



A.F. 132320

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**  
**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**Diseño y Construcción de un Dispositivo para convertir**  
**Motor de Combustión Interna en un Motor Electromagnético**

## **TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

**Ingeniero en Electricidad Especialización Electrónica**

**Presentada por:**

**Julián Asinc Alarcón**

**Guayaquil - Ecuador**

**2002**

## AGRADECIMIENTO

El autor agradece al Ing. Miguel Yapur, Director de Tesis, quien con su valiosa orientación, conocimiento e incentivo me ayudó a desarrollar este trabajo.

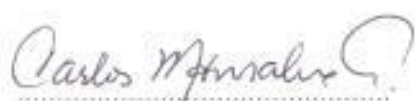
A todas las personas que de una u otra manera colaboraron para la realización de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A Dios y a mis queridos padres, hermanos y familiares, quienes en todo momento me brindan su apoyo para vencer los obstáculos.

A mi Tío Hilario, quien con su valiosa colaboración contribuyó al desarrollo de este trabajo.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Carlos Monsalve  
SUBDECANO DE LA FIEC



Ing. Miguel Yapur A.  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Gustavo Bermúdez  
VOCAL PRINCIPAL



Ing. Denny Cortez  
VOCAL PRINCIPAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Julián Alberto Asinc Alarcón', written over a horizontal dotted line.

Julián Alberto Asinc Alarcón

## RESUMEN

El proyecto consiste en modificar un motor de Combustión Interna de Tres Cilindros para que funcione solo con la energía química proveniente de una batería, la cual mediante un proceso electromagnético, se convierte para producir trabajo mecánico y proporcionar el movimiento hacia los pistones. El dispositivo planteado está dividido en dos partes, la parte de fuerza y la parte de control. En el dispositivo de fuerza se aprovechan los conocimientos sobre Electromagnetismo para su desarrollo, tal que al ser adaptado en el motor endotérmico sustituya la función de combustión interna. El dispositivo de control es electrónico y su función es la de realizar la activación sincronizada del dispositivo de fuerza.

El estudio del dispositivo se basó en otro proyecto de investigación realizado por estudiantes de Tópicos de Graduación de la Facultad, quienes utilizaron imanes permanentes. El objetivo de continuar con este trabajo es proporcionar un ciclo de desarrollo para mejorar la eficiencia gracias al uso de electroimanes. Los resultados obtenidos están dirigidos para que el dispositivo pueda considerarse como una alternativa tecnológica en el futuro.

## INDICE GENERAL

	Pág.
Resumen.....	VI
Índice General.....	VII
Índice de Figuras.....	VIII
Introducción.....	1
I. Proceso de Conversión de Energía.....	3
II. Desarrollo del Dispositivo .....	7
2.1. Dispositivo de Fuerza .....	8
2.1.1. Experiencias Previas .....	9
2.1.2. El Dispositivo Electromagnético Propuesto .....	9
2.1.3. Determinación de los Parámetros Eléctricos y Mecánicos .....	18
2.1.4. Construcción de las Bobinas de Inducción .....	32
2.2. Dispositivo de Control .....	33
III. Construcción del Dispositivo .....	46
IV. Mediciones de Rendimiento .....	54
V. Instalación del Motor Modificado en un Vehículo de Tres Ruedas.....	67
VI. Análisis Económico .....	70
Conclusiones y Recomendaciones.....	73
Anexos .....	77
Bibliografía .....	100

## INDICE DE FIGURAS

Pág.

### CAPITULO I

Figura 1.1 Esquema de un dispositivo electromagnético.....	4
--	---

### CAPITULO II

Figura 2.1. Esquema del electroimán propuesto .....	10
Figura 2.2. Esquema del electroimán propuesto completo .....	18
Figura 2.3. Curvas de Magnetización de varios materiales .....	21
Figura 2.4. Esquema del carrete de la bobina .....	27
Figura 2.5. Diagrama de Bloques del Circuito de Control .....	33
Figura 2.6. Esquema del circuito del sensor óptico y del circuito modulador.....	35
Figura 2.7. Circuito de disparo para la sincronización .....	40
Figura. 2.8. Circuito de sincronización y de secuencia de conteo .....	42
Figura 2.9. Circuito de activación de electroimanes.....	43

### CAPITULO III

Figura 3.1. Ubicación de electroimanes con respecto al bloque del motor .....	46
Figura 3.2. Esquema de los soportes .....	49
Figura 3.3. Electroimanes instalados .....	50

### CAPITULO IV

Figura 4.1. Fuerza ejercida vs. Longitud del entrehierro .....	55
--	----



Figura 4.2. Descomposición de fuerzas en el sistema mecánico del motor .....	56
Figura 4.3. Esquema del experimento para medir el tiempo de activación para un electroimán .....	62
Figura 4.4. Circuito para obtener el tiempo de activación .....	64

## **CAPITULO V**

Figura 5.1. Vehículo con el motor instalado .....	68
---	----

## **ANEXO DOS**

Figura A2.1. Medidas del carrete para la bobina .....	84
Figura A2.2. Esquema de los electroimanes con medidas .....	84
Figura A2.3. Núcleos ensamblados .....	87

## INTRODUCCION

En la actualidad los motores de combustión interna constituyen una fuente de contaminación ambiental, esto sin mencionar que quedarán obsoletos por causa del agotamiento de las reservas de petróleo. Hoy en día se buscan alternativas para sustituir en el futuro el uso de combustibles contaminantes, pero estas soluciones plantean el reemplazo del motor de combustión por otro tipo de tecnología.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende que estos mismos motores que hoy funcionan con combustible puedan seguir operando mediante un proceso electromagnético con otro tipo de energía y de esta manera no sean desechados.

El dispositivo electromagnético que provee el movimiento lineal se caracteriza por el uso de electroimanes, donde el movimiento se produce debido a la habilidad que tienen los sistemas electromagnéticos para cambiar su configuración de tal forma que el circuito excitador pueda encerrar el mayor flujo posible y que las líneas estén en el mismo sentido.

Para la implementación de los electroimanes se experimentó con varios tipos; esta parte está complementada con el estudio de los sistemas electromecánicos. Analizando los resultados obtenidos se proyectó cuales serían las características del electroimán idóneo.

Cabe señalar que el dispositivo implementado fue expuesto en la VI Feria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación realizada en Quito. Además éste es el primer prototipo diseñado y construido en la ESPOL que está en trámite de conseguir la respectiva patente industrial. El número de aplicación en el Instituto Ecuatoriano de la Propiedad Intelectual (IEPI) es SP-01-4172.

Los objetivos propuestos para este proyecto son:

- Aprovechamiento de fuentes de energía alternativa para producir trabajo mecánico utilizando conceptos sobre Electromagnetismo.
- Utilizar las partes básicas de un motor de combustión interna para adaptarlo a que funcione como motor electromagnético.
- Aplicar los criterios de Electromagnetismo para obtener un rendimiento equivalente al del motor endotérmico.
- Desarrollar un motor ecológico para uso vehicular.

## CAPITULO UNO

### PROCESO DE CONVERSIÓN DE ENERGIA

Todos han experimentado alguna vez la atracción del hierro con un imán permanente; éste es solo un ejemplo de como los campos magnéticos producen fuerzas mecánicas. Se puede demostrar que en un circuito magnético con entrehierros, la mayor parte de la energía de campo magnético se almacena precisamente en ellos. La conversión de energía electromecánica se obtiene cuando se altera el campo magnético de tal forma que la energía almacenada varíe con el movimiento mecánico.

Para un sistema como el que se muestra en la figura 1.1 se puede comprobar el criterio anterior. Aplicando los principios de conservación de energía y las matemáticas superiores, se establece que la fuerza mecánica debida al campo magnético está dada por:

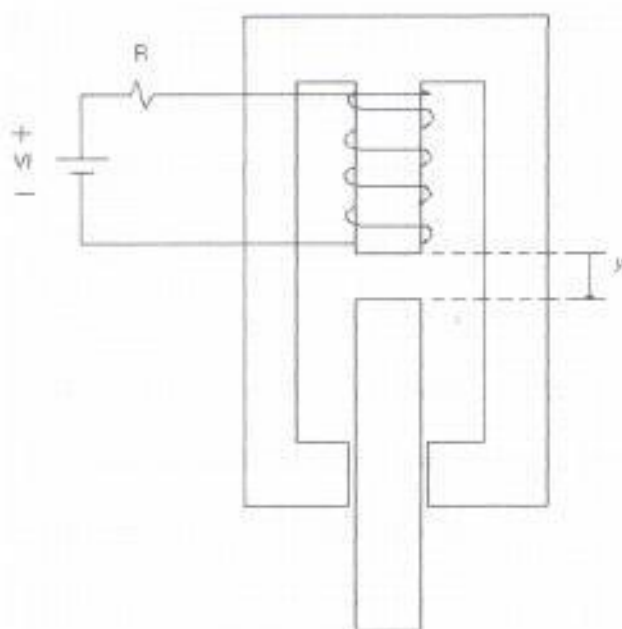


Figura 1.1 Esquema de un dispositivo electromagnético

$$F = \frac{B^2 * A}{24614000} \quad [\text{Kg.}] \quad (1.1)$$

Donde B y A son la densidad de campo magnético y la sección transversal del entrehierro en *líneas por cm<sup>2</sup>* y *cm<sup>2</sup>* respectivamente. La deducción de la ecuación 1.1 se realiza tomando en cuenta algunas suposiciones en el sistema electromagnético como son :

- Dispersión magnética despreciable.
- Campo magnético uniforme en el entrehierro.
- Partes móviles sin rozamiento.

En un sistema electromecánico, una pequeña parte del flujo magnético que circula por el circuito magnético se dispersa. Se supone que el número de líneas de fuerza correspondiente a la dispersión magnética es despreciable comparada con el número de líneas de fuerza correspondiente al flujo magnético total.

Así mismo, se considera la distribución del campo magnético en el entrehierro uniforme, lo cual es un hecho hasta cierto punto aceptable para una bobina cuya longitud es grande comparada con el diámetro de su sección transversal. Además, se desprecia el efecto de borde entre las caras polares inducidas en el entrehierro dado que se supone que las espiras están juntas unas con otras y sin espacios entre ellas.

Se supone que no existe fricción en las partes móviles, para no incluir en el análisis las pérdidas mecánicas. De esta manera se expone el modelo como un sistema conservativo ( sin pérdidas ) donde la energía eléctrica de entrada se almacena en el campo magnético y se convierte en energía mecánica.

Partiendo de la aplicación de la Ley de Conservación de la Energía mecánica en el sistema mostrado en la figura 1.1, para una variación infinitesimal en la energía de entrada se obtiene la siguiente expresión:

$$dW_{in} = dW_{alm} + dW_{out} \quad [J] \quad (1.2)$$

Para determinar la expresión 1.1 se debe establecer el flujo magnético en el entrehierro, luego determinar cada uno de los diferenciales de acuerdo a las suposiciones iniciales y reemplazarlos en la ecuación 1.2[1]. La ecuación 1.3 muestra como la fuerza varía como el cuadrado de el flujo magnético; esta dependencia indica las condiciones en que debe operar cualquier sistema electromecánico.

$$f_y = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A} \quad [\text{N}] \quad (1.3)$$

Se puede comprobar que esta ecuación es equivalente a la ecuación 1.1. Aún cuando la ecuación es válida bajo las suposiciones expuestas anteriormente se puede aplicar en la mayoría de los problemas prácticos sin que el error introducido sea significativo. Cabe señalar que la dirección de la fuerza mecánica es tal que la reluctancia del circuito magnético y la energía almacenada en el campo magnético se minimizan.

---

[1] El desarrollo de estas expresiones se muestra en el anexo uno.

## CAPITULO DOS

### DESARROLLO DEL DISPOSITIVO

El dispositivo que reemplazará la función de combustión interna en el motor endotérmico se divide en dos partes principales, cada una con una función específica que se detalla a continuación.

El dispositivo de fuerza que proporciona el movimiento a los pistones, como ya se mencionó, está conformado por electroimanes cuya proyección se realizó de manera experimental inicialmente dada la falta de bibliografía explícita sobre el tema. No obstante, para su proyección inicial se recurrió al conocimiento empírico y a la experiencia de algunos maestros que laboran en la rama de la reparación de maquinaria eléctrica.



De la investigación realizada en libros y de la experiencia adquirida con las pruebas iniciales se logró establecer los parámetros necesarios para el diseño del dispositivo de fuerza, aunque con algunas modificaciones de acuerdo a los materiales que se tenía a nuestra disposición.

El dispositivo de control tiene la función de activar de manera sincronizada a los electroimanes. Este dispositivo reemplaza en el motor endotérmico la función de distribución de pulsos de alto voltaje a las bujías y la carburación; además, constituye el ejecutor secuencial del sistema reemplazando a las válvulas, la barra de levas y demás elementos que intervienen en la sincronización mecánica de la combustión (calibración del tiempo).

