$R2 < R3(2.7095)$$

$$R2 < 45420.94 \times (2.7095) = 123068.22\Omega$$

Como se ha podido observar, se tuvo que hacer algunas suposiciones para poder obtener los valores con los cuales se empezaría a trabajar experimentalmente. A partir de los mismos, ya en la práctica se hizo algunos ajustes que condujeron a los siguientes valores obtenidos experimentalmente para un funcionamiento óptimo:

$$R3 = 33K\Omega$$

$$R1 = 8.9K\Omega + P1, \text{ donde } P1 = 35 K\Omega$$

$$R2 = 8.9 K\Omega + P2, \text{ donde } P2 = 39.4K\Omega$$

El valor de $R0$ en el opto acoplador fue también obtenido experimentalmente, ya que no se poseía la curva de respuesta del sensor óptico. El objetivo en éste caso era el de llegar a una respuesta en la entrada lo más parecida a la de switch, es decir, valores de 0V o de 5V que son con los cuales se trabajó en los cálculos en el circuito de control. En nuestro caso el valor óptimo fue de 760Ω .

Finalmente la figura muestra el circuito de entrada.

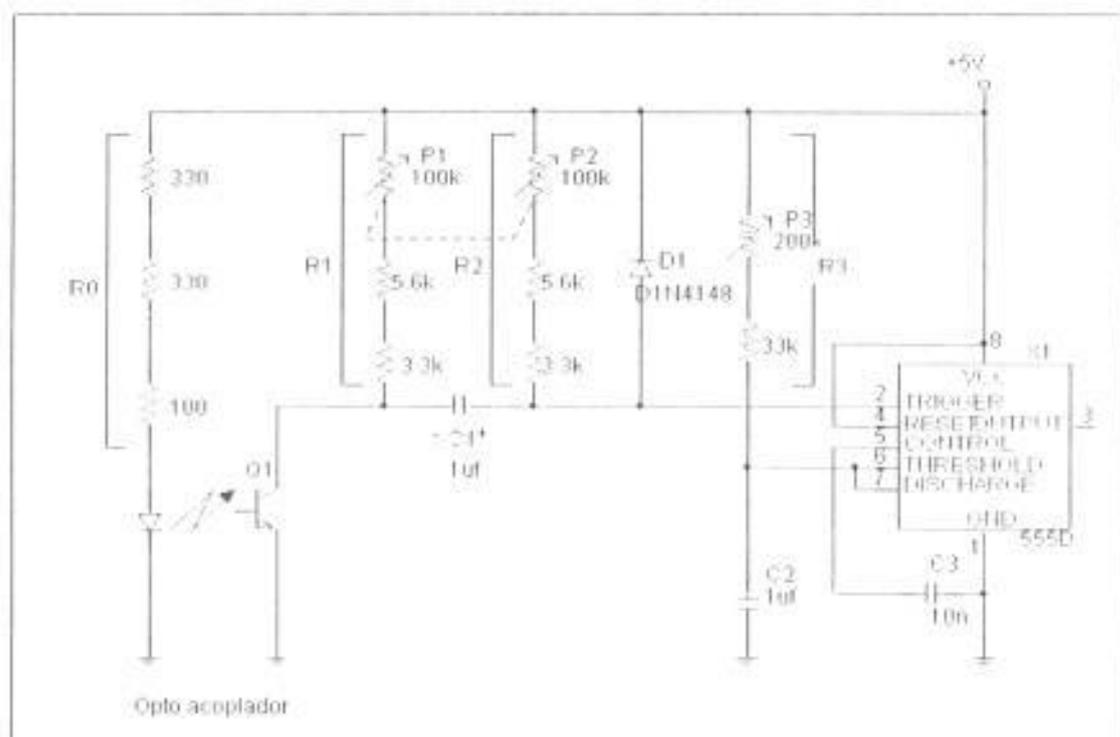


Figura 5.7. Esquemático final del circuito de entrada al circuito de control

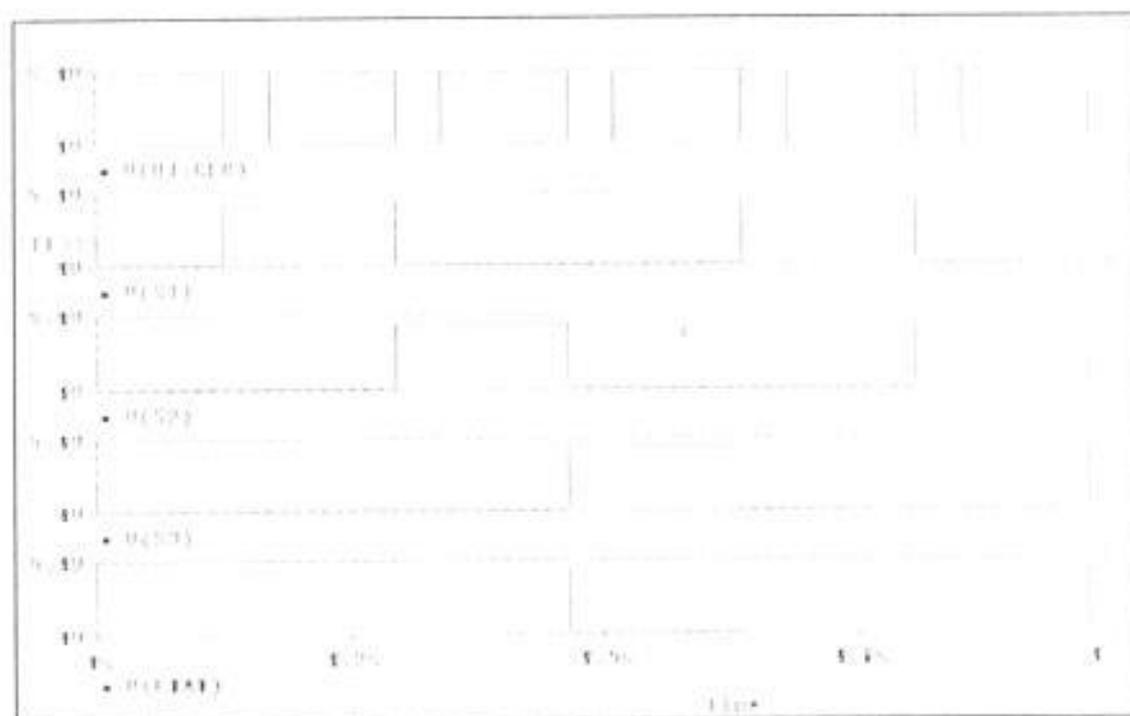


Figura 5.9. Simulación de señales en el circuito generador de pulsos

Finalmente se presentará los circuitos de salida, que son los que nos permiten activar o desactivar los respectivos electroimanes. Los tres circuitos que conforman este bloque son idénticos por lo se explicará solo uno de ellos.