## **2.1. DISPOSITIVO DE FUERZA**

En el capítulo anterior se expuso una expresión que determina la fuerza mecánica en términos de las características magnéticas y físicas del modelo. Está claro que una vez que el electroimán está completamente implementado, los parámetros físicos quedan fijos y como consecuencia la fuerza mecánica dependerá de la longitud del entrehierro y de la fuerza magnetomotriz.

### 2.1.1. EXPERIENCIAS PREVIAS

El estudio del proyecto se basó en un trabajo de investigación en el cual se utiliza un electroimán fijo y un imán móvil a manera de émbolo, ambos dispuestos de tal manera que al acercarse la cara polar del imán a la cara polar del electroimán, este último se activa induciendo un polo magnético igual y produciendo el movimiento lineal al imán por efecto de repulsión de polos iguales.

Como primer paso se realizan pruebas con dispositivos similares con la idea de aplicarlo en un motor de combustión interna real, pero se concluye que no era factible debido a la gran fuerza que se requería para vencer a la inercia del motor y a la gran separación entre las caras polares debido al recorrido del pistón. Por ello se resuelve utilizar sólo electroimanes para proporcionar el movimiento a los pistones.

### 2.1.2. DISPOSITIVO ELECTROMAGNÉTICO PROPUESTO

El electroimán propuesto está conformado básicamente de un solenoide y un núcleo móvil en su interior. Su funcionamiento se representa en la figura 2.1, donde el flujo magnético generado origina el movimiento del

núcleo hacia el interior del solenoide hasta que su centro coincida con el del solenoide.

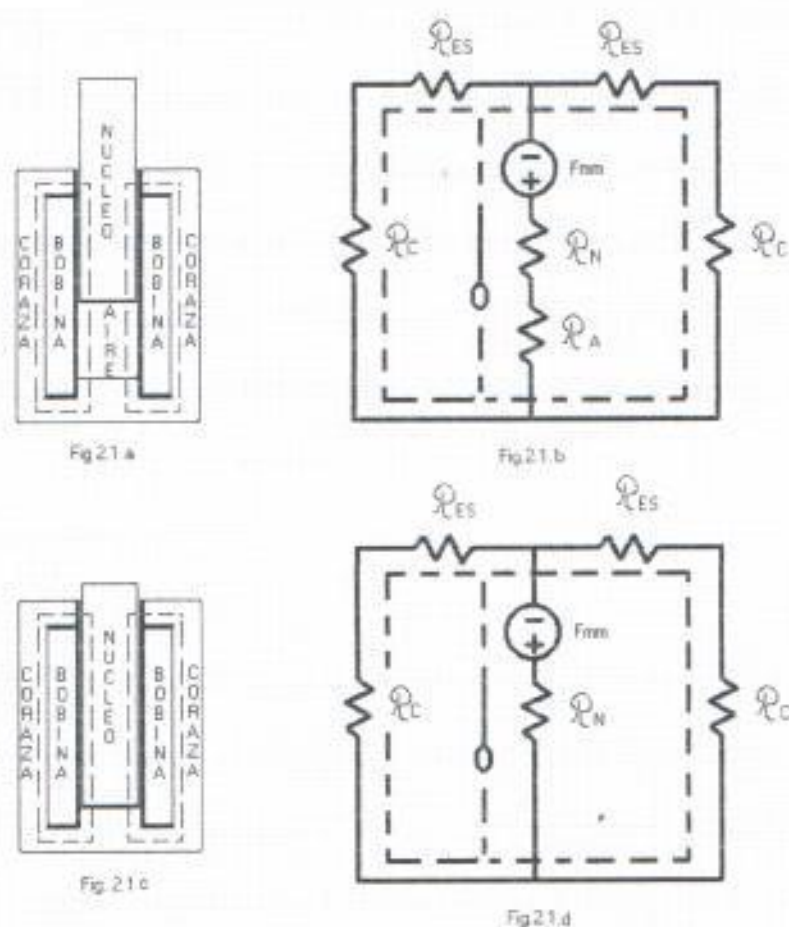


Figura 2.1 Esquema del electroimán propuesto

El movimiento del núcleo se produce como consecuencia de la inducción de líneas de campo magnético. En el Capítulo Uno se mencionó que la fuerza mecánica producto de la inducción electromagnética tiene una dirección tal que disminuye la reluctancia total del circuito magnético. En la figura 2.1a y 2.1b se muestran las

trayectorias de las líneas de fuerza y el circuito magnético equivalente respectivamente en el instante en que se activa el electroimán; se observa que para esta trayectoria la reluctancia del circuito magnético está conformada en gran parte por la reluctancia del aire alrededor y en el interior del solenoide. La única manera de que la reluctancia total del circuito magnético disminuya o se minimice es colocando el núcleo en el interior del solenoide, tal como se muestra en la figura 2.1c. En la figura 2.1.d se muestra el circuito magnético equivalente final. Comparando las reluctancias en b y en d se tiene que la reluctancia en d es menor que en a como se esperaba.

Este efecto es el producto de la característica que tienen las líneas de campo magnético de configurar el medio tal que la reluctancia del circuito magnético se minimice, lo cual explica el motivo por el que los imanes atraen materiales de baja reluctancia y es el efecto que se aprovecha para transmitir el movimiento a los pistones.

Para la implementación del electroimán se debe plantear algunas consideraciones como son:

- La bobina debe tener una relación  $L/R$  pequeña para alcanzar el estado estable en el menor tiempo.

- El consumo de corriente no debe ser excesivo para minimizar las pérdidas eléctricas.
- La disposición del circuito magnético debe ser la adecuada para evitar en lo posible las pérdidas magnéticas y la atenuación del campo magnético.

La construcción del primer electroimán se realiza basado en las recomendaciones proporcionadas por algunos maestros rebobinadores. Esta constaba de 150 vueltas de alambre esmaltado N° 20 y consumía una corriente de 40 *amperios* en estado estable para un voltaje de alimentación de 12 *voltios*.

Con este electroimán se obtiene en su implementación al motor, una velocidad de 170 *rpm* en vacío. Las conclusiones de este experimento son:

- La fuerza magnética obtenida se incrementa al acercarse el núcleo al final de su carrera dentro del solenoide.
- Para concentrar el campo magnético e impedir su dispersión en lo posible, se debe proveer a la bobina de una coraza ferromagnética que la cubra y cuya sección transversal debe ser equivalente o mayor que la sección del núcleo móvil.

- El consumo de corriente no debe ser excesivo para minimizar las pérdidas eléctricas.
- La disposición del circuito magnético debe ser la adecuada para evitar en lo posible las pérdidas magnéticas y la atenuación del campo magnético.

La construcción del primer electroimán se realiza basado en las recomendaciones proporcionadas por algunos maestros rebobinadores. Esta constaba de 150 vueltas de alambre esmaltado N° 20 y consumía una corriente de 40 *amperios* en estado estable para un voltaje de alimentación de 12 *voltios*.

Con este electroimán se obtiene en su implementación al motor, una velocidad de 170 *rpm* en vacío. Las conclusiones de este experimento son:

- La fuerza magnética obtenida se incrementa al acercarse el núcleo al final de su carrera dentro del solenoide.
- Para concentrar el campo magnético e impedir su dispersión en lo posible, se debe proveer a la bobina de una coraza ferromagnética que la cubra y cuya sección transversal debe ser equivalente o mayor que la sección del núcleo móvil.

A partir de esta experiencia se procede a construir un electroimán más pequeño semejante al primero; así se obtiene un electroimán de 50 mm de longitud y 319 vueltas de alambre N° 14 distribuidas en 11 capas. Con este electroimán el desempeño es aproximadamente de un 50% comparado con el primero que se implementó.

Luego se procede a quitarle tres capas de alambre a la bobina con lo cual la velocidad en el eje aumentó. Al quitarle una capa más el desempeño mejoró y al final la bobina alcanzó un desempeño aproximado al de la primera bobina implementada con 174 vueltas distribuidas en 6 capas.

Esta bobina tenía una resistencia medida de 0.3 *ohmios* con lo cual se alcanza una corriente en estado estable de 40 *amperios*. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en cada uno de los casos anteriores, se resolvió mantener la corriente alrededor de 40 *amperios* y encaminar el diseño a mejorar la fuerza magnetomotriz.

A continuación se muestran los resultados por los cuatro electroimanes anteriores:

Longitud : 50 mm

Voltaje : 12 V

Tabla I. Resultados de los cuatro electroimanes

N°	N° Capas	N° Vueltas	Resistencia Experimental [ $\Omega$ ]	Corriente [ A ]	Fuerza Magnetomotriz [ A-v ]
1	11	319	0.68	17.61	5619.46
2	8	232	0.43	27.39	6355.32
3	7	203	0.36	32.73	6645.39
4	6	174	0.29	40.01	6963.21

Al observar la tabla I se puede dar cuenta que al quitarle capas al embobinado, la corriente y la fuerza magnetomotriz aumentan; el resultado neto es un incremento en la fuerza magnética obtenida comprobando el hecho de que esta fuerza obtenida depende de la fuerza magnetomotriz y de la potencia de entrada.

Con esta observación y partiendo del hecho de que la única manera de conservar la fuerza magnetomotriz en un embobinado es agregar o quitar vueltas de alambre a lo largo del mismo, se procede a calcular la fuerza magnetomotriz para bobinas de distintos números de capas menores a 6; entonces:

Tabla II. Proyección teórica de la Fuerza Magnetomotriz

N°	N° Capas	N° Vueltas	Resistencia Experimental [ $\Omega$ ]	Corriente [ A ]	Fuerza Magnetomotriz [ A-v ]
1	5	145	0.2379	50.43	7312.95
2	4	116	0.1807	66.37	7699.68
3	3	87	0.1284	93.44	8129.60



En la tabla II anterior se muestran los valores de fuerza magnetomotriz que tendría la última bobina si se siguen quitando capas de alambre. Se observa entonces como aumentan tanto la corriente como la fuerza magnetomotriz; comparando estos valores entre sí se tiene que la diferencia de corriente entre el segundo caso y el primero no es tan grande como la diferencia del tercero con el segundo. En el tercer caso la corriente es demasiado grande para ser considerada, por tanto se toma como referencia el segundo caso.

Ahora el problema se centra en diseñar electroimanes que conserven esta fuerza magnetomotriz y que la corriente que consuman se aproxime a los 40 *amperios* que se establece anteriormente. Para ello se debe conservar el número de capas de la bobina del segundo caso y agregar vueltas al embobinado de tal forma que su longitud aumente.

Los cálculos proyectados se detallan en la siguiente tabla:

Tabla III. Proyección de Electroimanes conservando la f.m.m.

Nº	Longitud [ mm ]	Nº Vueltas por capa	Nº Vueltas	Resistencia Experimental [ $\Omega$ ]	Corriente [ A ]	f.m.m. [ A-v ]
1	60	35	140	0.2181	54.99	7699.68
2	70	41	164	0.2555	46.94	7699.68
3	80	47	188	0.2929	40.95	7699.68
4	85	50	200	0.3117	38.49	7699.68

En los dos últimos casos se tiene una corriente aproximada de 40 *amperios*, por tanto la longitud del electroimán debe estar entre 80 y 85 *mm*. Ahora se debe encontrar el material adecuado para construir la coraza de la nueva bobina.

La coraza ferromagnética para el primer electroimán construido se implementó a partir de estatores de motores eléctricos que se pueden encontrar en licuadoras y taladros. Este material presenta una ventaja con respecto al hierro común como es su alta permeabilidad; su implementación fue relativamente fácil en comparación con el hierro dada la dificultad para encontrar un cilindro o tubo de la misma medida de la bobina, además de las tapas respectivas que debían colocarse por ambos extremos para que la bobina quedara totalmente encerrada por el hierro.

Para la implementación de la coraza de la última bobina proyectada fue necesario utilizar estatores más grandes; esto acarreó un retraso debido a la dificultad para conseguir el material y adaptarlo a las características de la bobina.

El estator elegido se puede encontrar en motores de un 1/3 de caballo de fuerza. Su adaptación se detallará más adelante, por ahora se debe

determinar sus dimensiones para el cálculo del arrollamiento del electroimán las cuales se muestran en la figura 2.2.

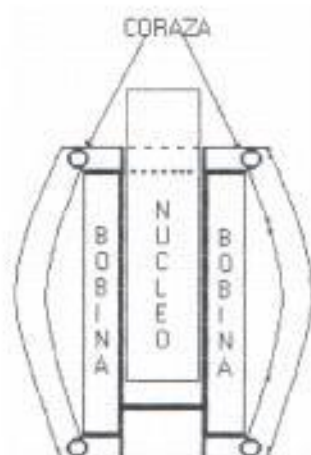


Figura 2.2. Esquema del electroimán propuesto completo

Cabe señalar que en esta implementación también se incluye un cambio en la coraza que consiste en colocar un tope en el extremo inferior de la bobina para concentrar aún más el campo magnético y disminuir los entrehierros.

### 2.1.3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS

Una vez definidas las dimensiones del electroimán, el siguiente paso es calcular la fuerza magnetomotriz total en el circuito magnético para un entrehierro de 10 *mm*, para ello se debe definir la densidad de campo

magnético en el entrehierro de tal forma que no se sature el núcleo. A continuación se detallan las características físicas del dispositivo.

Tabla IV. Características físicas del electroimán

Característica	Valor
Longitud en el núcleo	8.70 [ cm ]
Longitud en el entrehierro	1.00 [ cm ]
Longitud en el tope	1.40 [ cm ]
Longitud en la coraza	16.00 [ cm ]
Longitud en el entrehierro superior	0.20 [ cm ]
Sección transversal del núcleo	5.06 [ cm <sup>2</sup> ]

La densidad de campo magnético debe ser lo más alta posible. Es muy común estimar como máximo una densidad de 18000 *líneas/cm<sup>2</sup>* para aceros ordinarios [2], tomando en cuenta que si se trata de obtener una densidad mayor se incrementa la reluctancia del circuito y se necesita más cobre para la bobina.

Si se establece una tracción teórica de 40 [ Kg ], utilizando la expresión 1.1 se puede calcular la densidad de campo magnético para un entrehierro de 10 *milímetros* de la siguiente manera:

$$F = \frac{B^2 * A}{24614000} \text{ [ Kg ]}$$

[2] Se toma como referencia este límite para escoger las clases de hierro a utilizar, para obtener mayor información al respecto revisar en Croft Terrel, Tratado de Electricidad Práctica, Editorial Continental S.A.

$$B = \sqrt{\frac{24614000F}{A}} \text{ [ líneas / cm}^2 \text{ ]}$$

Si

$$F = 40 \text{ [ Kg ]}$$

$$A = 5.06 \text{ [ cm}^2 \text{ ]}$$

Entonces:

$$B = \sqrt{\frac{24614000(40)}{5.06}}$$

$$B = 13949 \text{ [ Líneas / cm}^2 \text{ ]}$$

Con la consideración anterior y de la curva de magnetización para el acero forjado en la figura 2.3, se determina un valor de aproximadamente 14000 líneas / cm<sup>2</sup> para la densidad de campo magnético. Ahora se debe calcular el flujo magnético en el circuito a partir de la expresión que define el flujo dependiendo de la densidad y el área transversal de la espira que atraviesa:

$$\Phi = B \cdot A \text{ [ líneas ]} \tag{2.1}$$

Donde :

$\Phi$  : Flujo Magnético en líneas

B : Densidad de Campo Magnético en líneas sobre  $cm^2$

A : Sección Transversal en  $cm^2$

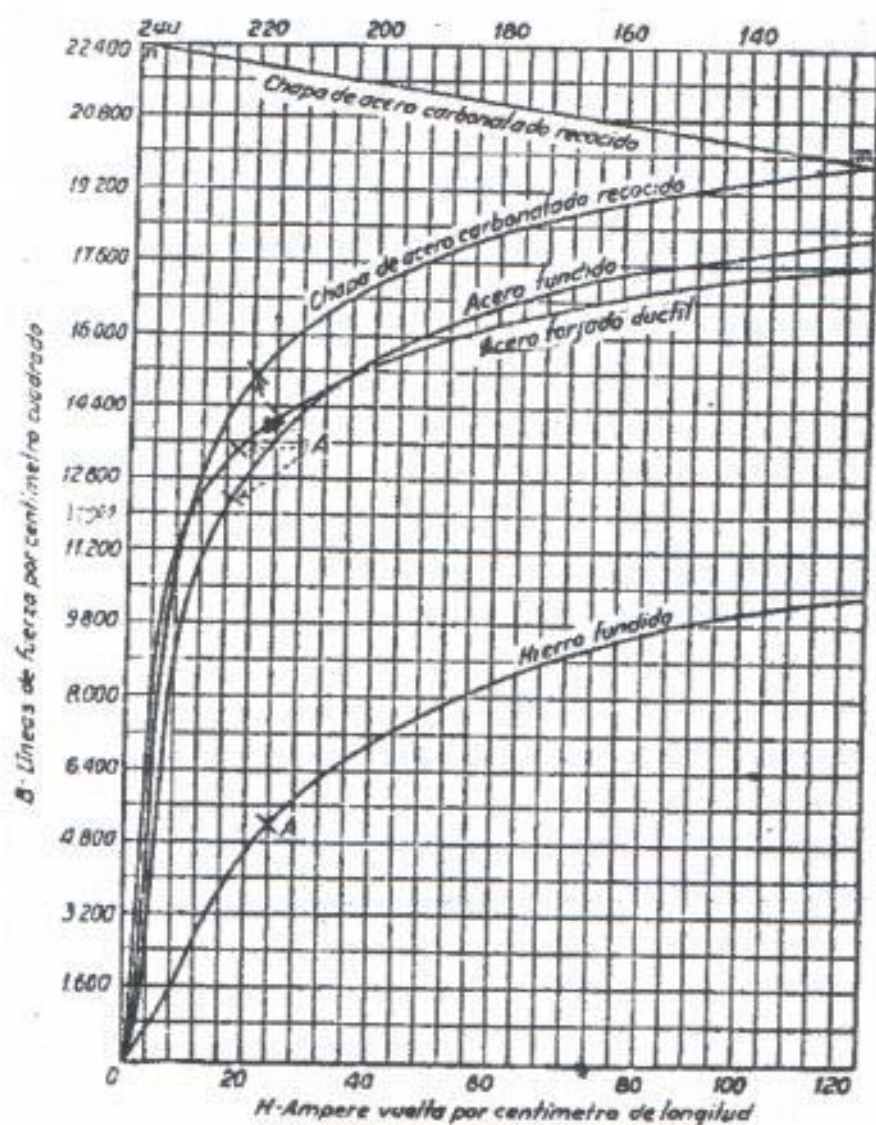


Figura 2.3. Curvas de Magnetización de varios materiales ( Gráfica tomada del libro de Terrel Croft, Tratado de Electricidad Práctica ).

Entonces el flujo magnético en el circuito está dado por :

$$\Phi = (14000)(5.06) = 70840 \text{ [ líneas ]}$$

El siguiente paso es calcular la fuerza magnetomotriz en cada una de las reluctancias del circuito magnético y luego sumarlas para determinar el total. En el núcleo, para  $B_N = 14000 \text{ líneas/cm}^2$  se tiene de la curva del acero forjado un valor de  $24 \text{ amperios-vuelta sobre cm}$  para la intensidad de campo  $H_N$ . La fuerza magnetomotriz está dada por el producto entre la intensidad de campo y la longitud del medio, entonces:

$$\text{f.m.m.} = H * L \quad (2.2)$$

Donde :

f.m.m. : Fuerza Magnetomotriz en *amperios-vuelta*

H : Intensidad de Campo Magnético en *amperios-vuelta sobre cm*

L : Longitud de el circuito magnético en *cm*

$$\text{f.m.m.}_N = (24)(8.70) = 208.8 \text{ [ A-v ]}$$

Para el entrehierro de aire de  $1 \text{ cm}$  de longitud debemos determinar la densidad de campo  $B_A$  con la ecuación 2.1 donde el área es el área

efectiva en el entrehierro ( $A_f$ ). Suponiendo que las vueltas del embobinado están bien apretadas, entonces el área efectiva está dado por la circunferencia externa del carrete de la bobina. Resolviendo la ecuación 2.1 para la densidad de campo y con  $A_f = 7.0685 \text{ cm}^2$  tenemos:

$$B = \frac{\phi}{A} \text{ [lineas / cm}^2 \text{]}$$

$$B_A = (70840)/(7.0685) = 10021.92 \text{ [lineas / cm}^2 \text{]}$$

La intensidad de campo en el entrehierro está dada por :

$$H = \frac{B}{\mu} \text{ [ A-v/cm ]}$$

Donde  $\mu$  tiene un valor de  $1.25 \text{ perms por cm}^2$  para el aire.

$$H_A = (10021.92)/(1.25) = 8017.54 \text{ [ A-v / cm ]}$$

$$f.m.m._A = (8017.54)(1) = 8017.54 \text{ [ A-v ]}$$

En el tope, que es del mismo material que el núcleo, para un área calculada de  $4.18 \text{ cm}^2$  se determina la densidad de campo magnético utilizando la ecuación 2.1 como sigue:



$$B_T = (70840)/(4.18) = 16947.36 \text{ [líneas / cm}^2 \text{]}$$

Con este valor se determina la intensidad de campo de la curva del acero forjado y se calcula la fuerza magnetomotriz con la ecuación 2.2.

$$H_T = 76 \text{ [ A-v/cm ]}$$

$$f.m.m._T = (76)(1.4) = 106.4 \text{ [ A-v ]}$$

Para la coraza se considera la curva de chapa de acero con un área transversal medida de  $6.72 \text{ cm}^2$ , teniendo en cuenta que el flujo se reparte por igual en las dos secciones de  $6.72 \text{ cm}^2$ , el flujo total circula por un área de  $13.44 \text{ cm}^2$ .

$$B_C = (70840)/(13.44) = 5270.83 \text{ [líneas / cm}^2 \text{]}$$

$$H_C = 4 \text{ [ A-v/cm ]}$$

$$f.m.m._C = (4)(16) = 64 \text{ [ A-v ]}$$

En el entrehierro superior, el área está dado por el área lateral del cilindro de aire que se forma y cuyo valor es  $13.19 \text{ cm}^2$ .

$$B_{AS} = (70840)/(13.19) = 5370.73 \text{ [líneas / cm}^2 \text{]}$$

$$H_{AS} = (5370.73)/(1.25) = 4296.58 \text{ [ A-v/cm ]}$$

$$f.m.m._{AS} = (4296.58)(0.2) = 859.31 \text{ [ A-v ]}$$

Tabla V. Detalle de la f.m.m. parciales en el circuito magnético.

COMPONENTE	f.m.m. [ A-v ]
Núcleo móvil de acero	208.80
Entrehierro inferior	8017.54
Tope de acero	106.40
Coraza de chapas de acero	64.00
Entrehierro superior	859.31
<b>TOTAL</b>	<b>9256.05</b>

En la tabla V se resumen los resultados de la f.m.m. requerida. El siguiente paso es determinar el calibre del alambre para el arrollamiento utilizando la siguiente ecuación [3]:

$$S = \frac{I \times N \times l_m}{E} \times 2 \times 10^{-4} \text{ [ mm}^2 \text{ ]} \quad (2.3)$$

Donde :

S : Sección del alambre en *milímetros cuadrados*

I x N : Fuerza magnetomotriz en *Amperios-vuelta*

[3] Para obtener mayor información acerca de esta ecuación, revisar Croft Terrel, Tratado de Electricidad Práctica, Editorial Continental S.A.

$L_m$  : Longitud de vuelta promedio en *centímetros*

$E$  : Voltaje de alimentación de la bobina en *voltios*

De las dimensiones de la coraza podemos estimar la longitud de vuelta promedio en 11.93 *cm*, entonces para una tensión de 12 *voltios* la sección del alambre será:

$$S = \frac{(9256.05)(11.93)}{12} \times 2 \times 10^{-4} \text{ [ mm}^2 \text{ ]}$$

$$S = 1.840 \text{ [ mm}^2 \text{ ]}$$

De la tabla de calibre de alambre esmaltado se obtienen dos entre los cuales se encuentra la sección calculada. En la tabla VI[4] se resumen los valores posibles a utilizar. Está claro que se debe utilizar el calibre inmediato superior. A continuación se procedió a calcular la cantidad de alambre que se necesita para el embobinado.

Tabla VI. Datos de los alambres esmaltados de calibre similar

<b>CALIBRE AWG</b>	<b>Diámetro [ mm ]</b>	<b>Sección [ mm<sup>2</sup> ]</b>	<b>Resistencia [Ω /1000m ]</b>	<b>Peso [Kg./1000m ]</b>
14	1.692	2.08	8.28	18.662
15	1.509	1.65	10.04	14.816

[4] Para obtener mayor información acerca de estos datos, revisar Croft Terrel, Tratado de Electricidad Práctica, Editorial Continental S.A.



Figura 2.4. Esquema del carrete de la bobina.