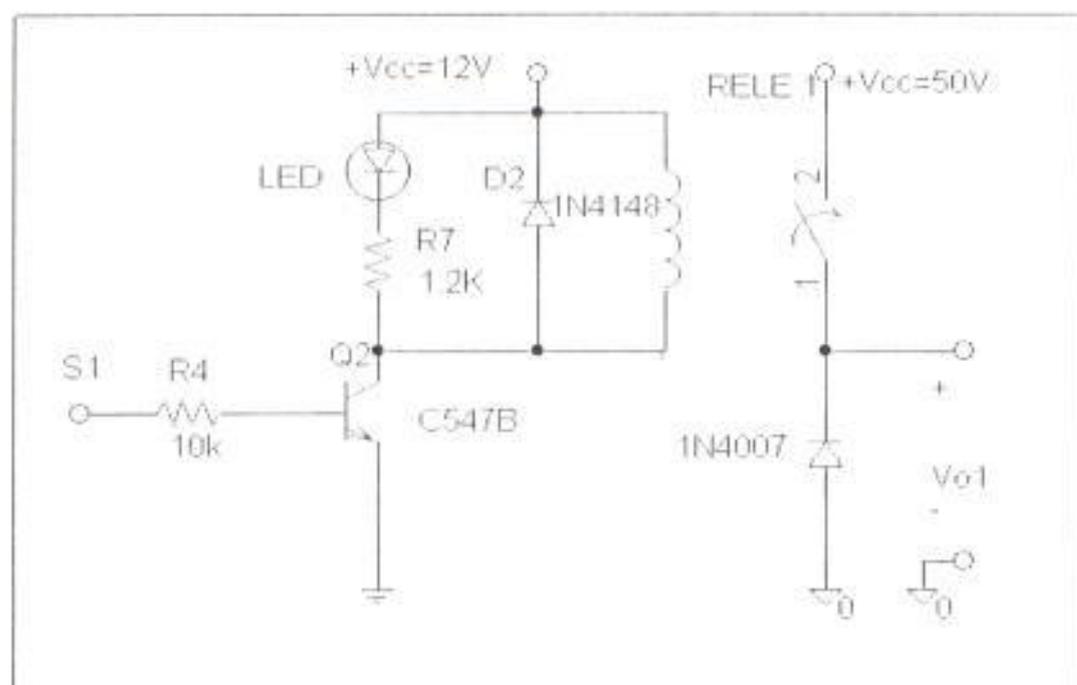


Figura 5.10. Circuito de salida para activación de electroimanes

Se tomará al primer circuito como objeto de análisis. En el mismo, cuando una señal lógica alta llega a la base del transistor éste se satura, permitiendo de esta forma el paso de corriente a través del LED indicador y del relay, este último viéndose energizado activa sus contactos y deja pasar corriente al electroimán. Luego de un determinado tiempo, la entrada en la base del transistor pasa a un estado lógico bajo lo cual pone en corte al transistor, mientras esto ocurre tanto la bobina del relay como la del electroimán se descargan a través de sus respectivos diodos.

Es importante notar que los electroimanes en los circuitos de salida son polarizados con una referencia diferente a la del resto del circuito de control. Esta particularidad se debe a que la alta corriente que pasaba en el momento de la descarga del electroimán activaba de manera errónea al contador digital, por lo cual ambos circuitos fueron aislados eléctricamente.

CAPITULO 6

6. EL SISTEMA DE ALIMENTACION

6.1. Sistema de alimentación para el circuito de control

6.1.1. Visión general del circuito

El circuito de alimentación está pensado para cubrir las necesidades tanto del circuito digital como la de los circuitos de salida que activan cada uno de los electroimanes. Por esta razón para el circuito de entrada y el generador de pulsos serán alimentados a +5 V y con una corriente máxima de 0.1 A, en tanto que los circuitos de salida serán alimentados a +12 V con una corriente máxima de 0.1 A.

Los valores máximos de corriente que han sido calculados para esta fuente de alimentación fueron obtenidos experimentalmente, utilizando para ello fuentes de voltaje

independientes que permitió observar la corriente que exigía cada una de las partes del circuito.

6.1.2. Cálculo de los parámetros del circuito

Para el diseño de esta fuente de alimentación fueron usados dos reguladores LM 317T. En primer lugar se realizarán los cálculos para la fuente de +12V la cual tiene los siguientes requerimientos:

$$V_{(out)} = 12V \quad I_{(out)} = 0.2 A \quad TA = 40^{\circ}C \quad TJ_{(max)} = 150^{\circ}C$$

$$Vrpp_{(out)} \leq 15mVpp$$

Donde: $V_{(out)}$: Es el voltaje salida requerido

$I_{(out)}$: Es la corriente máxima de salida a la carga

TA : Es la temperatura ambiente

$TJ_{(max)}$: Es la temperatura de unión máxima

$Vrpp_{(out)}$: Es el voltaje de rizado pico-pico de salida máximo

La determinación de cada uno de los parámetros del circuito se detalla a continuación:

- a. Cálculo del rizado en la entrada

a. Cálculo del rizado en la entrada

$$\begin{aligned} V_{rpp(in)} &= V_{rpp(out)} \times 10^{[(dB - 20 \log V_{out}) / 20]} \\ &= 15 \text{ mVpp} \times 10^{[(80 - 20 \log 12) / 20]} \\ &= 12.5 \text{ Vpp} \end{aligned}$$

b. Cálculo de los límites en el voltaje de entrada

$$(12 + 2) \text{ V} < V(in) < 40 \text{ V} \quad V(in)_{min} = 14 \text{ V}$$

$$V_{pk} = 12.6 \times \sqrt{2} - 1.4 = 16.42 \text{ V}$$

$$V_{rpp(in)} = 16.42 - 14 = 2.42 \text{ V}$$

c. Determinación de carga ligera o pesada

$$V_{rpp(in)} < 0.1 \text{ Vdc}$$

$$2.42 \text{ V} < 0.1 \times (16.42 + 14) / 2$$

$$2.42 \text{ V} < 1.521 \text{ V}$$

La última expresión no se cumple por lo tanto se trata de una carga pesada.

- d. Determinación gráfica del capacitor para filtrado y el Vdc.

$$C = 1000 \text{ uF} \quad V_{dc} = 15.25 \text{ V}$$

$$I_{(out)} = 0.2 \text{ A}$$

- e. Cálculo del disipador

$$\begin{aligned} \theta_{JA \text{ max}} &= (T_{j \text{ max}} - T_A) / P_{d \text{ max}} \\ &= (T_{j \text{ max}} - T_A) / [(V_{dc(in)} - V(o)_{min}) \times I(o)_{max}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_{JA \text{ max}} &= (150 - 40) / [(15.25 - 12) \times 0.2] \\ &= 169.23 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W} < 50 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W} \end{aligned}$$

La última expresión no se cumple, por lo tanto no necesitamos un disipador

- f. Calculo de las resistencias de salida

$$V_o = 1.2 \times (1 + R_2 / R_1) + 50 \text{ uA } R_2$$

Siendo $R_1 = 120 \text{ } \Omega$ tenemos lo siguiente:

$$V(o) = 12 \text{ V} = 1.2 + 0.01R_2 + 50 \text{ uA } R_2$$

$$R_2 = 1074.63 \text{ } \Omega$$

Este valor puede ser obtenido con un potenciómetro de $1\text{K}\Omega$ y una resistencia de 100Ω .

Una vez calculados todos los parámetros necesarios, el circuito queda como sigue:

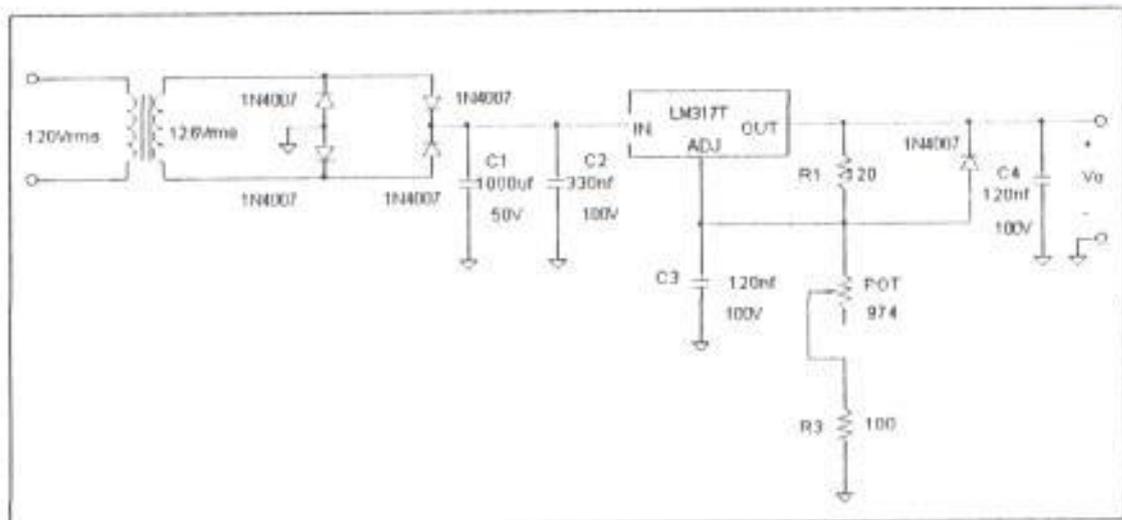


Figura 6.1. Esquemático de la fuente de +12V

Una vez hecho el diseño de la fuente de +12V se realizarán los cálculos necesarios para la fuente de +5V, de la misma forma se empezará detallando cada uno de los requerimientos para este circuito:

$$V_{(out)} = 5V \quad I_{(out)} = 0.1 A \quad T_A = 40^{\circ}C \quad T_{J(max)} = 150^{\circ}C$$

$$V_{rpp(out)} \leq 15mV_{pp}$$

Donde: $V_{(out)}$: Es el voltaje salida requerido

$I_{(out)}$: Es la corriente máxima de salida a la carga

T_A : Es la temperatura ambiente

$T_{J(max)}$: Es la temperatura de unión máxima

$V_{rpp(out)}$: Es el voltaje de rizado pico-pico de salida máximo

La determinación de cada uno de los parámetros del circuito se detalla a continuación:

a. Cálculo del rizado en la entrada

$$\begin{aligned} V_{rpp(in)} &= V_{rpp(out)} \times 10^{[(dB - 20 \log V_{out}) / 20]} \\ &= 15 \text{ mVpp} \times 10^{[(80 - 20 \log 5) / 20]} \\ &= 30 \text{ Vpp} \end{aligned}$$

b. Cálculo de los límites en el voltaje de entrada

$$(5 + 2) \text{ V} < V(in) < 40\text{V} \quad V(in)_{min} = 7 \text{ V}$$

En este caso dado que la entrada de la fuente de +5V es la fuente de +12V que ya se describió, se trata indiscutiblemente de una carga ligera.

El capacitor de filtrado no será incluido puesto que la entrada es una entrada regulada.

c. Cálculo del disipador

$$\begin{aligned} \theta_{JA \max} &= (T_{j \max} - T_A) / P_{d \max} \\ &= (T_{j \max} - T_A) / [(V_{dc(in)} - V(o)_{\min}) \times I(o)_{\max}] \\ \theta_{JA \max} &= (150 - 40) / [(12 - 5) \times 0.1] \\ &= 78.57 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W} < 50 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W} \end{aligned}$$

La última expresión no se cumple, por lo tanto no necesitamos un disipador

d. Calculo de las resistencias de salida

$$V_o = 1.2 \times (1 + R_2 / R_1) + 50 \mu\text{A} R_2$$

Siendo $R_1 = 120 \Omega$ tenemos lo siguiente:

$$V(o) = 5V = 1.2 + 0.01R_2 + 50 \mu\text{A} R_2$$

$$R_2 = 378.11 \Omega$$

Este valor puede ser obtenido con un potenciómetro de 500Ω .

Dado que la demanda tanto de corriente como de voltaje de ésta fuente eran muy grandes y en el mercado no se encontró el regulador apropiado para cumplir las mismas, se optó por diseñar dos fuentes de voltaje de +25 V con la misma demanda de corriente requerida, para de esta forma colocarlas en serie y formar el voltaje de salida necesario.

6.2.2. Cálculos de los parámetros del circuito

Para el diseño de esta fuente de alimentación fueron usados dos reguladores LM317T. Se describirá una de la fuentes de voltaje de +25V puesto que la otra es idéntica en todos sus parámetros, siendo sus requerimientos los siguientes:

$$V_{(out)} = 25V \quad I_{(out)} = 1.2 A \quad T_A = 40^{\circ}C \quad T_{J(max)} = 150^{\circ}C$$

$$V_{rpp(out)} \leq 15mV_{pp}$$

Donde: $V_{(out)}$: Es el voltaje salida requerido

$I_{(out)}$: Es la corriente máxima de salida a la carga

T_A : Es la temperatura ambiente

$T_{J(max)}$: Es la temperatura de unión máxima

$V_{rpp(out)}$: Es el voltaje de rizado pico-pico de salida

máximo

La determinación de cada uno de los parámetros del circuito se detalla a continuación:

a. Cálculo del rizado en la entrada

$$\begin{aligned} V_{rpp(in)} &= V_{rpp(out)} \times 10^{[(dB - 20 \log V_{out}) / 20]} \\ &= 15 \text{ mV}_{pp} \times 10^{[(80 - 20 \log 25) / 20]} \\ &= 6 \text{ V}_{pp} \end{aligned}$$

b. Cálculo de los límites en el voltaje de entrada

$$(25 + 2) \text{ V} < V(in) < 40 \text{ V} \quad V(in)_{min} = 27 \text{ V}$$

$$V_{pk} = 24 \times \sqrt{2} - 1.4 = 32.54 \text{ V}$$

$$V_{rpp(in)} = 32.54 - 27 = 5.54 \text{ V}$$

c. Determinación de carga ligera o pesada

$$V_{rpp(in)} < 0.1 \text{ V}_{dc}$$

$$5.54 \text{ V} < 0.1 \times (32.54 + 27) / 2$$

$$5.54 \text{ V} < 2.977 \text{ V}$$

La última expresión no se cumple por lo tanto se trata de una carga pesada.

- d. Determinación gráfica del capacitor para filtrado y el Vdc.

$$C = 2500 \text{ uf} \quad V_{dc} = 28.2 \text{ V}$$

$$I_{(out)} = 1.2 \text{ A}$$

- e. Cálculo del disipador

$$\begin{aligned} \theta_{JA \text{ max}} &= (T_{J \text{ max}} - T_A) / P_{d \text{ max}} \\ &= (T_{J \text{ max}} - T_A) / [(V_{dc(in)} - V(o)_{min}) \times I(o)_{max}] \\ \theta_{JA \text{ max}} &= (150 - 40) / [(28.2 - 25) \times 0.2] \\ &= 28.65 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W} < 50 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W} \end{aligned}$$

La última expresión se cumple, por lo tanto necesitamos un disipador con la siguiente resistencia térmica:

$$\theta_{sA \text{ max}} = 28.65 - 4 = 24.65 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$$

- f. Cálculo de las resistencias de salida

$$V_o = 1.2 \times (1 + R_2 / R_1) + 50 \text{ uA } R_2$$

Siendo $R_1 = 120 \text{ } \Omega$ tenemos lo siguiente:

$$V(o) = 25 \text{ V} = 1.2 + 0.01R_2 + 50 \text{ uA } R_2$$

$$R_2 = 2269.11 \text{ } \Omega$$

CAPITULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

A continuación se detallan algunas de las conclusiones más importantes a lo largo de éste trabajo:

1. El cigüeñal y las chumaceras presentan cierta fricción que afectan indiscutiblemente el normal movimiento de los pistones.
2. Durante el movimiento normal del motor, las uniones entre las chapas de biela y el cigüeñal frenan el impulso brindado por los pistones para el movimiento giratorio, esto resulta en una pérdida de energía en forma de calor.
3. El hecho de que los pistones sean constituidos en su parte superior por imanes permanentes limita el uso de los mismos durante un tiempo de vida corto. Esto se debe a que las fuerzas

generadas entre los pistones y los electroimanes son de repulsión y por lo tanto se presenta una desmagnetización progresiva, la cual poco a poco va alterando la orientación remanente de los dipolos magnéticos en los imanes utilizados.

4. El hecho de utilizar un núcleo de acero sólido en los electroimanes produce pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.
5. La debilidad del torque generado por el motor, impide cualquier medición que se pueda realizar en torno a la potencia desarrollada por el mismo.
6. La distancia mínima existente entre la cabeza del pistón y el núcleo de los electroimanes es crítica a la hora de arrancar el motor. Esta distancia debe ser lo suficientemente grande como para impedir que los imanes sean atraídos por el núcleo del electroimán y lo suficientemente pequeña como para producir la fuerza de repulsión necesaria para hacer girar 120° al cigüeñal.
7. Los contactos de los relays presentan chispas al producirse la transición entre la activación y desactivación de los

electroimanes, esta circunstancia puede acarrear con el tiempo una disminución en la conductividad de estos contactos, además de presentarse transientes indeseados al alimentar con corriente a los electroimanes.

8. La distancia entre los cilindros está limitada por la inducción mutua que pueda existir entre los electroimanes y los imanes permanentes de pistones distintos.

7.2. Recomendaciones

Algunas son las recomendaciones que se pueden realizar al prototipo ya construido, entre ellas podemos anotar las siguientes:

1. El problema de la fricción puede ser disminuido diseñando de mejor manera el cigüeñal y las chapas de biela que son en definitiva las partes que más aportan a la fricción en el motor.
2. Los imanes permanentes que son la base del funcionamiento del motor, tienen un tiempo de vida antes de perder totalmente sus propiedades magnéticas. Por esta razón la única mejora que podría realizarse al respecto sería la de conseguir imanes que presenten un magnetismo remanente mayor del que se posee.