Donde:

$h$  : Longitud de arrollamiento

$w$  : Ancho de arrollamiento

$R$  : Radio interior del carrete

En la figura 2.4 se muestra un esquema del carrete a utilizar. Suponiendo que el arrollamiento de alambre se distribuye uniformemente sobre la superficie interna del carrete, el número de vueltas en una capa ( $VC$ ) y el número de capas de alambre  $n$  que se puede colocar en la ventana se calculan de la siguiente manera:

$$VC = \frac{h}{D}$$

$$n = \frac{w}{D}$$

Donde  $D$  es el diámetro del alambre a utilizar. Como  $VC$  y  $n$  son cantidades adimensionales se debe expresar  $h$ ,  $w$  y  $D$  con las mismas unidades. Dado que la longitud de una vuelta de alambre en la primera capa es  $2\pi(R + R_1)$ , donde  $R_1$  es el radio del alambre, la longitud de alambre en la primera capa estará dada por la siguiente expresión:

$$L_1 = 2\pi(R + R_1)(VC)$$

Para calcular la longitud de una vuelta en la segunda capa el radio se incrementa en un factor  $(E + D)$ , donde  $E$  es el espesor del papel aislante a utilizar y  $D$  es el diámetro del alambre. Por tanto la longitud de alambre en la segunda capa estará dada por:

$$L_2 = 2\pi(R + R_1 + (E + D))(VC)$$

En las capas siguientes el radio efectivo se sigue incrementando por el mismo factor  $(E + D)$  hasta la última capa, entonces la longitud total  $L$  de alambre a utilizar en el embobinado es:

$$L = 2\pi(R + R_1)(VC) + 2\pi(R + R_1 + E + D)(VC) + 2\pi(R + R_1 + 2E + 2D)(VC) + \\ 2\pi(R + R_1 + 3E + 3D)(VC) + \dots + 2\pi[R + R_1 + (n-2)E + (n-2)D](VC) +$$

$$2\pi[R + R_1 + (n-1)E + (n-1)D](VC)$$

$$L = 2\pi(V/C) \sum_{K=0}^{n-1} [R + R_1 + K(E + D)]$$

Luego expresando todos los parámetros en milímetros se obtiene la siguiente fórmula:

$$L = \frac{2\pi}{1000} (VC) \sum_{K=0}^{n-1} [R + R_1 + K(D + E)] \quad [m] \quad (2.4)$$

Donde:

L: Longitud total del alambre esmaltado para la bobina en *metros*

VC: Vueltas por capa

n: Número de capas de alambre en la bobina

R: Radio externo del carrete en *milímetros*

R<sub>1</sub>: Radio del alambre esmaltado en *milímetros*

D: Diámetro del alambre esmaltado en *milímetros*

E: Espesor del papel aislante en *milímetros*

El número de vueltas se calcula de la siguiente manera:

$$N = VC * n$$

Las dimensiones del carrete son las siguientes:

- Longitud del arrollamiento : 84 [ mm ]
- Ancho del arrollamiento : 8 [ mm ]

Con estos valores procedemos a calcular VC y n:

$$VC = \frac{84}{1.692} = 49$$

$$n = \frac{8}{1.692} = 4$$

El espesor del papel aislante es de 0.3 *milímetros*, estos valores se reemplazan en la ecuación 2.4 para determinar la longitud total de alambre que se necesita para el arrollamiento, así:

$$L = \frac{2\pi}{1000} (49) \sum_{k=0}^3 [15 + 0.846 + K(1.692 + 0.3)]$$

$$L = 23.19 [ m ]$$

$$N = (49)(4)$$

$$N = 196$$

Ahora se determina el peso y la resistencia del arrollamiento utilizando los valores tomados de la tabla de calibre de alambre esmaltado sencillo:

$$R = 23,19m \times \frac{8,28\Omega}{1000m} = 0,1920[\Omega]$$

$$P = 23,19m \times \frac{18,662Kg}{1000m} = 0,5427[Kg]$$

Para un voltaje de 12 *voltios* la corriente será:

$$I = \frac{12}{0,1920} = 62,5[A]$$

Ahora se utiliza la ecuación (A1.8) del anexo Uno para calcular la fuerza teórica en *kilogramos* de la siguiente manera:

$$\mu_0 = 12,56 \times 10^{-7} [Wb / Am]$$

$$A = 5,06 \times 10^{-4} [cm^2]$$

$$N = 196$$

$$I = 62,5 [A]$$

$$y = 0,01 [m]$$

$$f_y = \frac{(12,56 \times 10^{-7}) (5,06 \times 10^{-4}) (196^2) (62,5^2)}{2(19,6)(0,01)^2}$$

$$f_y = 48,56 [Kg]$$



Para una corriente medida promedio de 40 *amperios* se tiene el siguiente resultado:

$$f_y = \frac{(12.56 \times 10^{-7}) (5.06 \times 10^{-4}) (196^2) (40^2)}{2(19.6)(0.01)^2}$$

$$f_y = 19.93 \text{ [ Kg ]}$$

#### 2.1.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS BOBINAS DE INDUCCIÓN

Las bobinas de inducción están conformadas básicamente del carrete y el alambre para el arrollamiento. Se utilizó un tubo de plástico para armar el carrete y el arrollamiento se realizó manualmente.

La dificultad se presentó al momento de adecuar la coraza del electroimán. Debido a la robustez del material utilizado (estatores), la única forma de colocar la bobina de tal forma que quedara fija dentro del estator era colocándola en el interior de la coraza. Para ello se necesitaba perforar el estator en la misma dirección de las chapas, además de adecuar el interior para que la bobina pudiera ser alojada.

De los dos problemas mencionados el segundo se resolvió con relativa facilidad más no el primero, puesto que debido al tamaño de los

estatores se requería de un torno de grandes dimensiones para perforar de lado a lado al estator. Consultando con maestros torneros, la mayoría no aceptó el trabajo por carecer de las herramientas necesarias, y los que sí podían hacerlo pedían demasiado dinero por el trabajo. Estos inconvenientes retrasaron la construcción de los electroimanes, no obstante se logró perforar los estatores a un precio accesible y terminar su implementación.

## 2.2. DISPOSITIVO DE CONTROL

El circuito electrónico de control está conformado principalmente de elementos digitales. El diseño del mismo está hecho por módulos o bloques, cada uno con una función específica como se muestra en la figura 2.5.

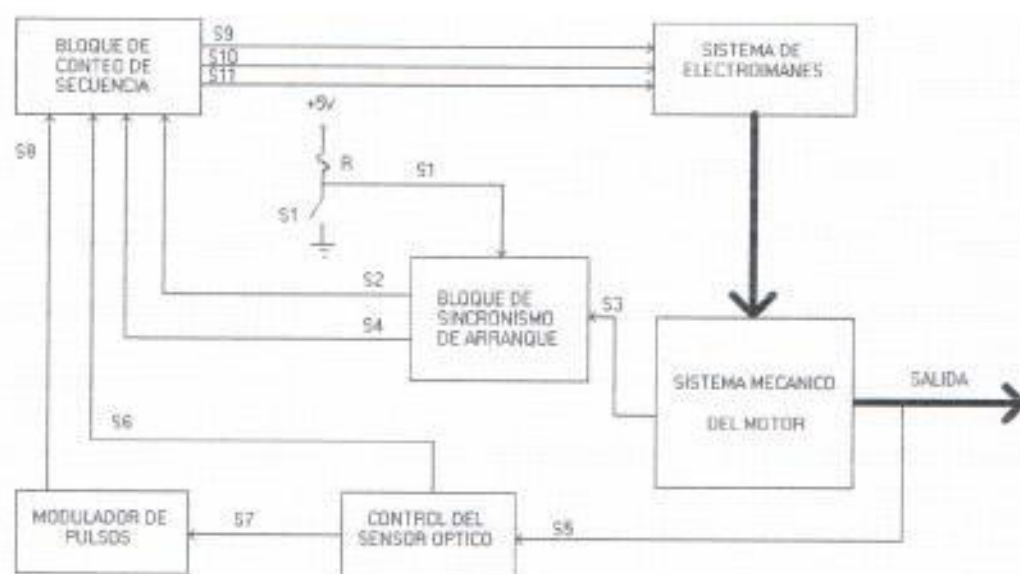


Figura 2.5. Diagrama de Bloques del Circuito de Control

Donde:

- $S_1$  : Habilitación externa.
- $S_2$  : Habilitación del contador.
- $S_3$  : Posición del primer pistón.
- $S_4$  : Carga inicial primer pistón.
- $S_5$  : Posición de los tres pistones.
- $S_6$  : Control de activación.
- $S_7$  : Activación variable.
- $S_8$  : Señal  $S_7$  invertida.
- $S_9$  : Activación del primer electroimán.
- $S_{10}$  : Activación del segundo electroimán.
- $S_{11}$  : Activación del tercer electroimán.

El bloque del sensor óptico se utiliza para chequear la posición de los pistones en el pms y enviar un pulso de conteo al bloque de secuencia de carga y conteo y al bloque modulador. Para ello se utiliza un integrado temporizador 555 para operación monoestable. Este circuito funciona al cargar un capacitor de temporización mediante una corriente determinada por una resistencia. Esta red RC se conecta a los pines de umbral y descarga (pin 6 y 7 respectivamente). En la figura 2.6 se muestra el diagrama esquemático.

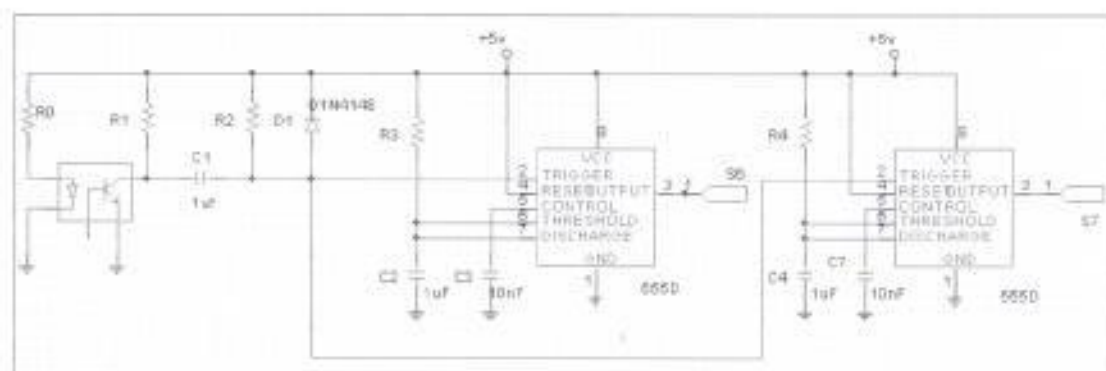


Figura 2.6. Esquema de los bloques del sensor óptico y Modulador

Para obtener en la salida el pulso de conteo, se debe cambiar el estado de voltaje de alto a bajo en la entrada de disparo (pin 2) del 555. La red RC que se conecta a la entrada de disparo se utiliza para evitar el cambio en la salida del temporizador cuando el pulso de entrada cambie en el flanco de subida (rebotes).

El voltaje de carga del capacitor de temporización  $C_2$  está dado por la expresión:

$$V_{c2}(t) = V_{cc} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{c2}}} \right) \quad [ \text{V} ] \quad (2.5)$$

Donde:

$V_{c2}(t)$  : Voltaje de carga de  $C_2$  en función del tiempo.

$V_{cc}$  : Voltaje máximo de carga.

$T_{c2}$  : Constante de tiempo de carga.

$V_{C_2}(t)$  se carga hasta alcanzar  $2/3 V_{CC}$ , entonces:

$$\frac{2}{3} V_{CC} = V_{CC} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau C_2}} \right)$$

$$\tau C_2 = 1.1 R_3 C_2 \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 determina el tiempo de carga del capacitor de temporización. Una vez alcanzado este voltaje en el pin 6, el capacitor se descarga por el pin 7 a través de un transistor interno del 555 quedando en estado saturado. La expresión para descarga es la siguiente:

$$V_{dc2}(t) = \frac{2}{3} V_{CC} \left( e^{-\frac{t}{\tau_{dc} C_2}} \right) \text{ [ V ]} \quad (2.7)$$

Donde  $\tau_{dc} C_2$  es la constante de tiempo de descarga de  $C_2$ . Suponiendo que le toma al capacitor  $C_2$  descargarse aproximadamente cinco constantes de tiempo, entonces:

$$\tau_{dc} C_2 = 5 \tau_{dc} C_2 = 5 R C_2 \quad (2.8)$$

Donde  $\tau_{dc} C_2$  y  $R$  son respectivamente el tiempo de descarga de  $C_2$  y la resistencia de la unión colector emisor del transistor interno del 555 cuando se encuentra en estado de saturación. Cuando el transistor del sensor óptico se

activa se produce un transiente provocado por la descarga y carga del capacitor.