3. Relaciones de L y R menores en las bobinas de los electroimanes acarrearán menores tiempos de carga y de descarga durante la activación y desactivación de los mismos. Esto mejoraría la fuerza de repulsión cuando los pistones se encuentren en la parte superior de los cilindros, ya que las corrientes máximas se alcanzarían en un menor tiempo.
4. Los circuitos de salida para el manejo de los electroimanes pueden ser mejorados utilizando tiristores en lugar de relays como interruptores electrónicos, sin embargo, esta mejora acarrearía una mayor complejidad al circuito ya que los tiristores tendrían que ser apagados con algún tipo de señal en el momento apropiado.
5. Las corrientes parásitas podrían ser disminuidas colocando un núcleo laminado, sin embargo por la forma de los imanes en la cabeza de los pistones, este núcleo debería ser circular y con centro hueco, razón por la cual su construcción se hace difícil.
6. En el caso de las pérdidas por histéresis, el núcleo debe ser de un material "suave", esto es que se magnetice y desmagnetice

con facilidad, además debe presentar una curva de histéresis angosta con el fin de disminuir al mínimo estas pérdidas.

7. Dado que el prototipo desarrollado produce un movimiento recíprocante, se presentan a futuro muchas aplicaciones principalmente en le área industrial que pueden aprovechar éste tipo de movimiento, una de estas aplicaciones podría ser la que se muestra en el gráfico:

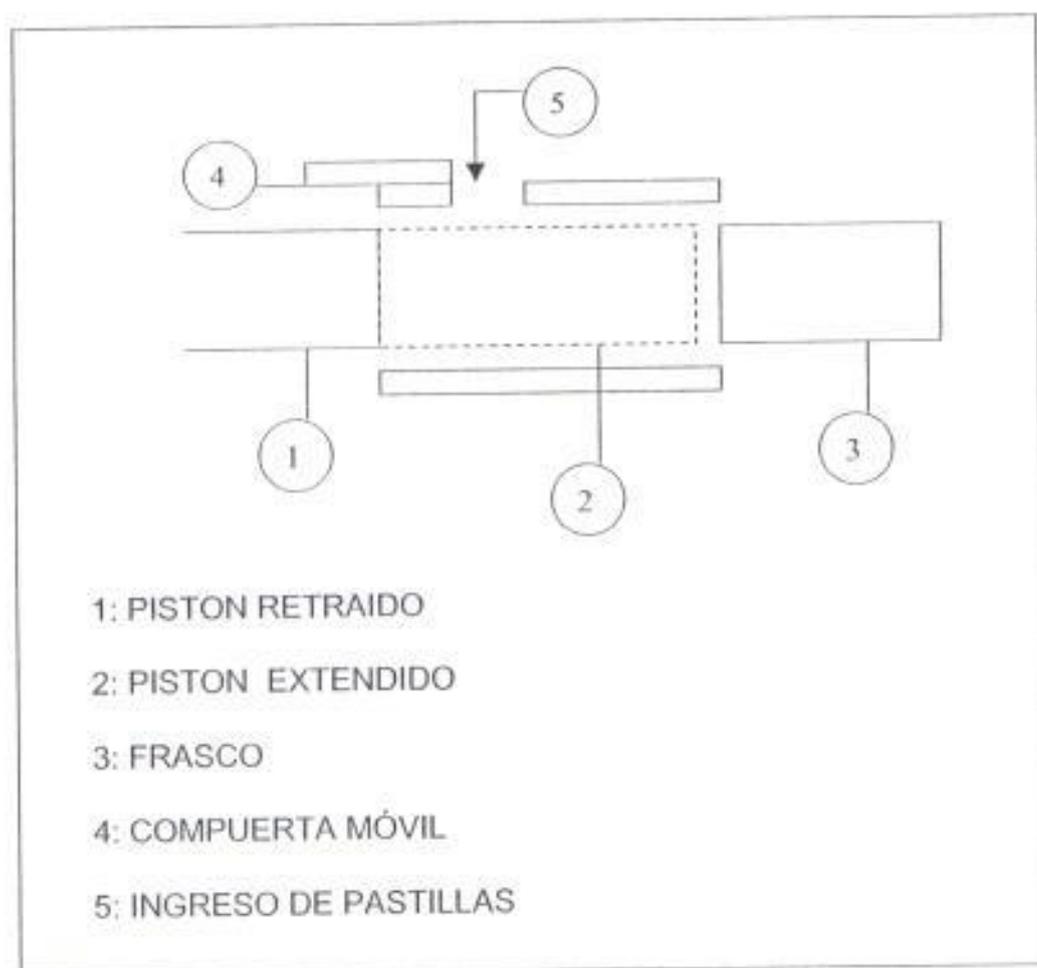


Figura 7.1. Esquema de una de las posibles aplicaciones de una máquina electromagnética recíprocante

7.3. Implicaciones a futuro

Muchos son los trabajos que se han realizado a lo largo de la historia basándose únicamente en la experimentación, estos trabajos generalmente han traído pocos años después descubrimientos e invenciones que nacieron como consecuencia de estas primeras investigaciones.

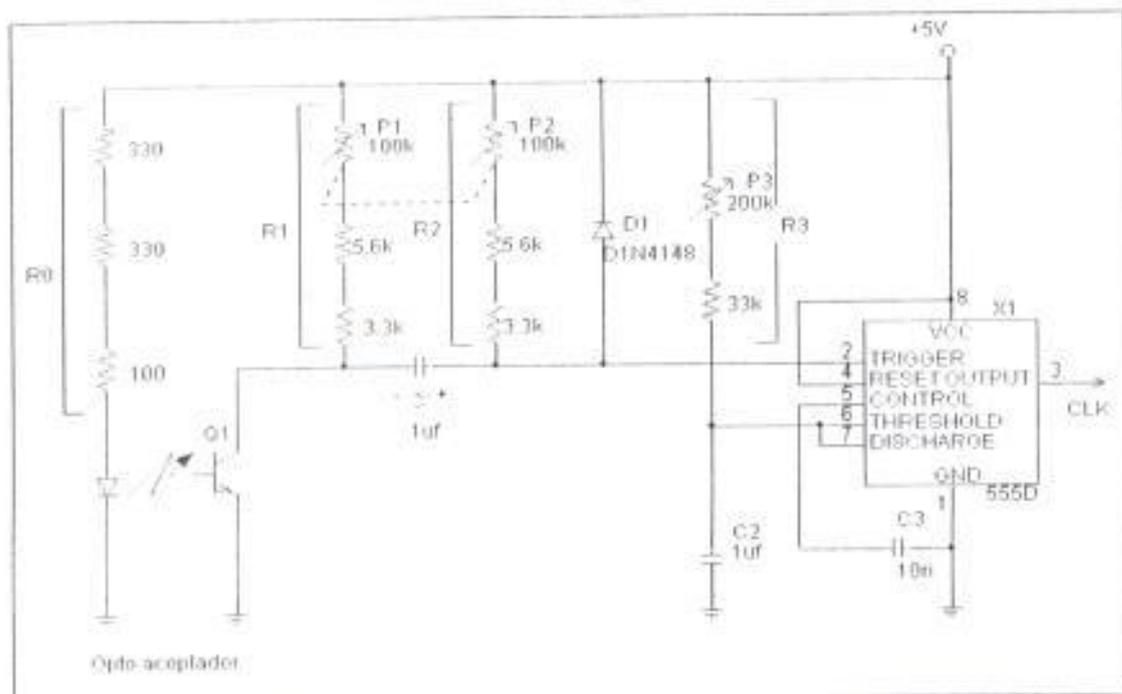
El presente trabajo pretende ser el pionero en éste aspecto, y de ésta forma convertirse en la semilla que acarree consigo nuevas investigaciones y proyectos al respecto.

La posibilidad de reemplazar las máquinas basadas en combustibles contaminantes siempre ha sido motivo de debates y discusiones. Por esta razón el hecho de haber dado el primer paso hacia la búsqueda de formas alternativas de movimiento sin contaminar, permite a otras personas realizar las investigaciones y experimentos que lleven a éste prototipo a la vida práctica.