Puesto que el voltaje de carga del capacitor debe alcanzar  $1/3V_{CC}$  entonces:

$$\frac{1}{3}V_{CC} = V_{CC} \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_2C_1}} \right) [V]$$

$$t_c C_1 = 0.4 R_2 C_1 \quad (2.9)$$

Luego para que el temporizador funcione como monoestable debe cumplirse la siguiente condición:

$$t_c C_1 < t_d C_2$$

$$0.4 R_2 C_1 < 1.1 R_3 C_2 \quad (2.10)$$

Además el tiempo de carga y descarga del capacitor de temporización debe ser menor que el tiempo en que permanecen activados los electroimanes:

$$t_c C_2 + t_d C_2 < t_{ae} \quad (2.11)$$

Donde  $t_{ae}$  es el tiempo de activación de cada electroimán. Suponiendo que  $t_{ae}$  varía entre 50 y 100 *milisegundos*, además suponiendo los siguientes valores:

$$C_1 = C_2 = 1 [\mu F]$$

$$R = 20 [\Omega]$$

De la expresión 2.10 se tiene:

$$0.4R_2 < 1.1 R_3$$

$$R_2 < 2.75R_3 \quad (2.12)$$

Además de la expresión 2.11 se tiene:

$$1.1R_3C_2 + 5RC_2 < \tau_{ae}$$

$$1.1R_3C_2 + 5RC_2 > 50 \times 10^{-3}$$

$$1.1R_3C_2 + 5RC_2 < 100 \times 10^{-3}$$

$$R_3 > \frac{50 \times 10^{-3} - 5(20)(1 \times 10^{-6})}{1.1 \times 10^{-6}}$$

$$R_3 > 45363 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

$$R_3 < \frac{100 \times 10^{-3} - 5(20)(1 \times 10^{-6})}{1.1 \times 10^{-6}}$$

$$R_3 < 90818 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

Utilizando la expresión 2.12 se tiene:

$$R_2 < 2.75(45363) = 124748 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

$$R_2 < 2.75(90818) = 249749 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

El circuito modulador está conformado por un temporizador 555 configurado para operación monoestable, utiliza el mismo circuito de disparo del circuito del sensor óptico. Su función es proporcionar un pulso de duración variable para controlar el tiempo de activación de los electroimanes. Puesto que cada electroimán permanece activado el tiempo que tarda el pistón correspondiente en desplazar al cigüeñal  $120^\circ$ , se puede relacionar el tiempo de activación con el desplazamiento angular del eje de  $0^\circ$  a  $120^\circ$  a partir del pms.

De esta observación se intuye que una variación en el tiempo de activación de los electroimanes equivale a una variación de velocidad en el eje. Tomando en cuenta la inercia mecánica del cigüeñal, se estima que el tiempo mínimo de activación de los electroimanes debe ser por lo menos superior al 50% del tiempo de activación para obtener un movimiento rotacional en el eje aproximadamente uniforme. Como consecuencia se plantea la siguiente condición:

$$t_{av} > 0.5t_{ae} \quad (2.13)$$

Donde  $t_{av}$  es el tiempo de activación variable. Además debe cumplirse la siguiente expresión:

$$1.1R_4C_3 + 5RC_3 < t_{av} \quad (2.14)$$



Para un tiempo máximo de activación de 100 *milisegundos*,  $t_{av}$  debe variar entre 50 y 100 *milisegundos*, por tanto se tiene:

$$50 \times 10^{-3} < t_{av} < 100 \times 10^{-3}$$

$$1.1R_4C_3 + 5RC_3 < 100 \times 10^{-3}$$

Si

$$C_3 = 1 \text{ [ uF ] } \text{ y } R = 20 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

$$R_4 < \frac{100 \times 10^{-3} - 5(20)(1 \times 10^{-6})}{1.1 \times 10^{-6}}$$

$$R_4 < 90818 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

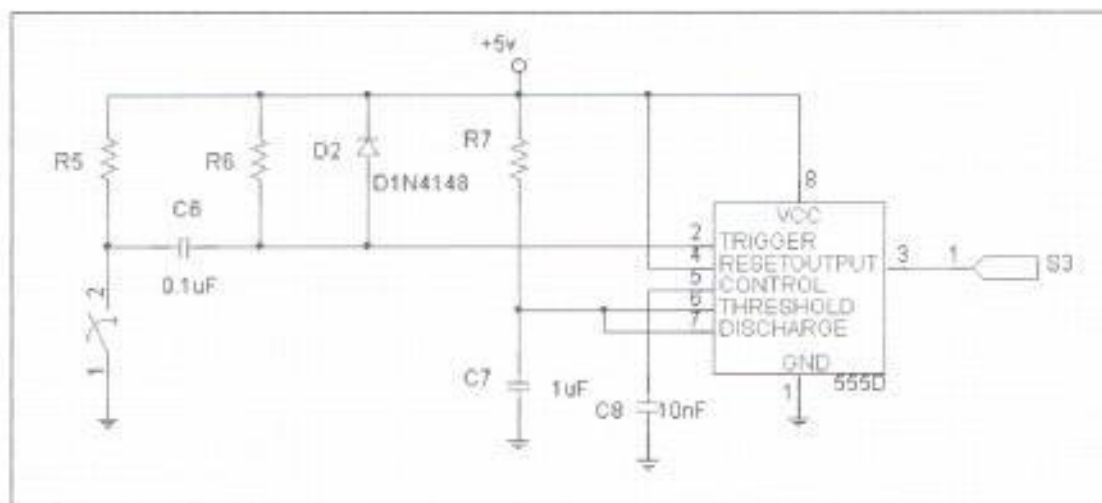


Figura 2.7. Circuito de disparo para la sincronización

El circuito de sincronización es similar al circuito al circuito del sensor óptico, por lo tanto deben cumplirse las mismas condiciones:

$$tc_{C_7} + td_{C_7} < t_{ae}$$

$$0.4R_6C_6 < 1.1 R_7C_7$$

Donde  $tc_{C_7}$  y  $td_{C_7}$  son los tiempos de carga y descarga del capacitor  $C_7$ . En realidad la duración del pulso de salida debe mantenerse en alto por lo menos hasta que el pulso proveniente del sensor óptico llegue a la entrada de reloj del contador 74161, suponiendo un valor aproximado de 25 *milisegundos* se tiene:

Si

$$C_7 = 1 \text{ [ uF ]}$$

$$C_6 = 0.1 \text{ [ uF ]}$$

$$R = 20 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

Entonces:

$$tc_{C_7} + td_{C_7} = 25 \times 10^{-3}$$

$$1.1R_7C_7 + 5RC_7 = 25 \times 10^{-3}$$

$$R_7 = \frac{25 \times 10^{-3} - 5(20)(1 \times 10^{-6})}{1.1 \times 10^{-6}}$$

$$R_7 = 22636 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

$$R_6 < \frac{1.1(22636)(1 \times 10^{-6})}{0.4(0.1 \times 10^{-6})}$$

$$R_6 < 622490 \text{ [ } \Omega \text{ ]}$$

Los valores escogidos para la implementación se determinaron experimentalmente, los mismos que se encuentran detallados en el Anexo Dos.

El bloque de secuencia de carga y conteo está conformado por un contador 74161, el cual se configura para cargar y contar. En la figura 2.8 se muestra el diagrama esquemático, las puertas AND y los inversores se utilizan para codificar las salidas del contador.

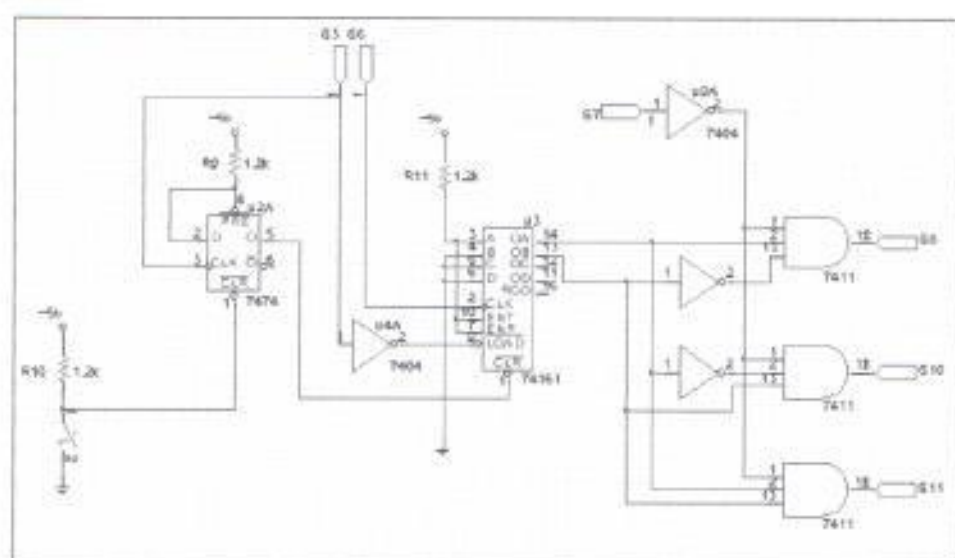


Figura 2.8. Diagrama esquemático del circuito de sincronización y de secuencia de carga y conteo

En el diagrama de bloques podemos identificar la señal  $S_7$  que corresponde al pulso variable que se multiplica con las señales respectivas que se obtienen de la codificación de las salidas del contador 74161 para obtener las señales  $S_9$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{11}$ .

El bloque de conmutación de electroimanes está conformado por relevadores, cuya función es conectar las bobinas de los electroimanes a la batería. En la figura 2.9 se muestra el diagrama esquemático.

Dado que el motor de combustión interna que utilizamos es de tres cilindros, cada pistón está desfasado  $120^\circ$  entre sí y cada relevador se activa uno a la vez.

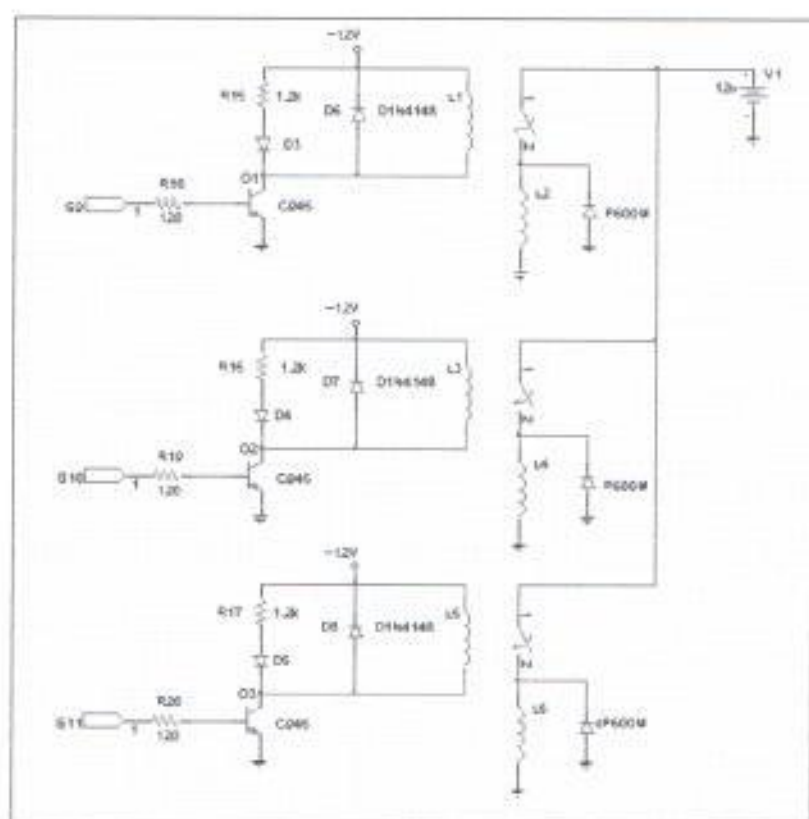


Figura 2.9. Circuito de activación de electroimanes.

La fuerza mecánica producida por los electroimanes debe actuar moviendo los pistones desde el pms hasta que el siguiente pistón esté en posición y así

sucesivamente. La bobina de cada relevador se controla mediante un transistor que actúa como interruptor; las bases de estos transistores reciben las señales sincronizadas  $S_9, S_{10}, S_{11}$ ; de esta manera se activan los correspondientes electroimanes.

El voltaje de 5 [ V ] que necesitan los integrados de la serie TTL se obtiene mediante un regulador fijo LM7805, los parámetros a tomar en consideración son:

$$V_{out} = 5 [ V ] \quad I_{out} = 0.2 [ A ] \quad T_A = 40 [ ^\circ C ] \quad T_{jmax} = 150 [ ^\circ C ]$$

$$P_{dmax} = 15 [ W ]$$

El consumo de corriente se determinó mediante mediciones utilizando Fuentes de voltaje externa. Al ser la entrada un voltaje de regulado el rizado en la entrada se puede despreciar. Las condiciones de operación son las siguientes:

$$P_d < P_{dmax}$$

$$(12 - 5)(0.2) = 1.4 < 15$$

$$T_{jmax} < T_A + R_{j0A} P_d$$

$$150^\circ C < 40^\circ C + 50^\circ C/W (1.4 W)$$

$$150^\circ C < 110^\circ C$$

Para un valor de  $R_{j\theta A} = 50$  [  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  ], la última expresión no se cumple por tanto no se necesita disipador, así mismo la potencia consumida es menor a la máxima potencia para este componente.