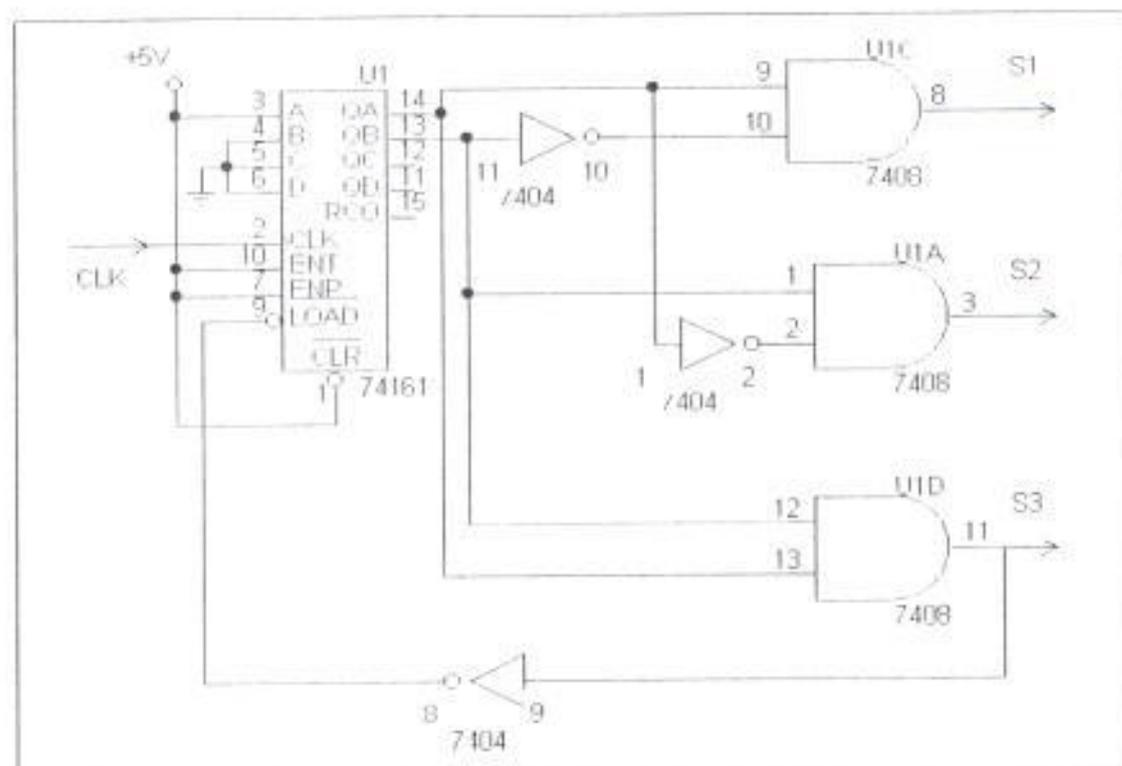
APENDICES

APENDICE A

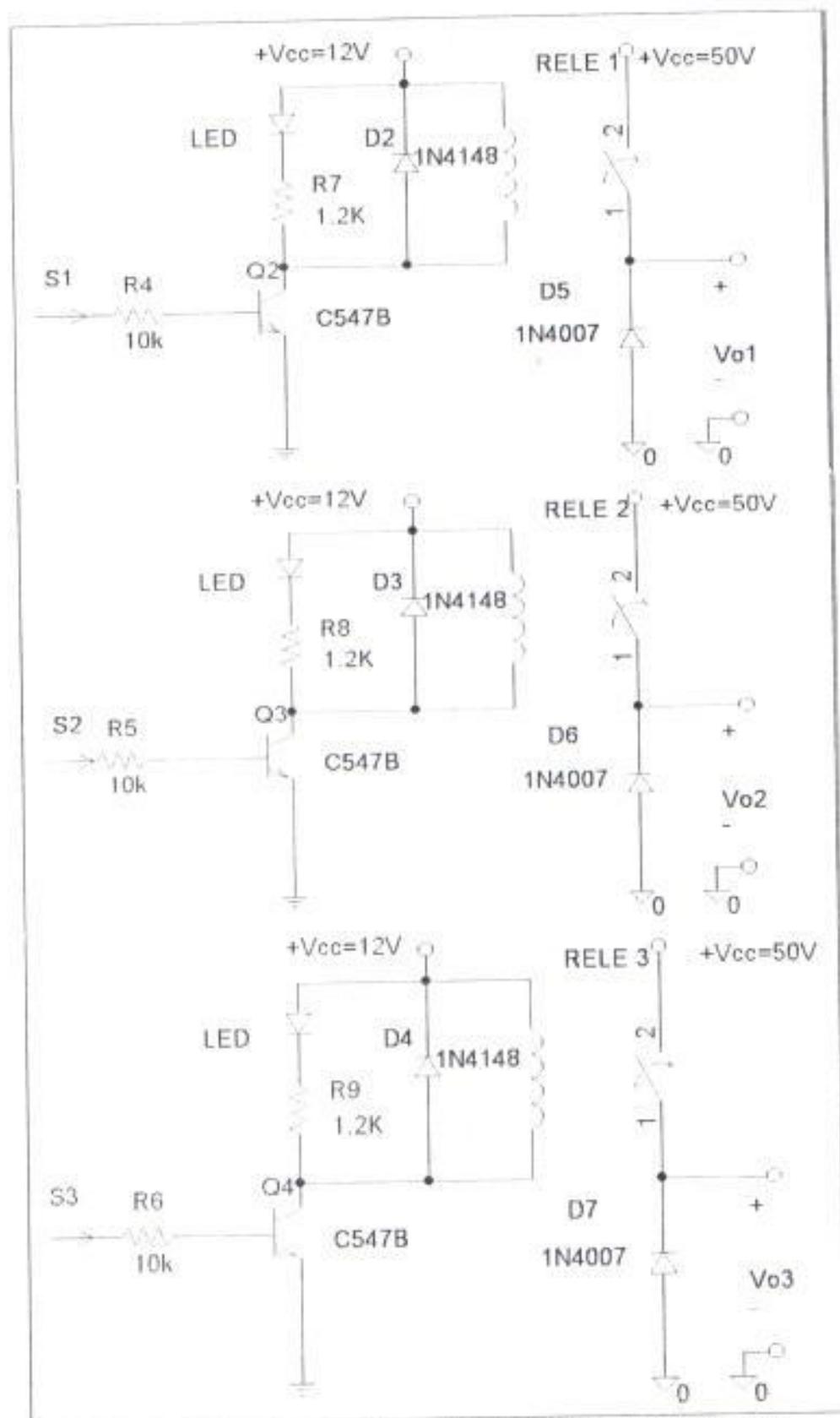
ESQUEMATICOS DEL CIRCUITO DE CONTROL



Esquema del acoplador óptico y el circuito de entrada



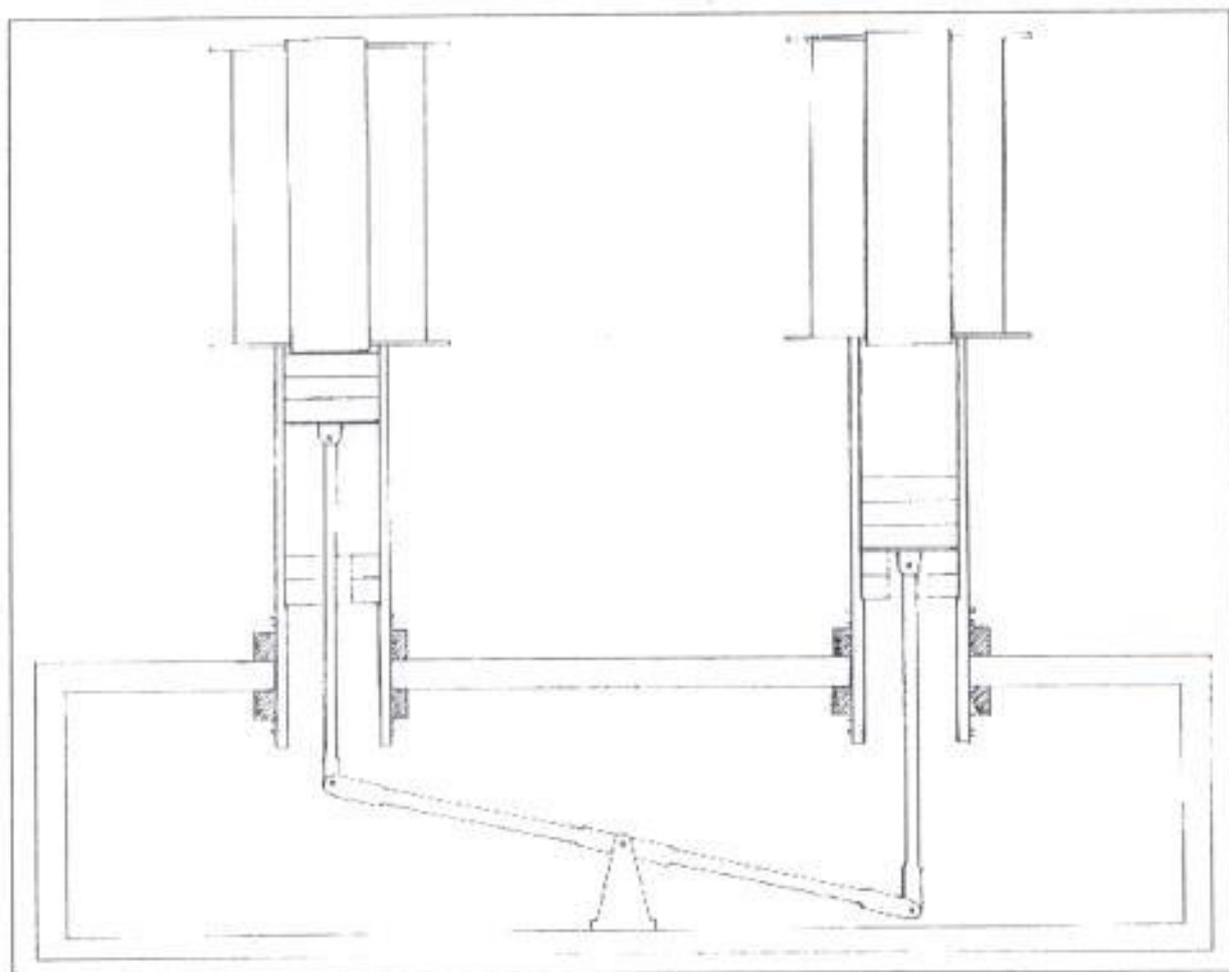
Esquema del circuito digital generador de la secuencia de salida