### CAPITULO TRES

#### CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

En el capítulo anterior se describe como fueron construidos los electroimanés, en este capítulo se menciona el problema de adaptar los electroimanés sobre el bloque del motor para transmitir directamente la fuerza mecánica resultante en el núcleo de cada electroimán a su correspondiente pistón.

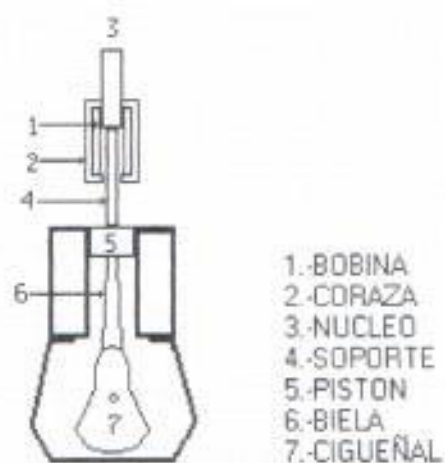


Figura 3.1. Ubicación de electroimanés con respecto al bloque del motor

En la figura anterior se muestra como deberían colocarse los electroimanes con respecto a la posición de los pistones, se puede observar claramente los dos problemas a solucionar:

- Construcción de la base para los núcleos de los electroimanes.
- Construcción de los soportes de apoyo para los electroimanes.

El material a utilizar, tanto para la construcción de las bases para los núcleos, como para la construcción de los soportes de los electroimanes se debe escoger tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El material debe tener alta reluctancia para conformar un aislamiento magnético entre el electroimán y el bloque del motor.
2. El material debe ser ligero pero resistente.
3. La estructura del soporte debe tener una alta resistencia a los esfuerzos de tracción mecánica para evitar las pérdidas en la transmisión del movimiento a los pistones.

La finalidad principal de la base de cada núcleo es transmitir el movimiento a los pistones, teniendo en cuenta esta condición se procede a colocar como base una varilla de aluminio. Este material cumple con todas las consideraciones mencionadas anteriormente, además se lo puede trabajar fácilmente en el torno. Con la varilla de aluminio se construyó una especie de perno doble (perno con hilo por ambos



extremos), en un extremo iría enroscado el núcleo del electroimán y en el otro extremo la varilla iría a su vez enroscada en cada pistón.

Para implementar esta idea primero se perforaron los núcleos y los pistones del motor, luego se construyó el hilo para la rosca en el interior. El núcleo se enrosca directamente sobre la varilla, por el otro extremo al enroscar el pistón a la varilla se utilizan dos tuercas adicionales como contratuerzas para sujetar firmemente la varilla al pistón.

Para la construcción de los soportes nuevamente el aluminio como la mejor alternativa disponible en vez de otros como la madera o el plástico. La tercera condición depende de la característica estructural del soporte, la cual se describe a continuación.

Para tener una idea de cómo deben estar conformados los soportes, se debe establecer la disposición de los electroimanes respecto de la ubicación del bloque del motor. Puesto que la fuerza mecánica generada por el electroimán se debe transmitir directamente a los pistones, cada electroimán debe estar situado sobre cada uno de los pistones. Como los soportes deben sujetar fuertemente a la coraza de cada electroimán y observando la forma de la coraza (figura 2.2) se concluye que los soportes deben tener forma de canal. De esta manera se aprovechan los agujeros de las corazas que se utilizan para agregar o quitar chapas a ellas para sujetar los soportes.

La forma acanalada presenta además buena resistencia a los esfuerzos de tracción longitudinales. Para fijar los soportes de aluminio en forma de canal al bloque del motor se aprovecha los pernos que sujetan el cabezote del motor, lo que se debe hacer es adaptar la base del soporte de tal manera que se pueda acoplar al bloque del motor utilizando los pernos del cabezote.

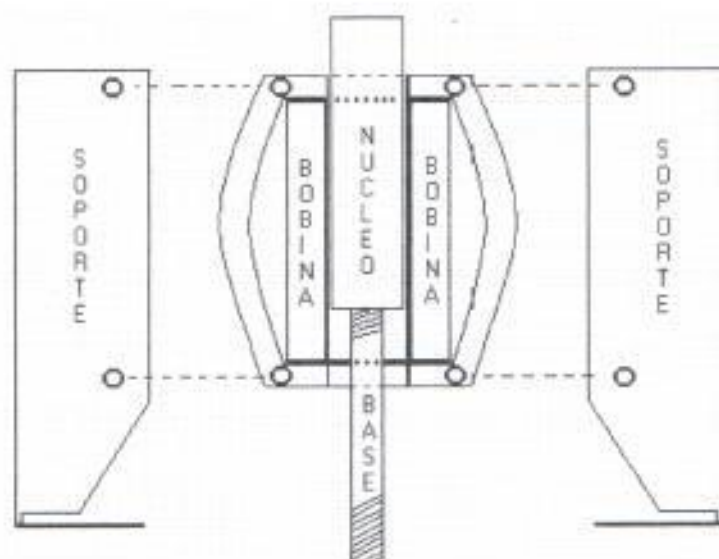


Figura 3.2. Esquema de los soportes

En la figura 3.2 se muestra la disposición de los soportes con respecto al electroimán, y a continuación se muestra el soporte ya acoplado al motor.

Una vez concluida la construcción de los soportes se procede a instalarlos sobre el motor como se muestra en la figura 3.3. Para el circuito de control se necesita implementar la tarjeta electrónica.

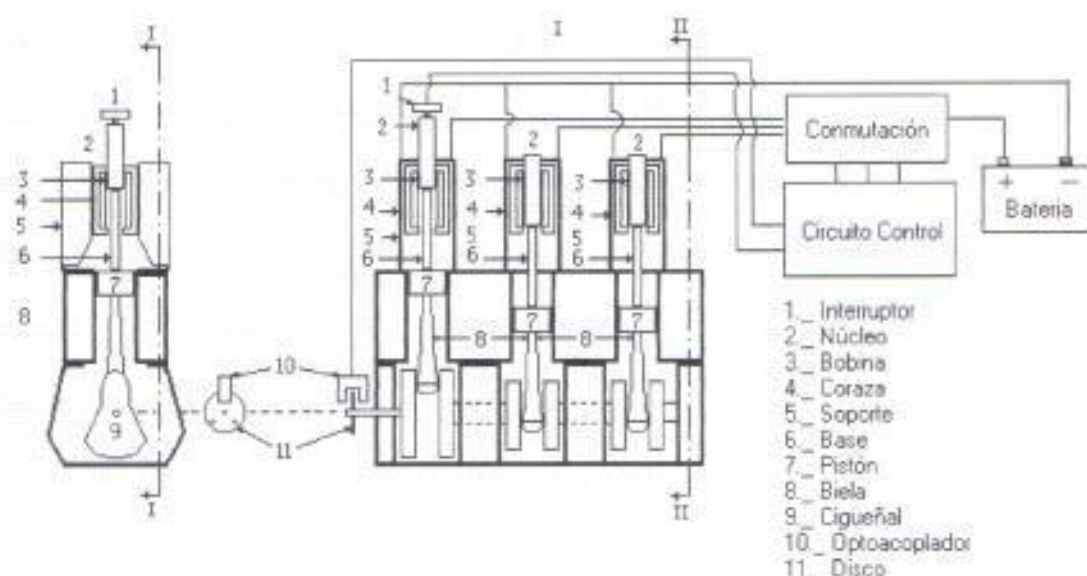


Figura 3.3. Electroimanes instalados

Ahora se procede a explicar el funcionamiento del dispositivo completo. El arranque del motor se realiza en forma manual haciendo girar el eje. Todo el sistema permanece inhabilitado por medio de un interruptor externo. Cuando se conecta la primera bobina a un voltaje de 12 [V] se induce un flujo magnético dentro del solenoide, dicho flujo tiende a mover su correspondiente núcleo hasta que su extremo inferior coincide con el extremo inferior del electroimán, en este momento el eje del cigüeñal se ha desplazado  $120^\circ$  desde su posición inicial y el pistón siguiente (tres) habrá llegado al punto muerto superior, el sensor óptico envía una señal al circuito de control para que este desactive la bobina actual y active la bobina correspondiente al electroimán del pistón tres.

Hecho esto el núcleo del pistón tres al llegar al extremo inferior del electroimán, el eje del motor se habrá desplazado  $120^\circ$ . Ahora el sensor óptico indica al circuito de control que debe desactivar la bobina actual y activar la bobina del electroimán correspondiente al pistón dos, que permanecerá en este estado hasta que el eje del motor rote otros  $120^\circ$ . En este momento el pistón uno estará en el punto muerto superior empezando nuevamente el ciclo.

Sobre el núcleo del primer pistón se ha colocado un interruptor, dispuesto de tal manera que al llegar el pistón al punto muerto superior, este haga contacto en el interruptor enviando una señal al circuito de control para que este inicie un nuevo ciclo de conexión.

El sensor óptico se utiliza para indicar al circuito de control cuando un pistón ha llegado al punto muerto superior, así el circuito de control sabe cuando activar y desactivar las bobinas. Para ello el sensor utiliza un disco con tres agujeros separados entre sí  $120^\circ$  dispuesto sobre el eje del motor tal que cuando un agujero pasa por el sensor corresponde a la posición de un pistón en el punto muerto superior.

La activación de los electroimanes no se realiza en el instante en que su correspondiente pistón ha alcanzado el punto muerto superior, porque en ese momento si se conectara el solenoide respectivo la fuerza que ejerce la varilla sobre el pistón actuaría en una dirección que pasa por el eje de rotación del cigüeñal anulando el torque. Para prevenir este efecto el disco se dispone tal que los pistones al llegar al

punto muerto superior continúan su desplazamiento aproximadamente dos grados al enviar la señal el sensor 20 al circuito de control.

El bloque del sensor óptico indica la posición de cada uno de los pistones en el punto muerto superior enviando pulsos de voltaje hacia el bloque de secuencia y conteo y al modulador de pulsos.

El bloque de secuencia y conteo conformado por un contador 74161, el cual trabaja en modo de carga y en modo conteo. Siempre que empieza el ciclo de encendido 1-3-2 el contador inicia cargando el valor 0001b a la salida cuando reciba en la entrada de reloj el pulso que le envía el bloque, pero antes debe recibir las señales de habilitación y de carga inicial del pistón proveniente del bloque de sincronismo de arranque.

El bloque de sincronismo de arranque tiene dos funciones, una es indicar al bloque de conteo cuando iniciar la carga para la conexión de la primera bobina mediante un pulso de valor lógico "1" en la entrada ld del contador 74161. Este valor lógico es temporal y solo aparece cada vez que el primer pistón se encuentra en el punto muerto superior, así únicamente en este instante el contador se configura para cargar, como consecuencia el pulso de reloj del control de activación debe llegar al contador en ese momento. En adelante cada vez que reciba la señal de control de activación contará desde hasta tres, estos valores se decodifican para activar o desactivar los relés del bloque de conmutación y electroimanes. La otra función de este bloque es habilitar y deshabilitar el circuito de control mediante el uso de un interruptor

externo, que se coloca en la entrada clr del flip flop tipo D. Siempre que se tenga en esta entrada un valor lógico "1" todas las salidas del flip flop D estarán a nivel de voltaje, así el contador permanecerá también deshabilitado. Cuando cambia el estado de la entrada clr del flip flop D este queda habilitado para cargar el nivel de voltaje en la entrada D hacia la entrada clr del contador y habilitarlo. Pero esto ocurrirá cuando llegue el pulso de habilitación del bloque de sincronismo al reloj del flip flop D. De ahí en adelante el circuito permanecerá habilitado hasta que se deshabilite nuevamente el flip flop D a través de su entrada clr.

El bloque modulador de pulsos genera un pulso de duración variable, en un rango de tiempo que varía entre un mínimo establecido hasta el máximo tiempo que puede permanecer una bobina conectada. Comparando el tiempo de conexión máximo de una bobina con el desplazamiento angular máximo de  $120^\circ$  podemos conectar las bobinas desde un pequeño desplazamiento angular hasta un máximo de  $120^\circ$ , así mientras mayor tiempo permanece conectada una bobina mayor es la velocidad de rotación del eje del motor y viceversa.

## CAPITULO CUATRO

### MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO

Una vez terminada la construcción de los electroimanes se deberá calcular el rendimiento de cada uno. En el Capítulo Uno se muestra una expresión que describe la fuerza ejercida en el núcleo del electroimán, la cual depende de la corriente y de la longitud entre la cara del núcleo y el extremo de la bobina hacia el cual se mueve (entrehierro). Se puede concluir de esta expresión que si la corriente se supone constante la fuerza ejercida en el núcleo es inversamente proporcional a la longitud de entrehierro mencionada anteriormente. Esta es una de las características que se deben tomar en cuenta para la ubicación correcta de los electroimanes sobre el bloque del motor.

La otra característica depende de la configuración mecánica del sistema conformado por pistones, bielas y cigüeñal.

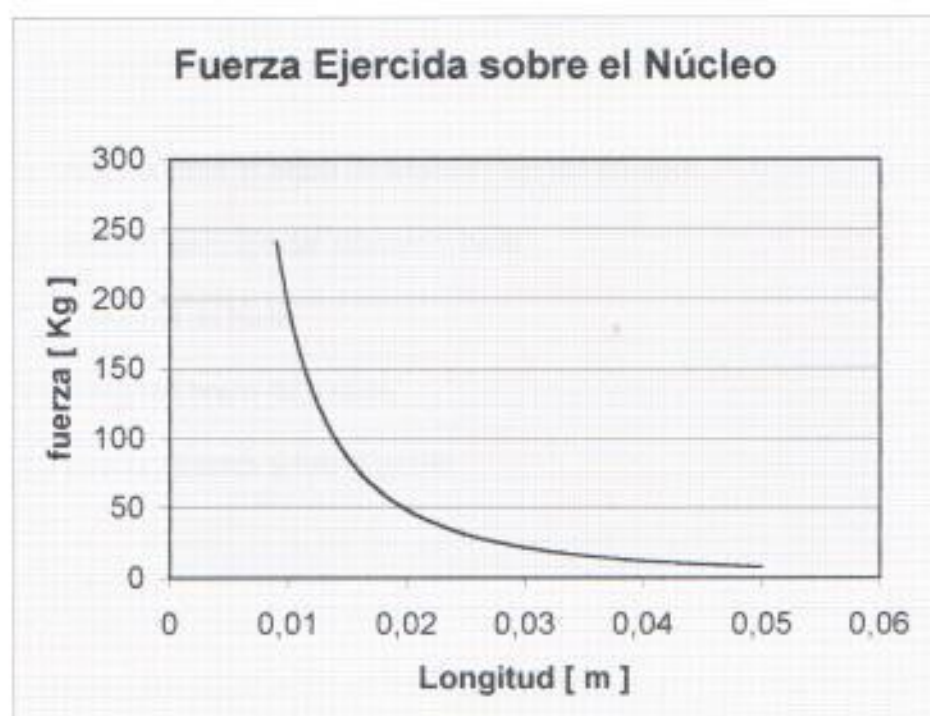


Figura 4.1. Fuerza ejercida vs. Longitud del entrehierro

Se puede comprobar que el torque producido sobre el eje del cigüeñal por una fuerza  $F$  ejercida sobre un pistón y perpendicular a este está dado por la siguiente ecuación [5]:

$$T = Fr \left[ \text{Sen}(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \text{Sen}(2\alpha) \right] \quad (4.1)$$

[5] Para una mayor comprensión de la ecuación 4.1, revisar Giacosa Dante, Motores Endotérmicos, Editorial Científico Médica.



Donde :

$\alpha$  : Ángulo entre el brazo de torsión y eje del cilindro

$\beta$  : Ángulo entre eje del cilindro y biela

$L$  : Longitud de biela

$r$  : Longitud brazo de torsión

$F$  : Fuerza ejercida sobre el pistón

$$\lambda = \frac{r}{L}$$

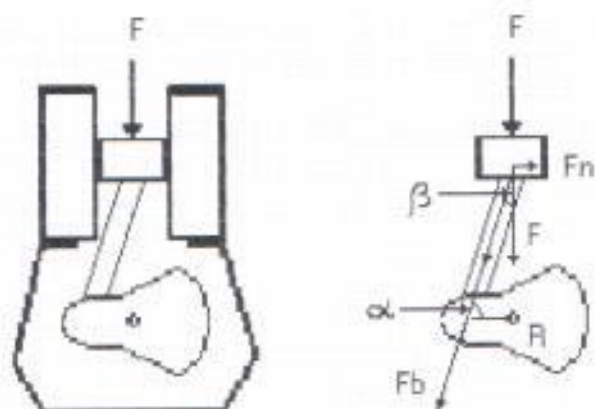


Figura 4.2. Descomposición de fuerzas en el sistema mecánico del motor

Suponiendo que la fuerza es constante, el torque ejercido en el eje del cigüeñal depende de la variación angular de  $\alpha$  entre el brazo de torsión y el eje del cilindro. Así mismo se puede comprobar que el valor de  $\alpha$  que produce el máximo torque es de  $85.56^\circ$  para un valor supuesto de  $\lambda=1/4$ .

Para aprovechar al máximo la fuerza electromagnética ejercida por el electroimán, se debe colocar estos sobre cada pistón tal que el punto de máxima fuerza coincide con el punto de máximo torque. Pero al colocar los electroimanes según esta condición se obtuvo los siguientes resultados:

- El movimiento angular en el eje no es uniforme. Como los pistones están desfasados  $120^\circ$  entre sí, la fuerza ejercida por el núcleo del electroimán sobre el pistón actuará para un desplazamiento angular entre  $0^\circ$  a  $85.56^\circ$  (ángulo de máximo torque). Durante el tiempo que transcurre mientras el pistón se desplaza hasta alcanzar los  $120^\circ$  (segundo pistón en el punto muerto superior) el movimiento en el eje se debe a su inercia mecánica.
- Consumo de energía disminuye, como consecuencia del tiempo de activación de los electroimanes.

Luego de esta prueba se conecta al eje del motor el alternador del mismo, se observa una variación irregular de la velocidad de giro a medida que se apretaba la banda hasta frenar completamente al eje. Se resuelve entonces colocar los electroimanes para que permanezcan activados en todo el recorrido angular de  $0^\circ$  a  $120^\circ$ . De esta manera al parar bajo carga la velocidad de giro es mucho más estable.

Ahora se debe calcular el rendimiento del electroimán, partiendo de la expresión 2 para la energía eléctrica de entrada mostrada en Anexo Uno se tiene:

$$W_{IN} = IN\Phi \text{ [ J ]} \quad (4.2.)$$

Donde el flujo magnético corresponde al flujo existente en el entrehierro dado por la ecuación A1.4 mostrada en el Anexo Uno.

$$\Phi = \frac{A\mu_0NI}{y} \text{ [ Wb ]} \quad (A1.4)$$

Luego la energía eléctrica de entrada al dispositivo se obtiene reemplazando la ecuación A1.4 en la ecuación 4.2, de esta manera:

$$W_{IN} = \frac{A\mu_0N^2I^2}{y} \text{ [ J ]} \quad (4.3)$$

Para determinar la energía mecánica de salida, se debe considerar que la fuerza electromagnética que mueve el núcleo central es variable, por tanto se debe utilizar la expresión integral de la energía mecánica. Dada la ecuación A1.8 derivada de la expresión (1.3) presentada en el anexo uno se tiene:

$$f_y = -\frac{\mu_0AN^2I^2}{2y^2} \text{ [ N ]} \quad (A1.8)$$

La energía mecánica para la acción de una fuerza variable se deduce de la expresión mostrada en el Anexo Uno como:

$$W_{OUT} = \int f(y)dy \quad [J] \quad (4.4)$$

Evaluando la expresión A1.8 en 4.4 se tiene:

$$W_{OUT} = \int -\frac{\mu_0 AN^2 I^2}{2y^2} dy$$

$$W_{OUT} = \frac{\mu_0 AN^2 I^2}{2y} \quad [J] \quad (4.5)$$

Dado que la energía mecánica se obtiene por acción de la fuerza electromagnética, que a su vez es producto de la energía eléctrica de entrada; se puede suponer que la energía mecánica inicial es nula. Por esta razón no se incluye la constante al utilizar la antiderivada de  $f$  para resolver la integral de la expresión 4.4.

El rendimiento de cada electroimán está dado por la razón entre las expresiones 4.5 y 4.3, así:

$$\eta = \frac{W_{OUT}}{W_{IN}}$$

$$\eta = \frac{\frac{\mu_0 AN^2 I^2}{2y}}{\frac{\mu_0 AN^2 I^2}{y}} \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{1}{2}$$

De esta expresión se puede concluir que el rendimiento de cada electroimán es del 50%, es decir, que el 50% de la energía de entrada es convertida en energía mecánica. Cabe señalar que como se utilizaron las expresiones obtenidas en el Capítulo Uno se debe conservar las mismas condiciones ideales, por tanto no se han considerado las pérdidas; así, la energía de entrada restante se encuentra almacenada en el campo magnético en el tiempo en que permanece activado el electroimán.

Cuando el electroimán pasa al estado desactivado, la energía almacenada en el campo magnético induce una fuerza contraelectromotriz de autoinducción en la bobina. Esta fuerza contraelectromotriz origina una corriente de autoinducción que genera una fuerza electromagnética adicional después de la desactivación, por tanto la energía almacenada en el campo magnético de la bobina se aprovecha como energía mecánica adicional.

El valor de  $\eta$  puede resultar optimista, pero en la práctica se deben tomar en cuenta las pérdidas. La disipación de energía debido a las causas anteriores disminuiría la obtención de energía mecánica neta en la salida para producir trabajo. El siguiente

paso es establecer cuanto influyen las pérdidas en el desempeño de cada electroimán y si se consideran aceptables hasta cierto punto.

Antes de analizar las pérdidas en el dispositivo se debe realizar una medición de la potencia mecánica desarrollada en el núcleo del electroimán, para hacerlo se tomará en cuenta que la fuerza electromagnética que actúa en el núcleo es variable; la potencia desarrollada estará dada por la sumatoria de los valores instantáneos de la fuerza electromagnética. Para simplificar la medición se establecen las siguientes condiciones:

- Los valores medidos se considerarán como valores promedio.
- El cálculo realizado de la potencia también es un valor promedio.

Para medir la energía mecánica empleamos el Teorema del Trabajo y la Energía, el cual se muestra a continuación y expresa la energía mecánica como energía cinética de un cuerpo en movimiento.

$$W = \frac{1}{2} mV_f^2 - \frac{1}{2} mV_i^2 \quad [J] \quad (4.6)$$

Donde:

$W$  : Trabajo mecánico en *Joules*

$m$  : Masa del cuerpo en movimiento en *Kilogramos*

$V_f$  : Velocidad final del cuerpo en *metros por segundo*

$V_i$  : Velocidad inicial del cuerpo en *metros por segundo*

A continuación se muestra el esquema y la descripción del experimento. El recorrido  $d$  que se muestra en la figura 4.3 representa la distancia que se desplaza cada núcleo mientras permanecen activados los electroimanes en el motor, por tanto se debe medir la velocidad del núcleo para ese desplazamiento. Para hacerlo se necesita el tiempo de activación de los electroimanes, se utilizó un circuito adicional para medir el tiempo de activación cuyo esquemático se presenta a continuación.

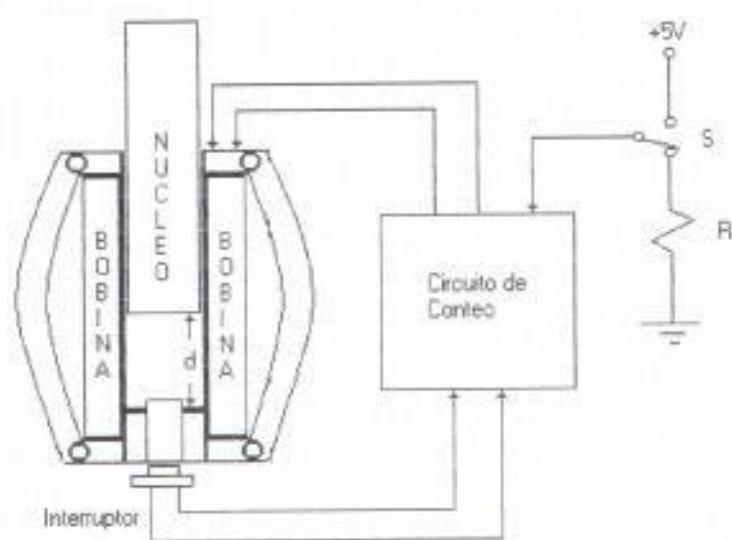


Figura 4.3. Esquema del experimento para medir el tiempo de activación de un electroimán

Este circuito está conformado por dos temporizadores 555, un flip flop D, un banco de contadores. La activación del electroimán se realiza manualmente por medio de uno de los temporizadores, al mismo el otro temporizador genera pulsos que llegan al banco de contadores. Mientras el electroimán permanece activado el banco de contadores recibe los pulsos generados hasta que el núcleo llega al final de su carrera, en ese punto se ha colocado un interruptor que desactiva al temporizador que genera los pulsos. De esta manera los contadores conservan en su salida el conteo de los pulsos generados por el temporizador, luego el tiempo de activación estará dado por el producto entre el número de pulsos y el periodo del pulso.