Esquema del circuito de salida para la activación de los electroimanes

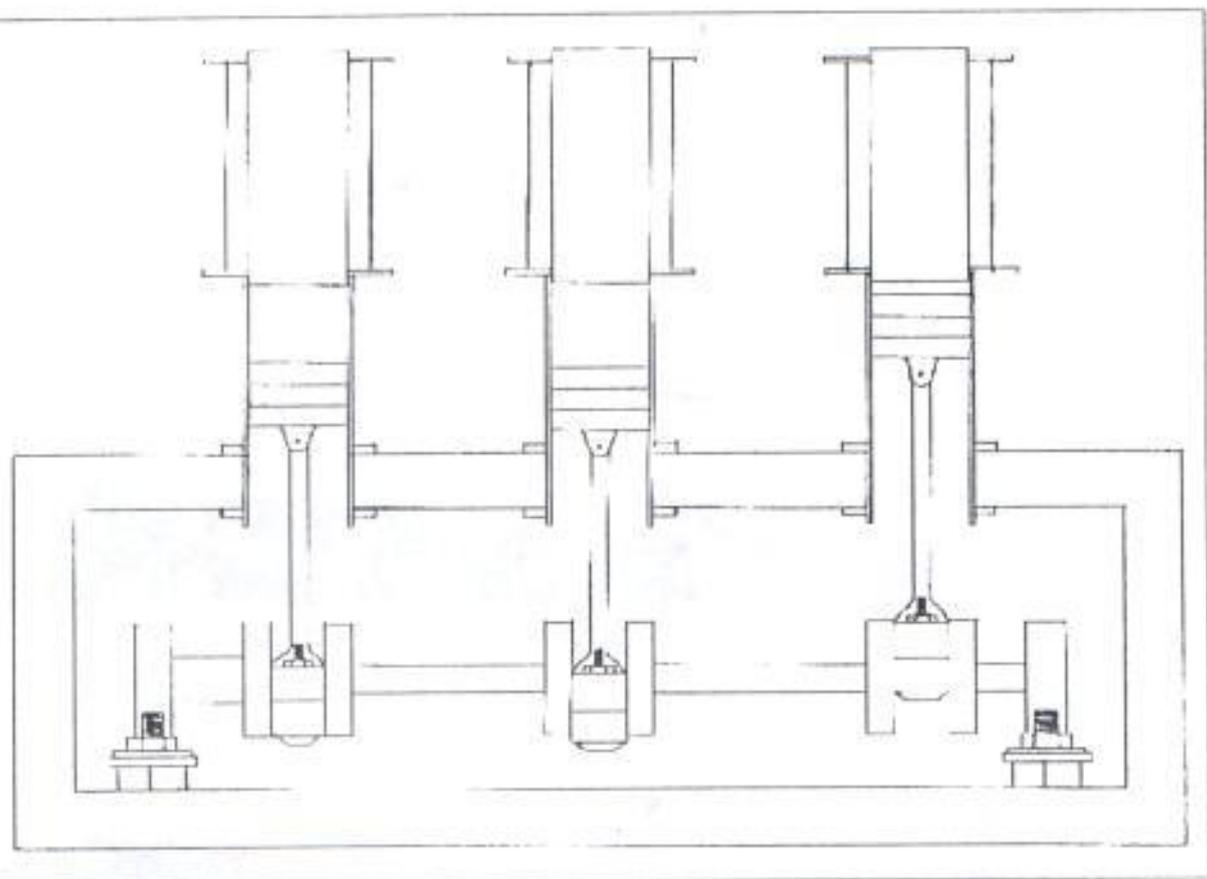
APENDICE B

DIAGRAMA DEL PRIMER PROTOTIPO CONSTRUIDO CON
EXITO



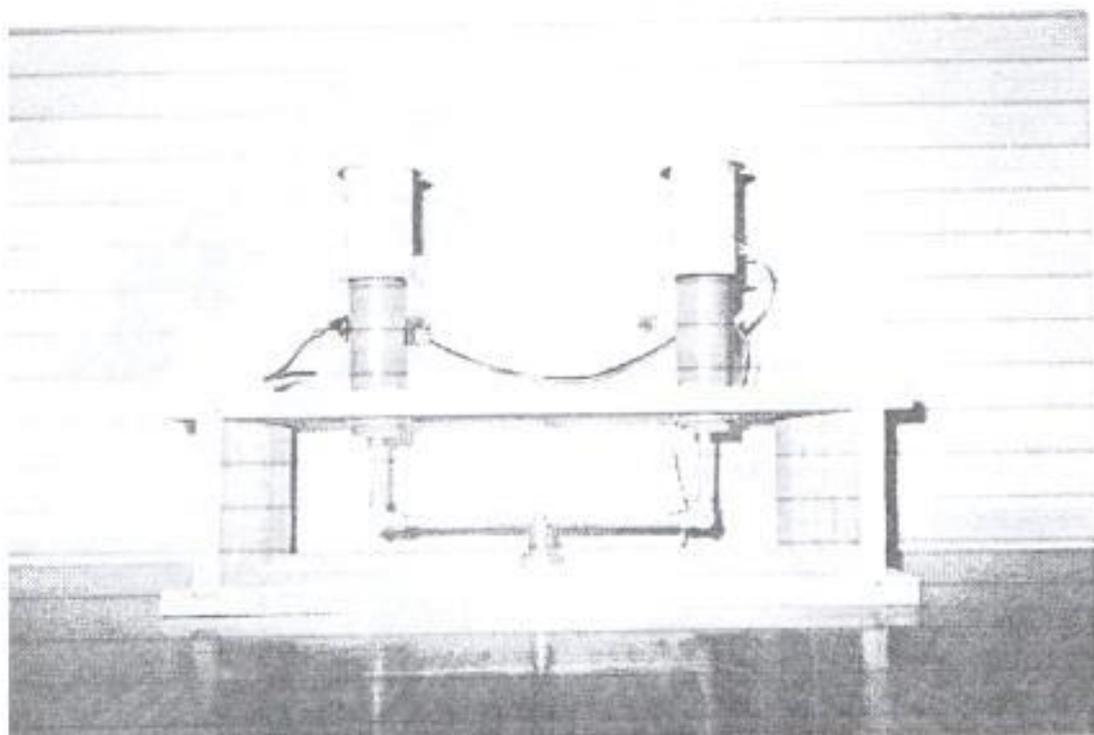
APENDICE C

DIAGRAMA DEL SEGUNDO PROTOTIPO CONSTRUIDO CON ÉXITO

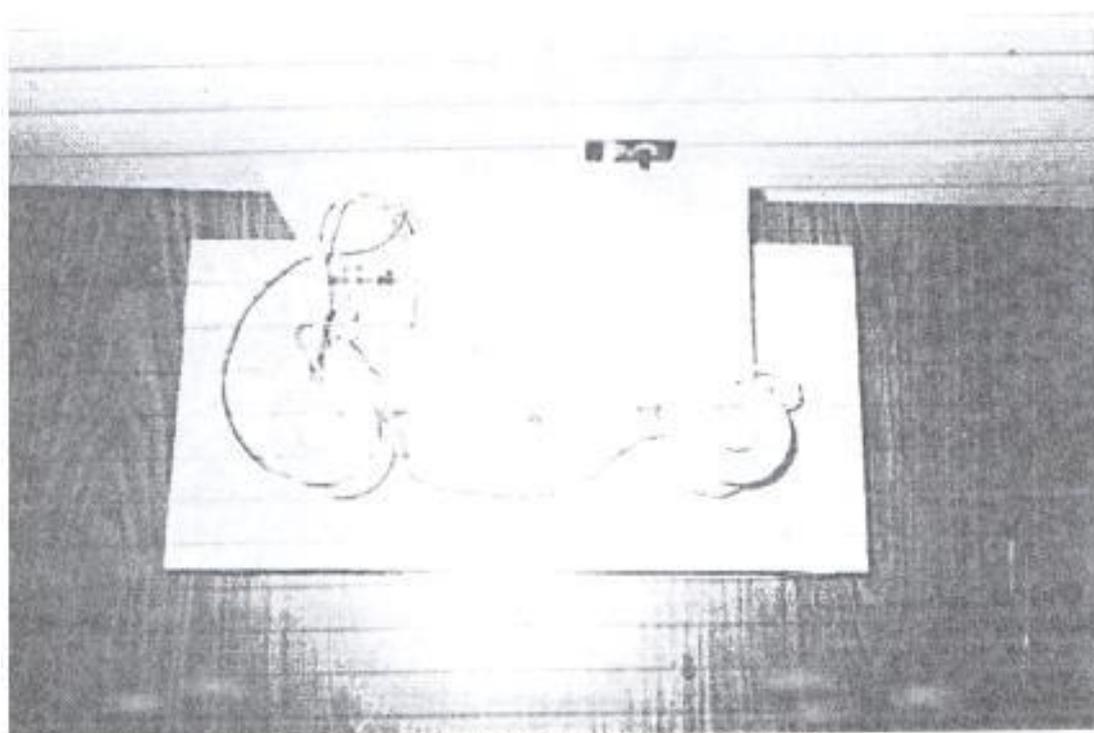


APENDICE D

FOTOGRAFIAS DEL PRIMER PROTOTIPO



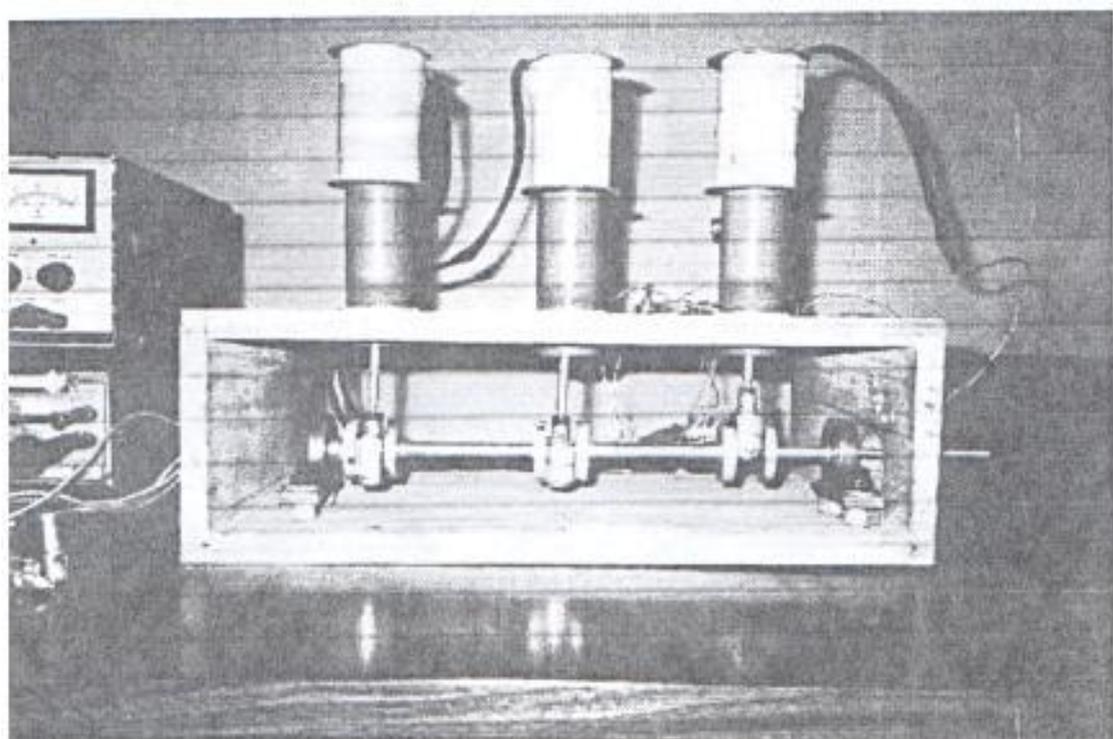
Vista frontal del balancín electromecánico



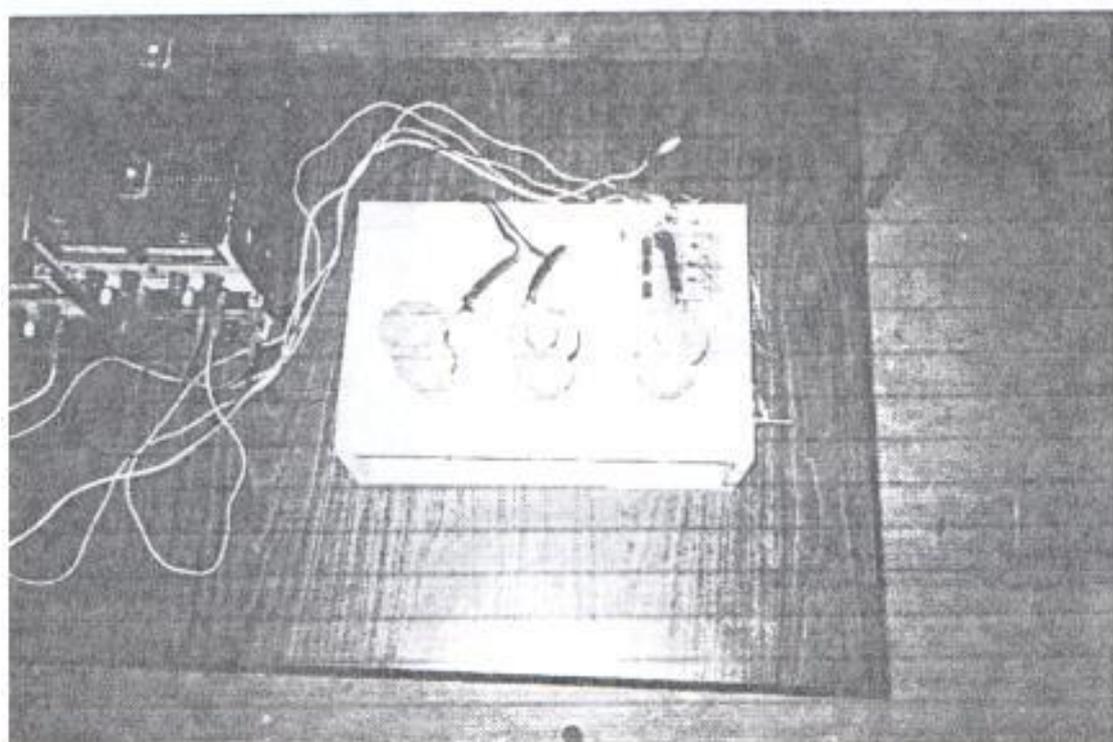
Vista superior del balancín electromecánico

APENDICE E

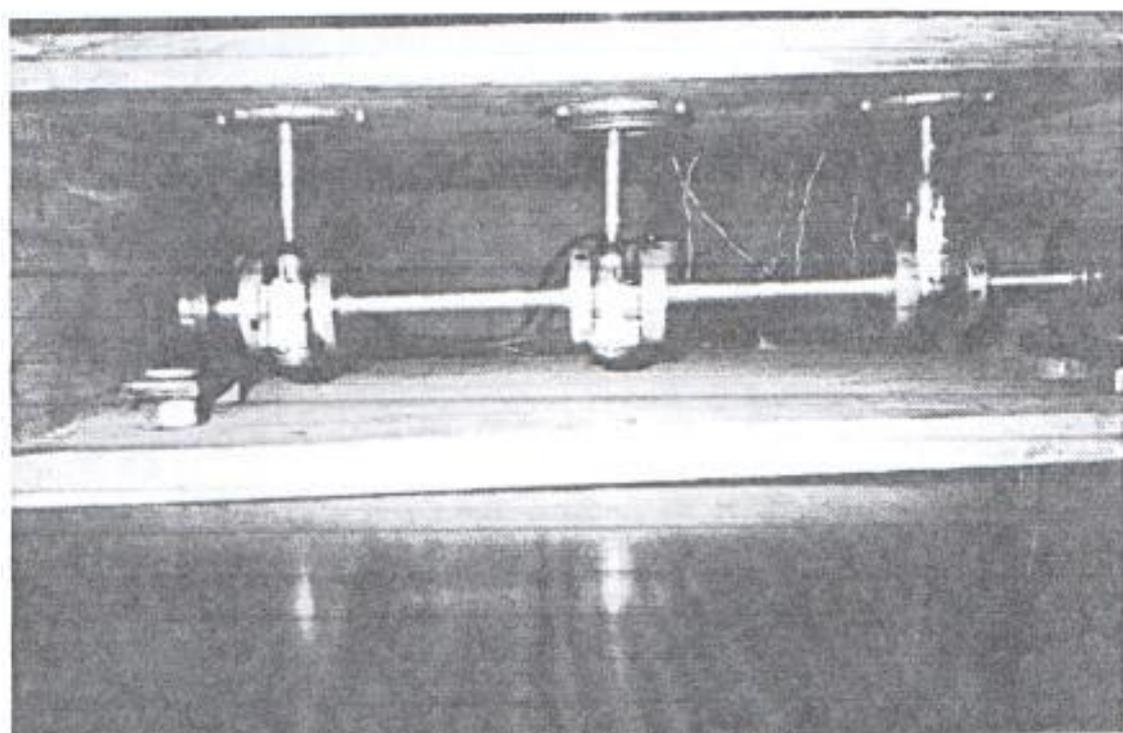
FOTOGRAFIAS DEL SEGUNDO PROTOTIPO



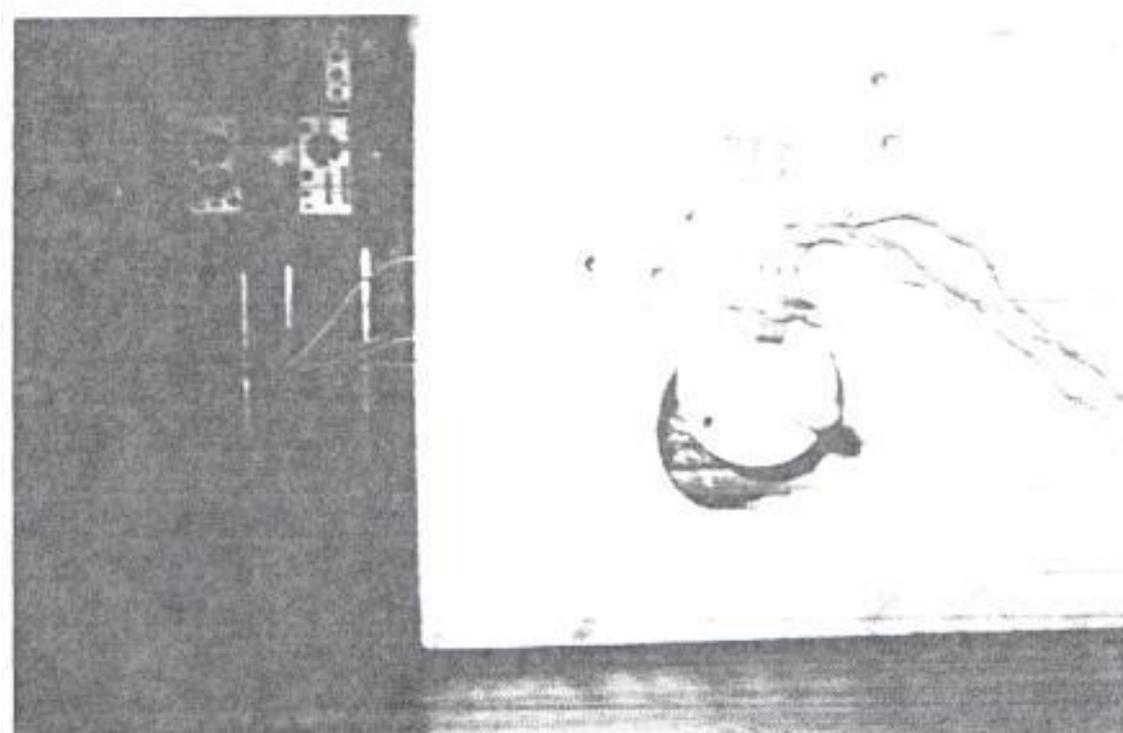
Vista frontal del motor de tres cilindros



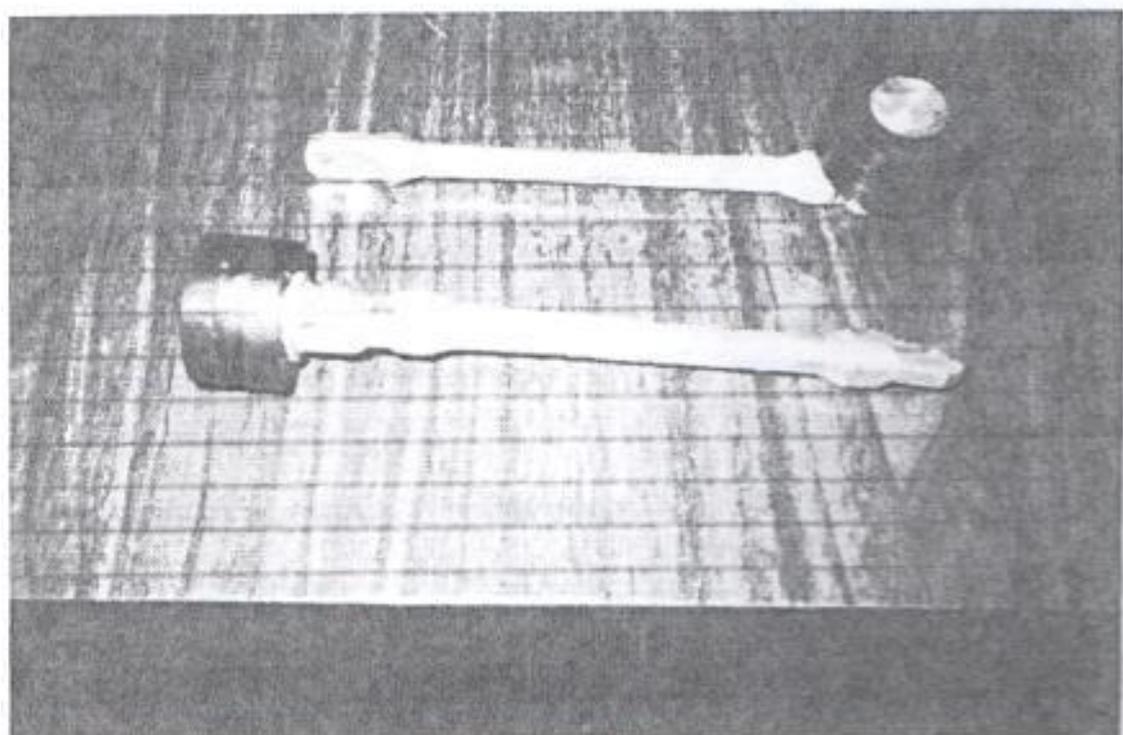
Vista superior del motor de tres cilindros



Vista frontal del cigüeñal de aluminio



Vista lateral de la rueda ranurada junto con el sensor óptico acoplado



Pistones imantados usados como parte del sistema magneto-mecánico

BIBLIOGRAFÍA

1. A. J. COMPTON, Electromagnetismo básico y sus aplicaciones. (Editora Addison-Wesley Iberoamericana).
2. ALLEN MOORE, A text Book of Practical Physics. (Tercera edición, editora Mcmillan & CO. LTD)
3. EDWARD F. OBERT, Motores de combustión. (Compañía editorial Continental S.A. de C.V México, 1997)
4. FEYMAN, Electromagnetismo y la material. (Editora Addison-Wesley 1964)
5. RAYMOND A. SERWAY, Física II Tomo (3ra edición revisada, México, Mcgraw-Hill,1994).