A continuación se muestra los valores propuestos y la relación respectiva para obtener el periodo de pulsos generados:

$$T = 0.695(R_A + R_B)C_2$$

Donde:

$$R_A = R_B = 3.3 \text{ K}\Omega$$

$$C_2 = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$T = 0.695(3.3 \times 10^3 + 3.3 \times 10^3)(1 \times 10^{-6})$$

$$T = 4.587 \times 10^{-4} \text{ [ S ]}$$



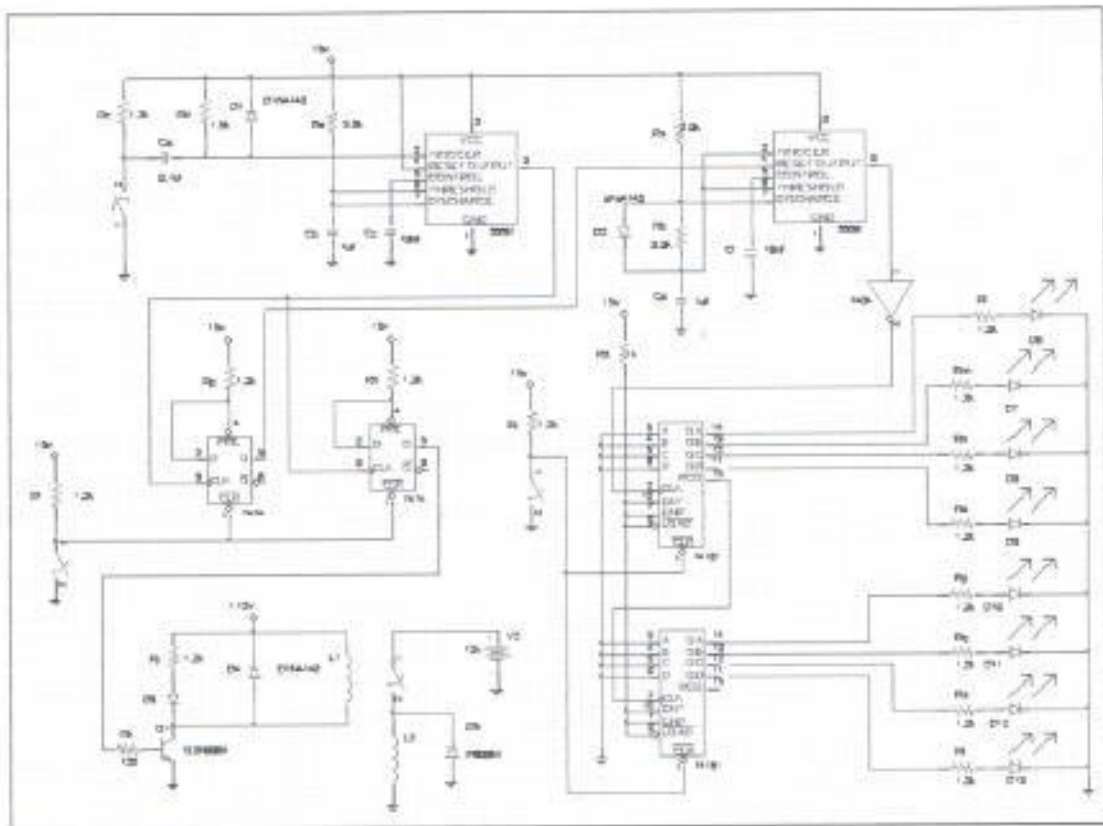


Figura 4.4. Circuito para obtener el tiempo de activación

En la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos para los pulsos generados durante la activación del electroimán:

Tabla VII. Número de pulsos generados durante la activación del electroimán

Nº	Número de pulsos
1	42
2	41
3	41
4	41
5	42
6	41
7	41
8	42
9	42
10	42

El valor promedio para el número de pulsos generados y el tiempo de activación son:

$$Np = \frac{42 + 41 + 41 + 41 + 42 + 41 + 41 + 42 + 42 + 42}{10} = 41.5$$

$$t_{ac} = 41.5 \times 4.587 \times 10^{-4} = 0.019 \text{ [ S ]}$$

Ahora se procede a calcular el trabajo mecánico con la expresión 4.6 para un valor  $m = 0.4779$  Kilogramos, de esta manera:

$$W = \frac{1}{2} (0.4779) \left( \frac{0.06}{0.019} \right)^2 = 2.38 \text{ [ J ]}$$

$$P_{prom} = \frac{2.38}{0.019} = 125.41 \text{ [ W ]}$$

La potencia eléctrica de entrada está dada por el producto del voltaje y la corriente suministrados por la fuente de poder, para un valor de 12 voltios y una corriente estacionaria de 40 amperios se tiene:

$$P_{IN} = (12)(40) = 480 \text{ [ W ]}$$

Luego el rendimiento obtenido de estas mediciones es:

$$\eta = \frac{P_{prom}}{P_{IN}} \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{125.41}{480} = 0.2612$$

$$\eta = 26.12\%$$

Este valor da una idea de las condiciones de operación real de los electroimanes, incluyendo las pérdidas de origen magnético. Estas pérdidas pueden originarse por diversas causas, principalmente aparecen por las variaciones de flujo magnético. Las pérdidas por corrientes parásitas y por histéresis (pérdidas en el hierro) son dos ejemplos.

En el caso del electroimán estas pérdidas están presentes solo en los instantes en que ocurre la transición de activación y desactivación de las bobinas. Las pérdidas por histéresis dependen del material y son proporcionales al área que encierra la curva correspondiente de histéresis. El material a utilizar debe tener un bajo nivel de reluctancia, debe ser laminado para disminuir las pérdidas por corrientes parásitas.

Existe otro tipo de pérdida presente en todas las máquinas electromagnéticas, la *dispersión magnética*. *La única manera de eliminar la dispersión magnética es distribuyendo el arrollamiento por todo el circuito magnético en función de la reluctancia, es decir a mayor reluctancia mayor amperios vuelta. De el circuito magnético mostrado en la figura 2.1.d (Capítulo Dos) correspondiente al electroimán diseñado, podemos concluir que el arrollamiento debe estar ubicado alrededor del entrehierro. De esta se minimiza la dispersión en el dispositivo.*

## CAPITULO CINCO

### INSTALACIÓN DEL MOTOR MODIFICADO EN UN VEHÍCULO DE TRES RUEDAS

La última parte del proyecto consiste en proporcionar una aplicación para el motor modificado. Como desde el inicio se pensó en una aplicación vehicular se debe determinar el vehículo tomando en cuenta la relación potencia-peso, la cual indica que el dispositivo debe desarrollar la mayor potencia posible sobre el menor peso. En nuestro caso debemos utilizar un vehículo sumamente ligero, siendo los únicos vehículos que cumplen esta condición son los vehículos impulsados por el hombre como por ejemplo la bicicleta.

Partiendo de esta idea el vehículo debería tener por lo menos tres ruedas y ser ligero. Al principio se pensó en utilizar el chasis de un vehículo de karting, pero no se pudo concretar debido a las dimensiones y peso del motor con respecto a la capacidad y tamaño del chasis. Al final se resolvió utilizar un triciclo de pedales como vehículo.

Se logró conseguir varias partes de triciclos dañados inservibles para su dueño pero útiles para el proyecto. Una vez terminados los trabajos de reconstrucción del triciclo se procedió a instalar el motor. De esta manera logramos armar el vehículo de tres ruedas proyectado, el cual tiene la forma de un triciclo común y corriente pero con una prolongación en la parte trasera para el montaje del motor.

La parte más crítica de la instalación del motor fue el alineamiento de el eje del motor con el eje de tracción, y la relación de transmisión de potencia al eje de tracción. Para la transmisión de potencia se resolvió utilizar una cadena y un juego de piñones con una relación de dientes de 1:2 entre el eje del motor y el eje de tracción respectivamente; con esta disposición se pretendió entregar mayor torque a las ruedas en vez de velocidad. Estas consideraciones fueron tomadas de acuerdo a criterios básicos de mecánica.



Figura 5.1 Vehículo con el motor instalado.

En la figura anterior se muestra el motor modificado ya instalado sobre el triciclo. Con el vehículo ya terminado se realizaron varias pruebas, las cuales se describen a continuación.

La primera prueba que se realizó con el vehículo fue la de verificar la transmisión de potencia en vacío y luego verificar que la potencia desarrollada por el motor fuera suficiente para vencer la inercia del sistema. Aunque el vehículo por sí mismo es ligero la mayor parte de la inercia proviene de el motor; esto provocó el frenado del mismo al primer intento.

Luego se intenta el arranque del motor, pero con el vehículo en movimiento( con velocidad inicial ), en este caso el vehículo se desplazó aproximadamente veinte metros.

La prueba del motor con arranque inicial se repitió varias veces, se observa un desplazamiento variable del vehículo de acuerdo a la carga de la batería. Luego se conectaron dos baterías en serie para proporcionar mayor potencia, en este experimento el desplazamiento alcanzó aproximadamente cuarenta metros con una carga de cien libras. A pesar de obtener un mejor desempeño, la corriente resultante excedió el límite de los relés, esto provocó que uno de ellos se dañara. Esta prueba no se volvió a repetir porque los electroimanes no están diseñados para soportar grandes corrientes

## CAPITULO SEIS

### ANALISIS ECONÓMICO

El recurso económico es un factor importante en cualquier trabajo de investigación, y en este caso no fue la excepción. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación dada al dispositivo descrita en el Capítulo anterior muestran que este todavía está en fase de experimentación, por tanto no se lo puede comparar en términos económicos con un motor de combustión interna real. Por otra parte si se pueden mencionar los recursos utilizados tanto para la investigación como para la construcción del dispositivo.

Para el desarrollo de la investigación se contó con opiniones de personas con conocimientos técnicos sobre el tema. En la parte de implementación del dispositivo, debido a que se contó con recursos limitados, se optimizó el uso de materiales y herramientas para su construcción. Los gastos realizados para la implementación

constituyen en gran parte a la adquisición de un motor de combustión interna de tres cilindros y el material para la construcción de las bobinas que constituyen una parte importante del trabajo de investigación.

Pero no bastó con tener los materiales a la mano para iniciar la construcción. Como se mencionó en Capítulos anteriores, las soluciones dadas para la construcción de las piezas mecánicas eran poco usuales. Dada la “complejidad” que tenían estas piezas, se invirtió mucho tiempo en la búsqueda de lugares donde poder construirlas o de alternativas para reemplazarlas al menor costo posible. Es así que el recorrer talleres mecánicos y lugares de venta de chatarra se convirtió en el pan de cada día.

A continuación se muestra el costo de algunos materiales utilizados:

Tabla VIII. Costo de materiales utilizados

Alambre para bobina calibre #14	60.00
Aluminio para los soportes y bases	15.00
Motor de combustión interna de tres cilindros	120.00
Juego de electroimanes de prueba para investigación	40.00
Hierro para fabricación de núcleos	10.00
Estatores para fabricación de corazas	10.00
Juego de pernos y tuercas de varios tamaños	15.00
Materiales para reconstruir el vehículo	50.00
Dos baterías	100.00
Construcción de los soportes para cada núcleo	30.00
Construcción de las corazas para cada electroimán	90.00
Construcción de los núcleos	20.00
Modificación de pistones	15.00
Construcción del circuito de control	20.00
Cables y accesorios para las conexiones	20.00
Juego de relés electromecánicos	60.00
Juego de imanes permanentes para investigación	10.00
<b>TOTAL</b>	<b>685.00</b>



La inversión realizada para la construcción del dispositivo es de aproximadamente 685.00 dólares, tomando en cuenta el gasto de materiales utilizados tanto para las pruebas iniciales como para el dispositivo construido.

El tiempo empleado para la investigación y desarrollo del prototipo final es de aproximadamente un año y medio.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como parte final en el desarrollo de este proyecto a continuación se plantean las conclusiones a partir de las experiencias obtenidas tanto en el diseño como en la experimentación del dispositivo; así se tiene:

1. La complejidad en el diseño de los electroimanes es un factor determinante para las pérdidas de origen electromagnético, principalmente en la elección del material ferromagnético para construir la coraza.
2. Al utilizar un motor de combustión interna real, los electroimanes deben proyectarse tomando en cuenta las características del motor. El espacio físico entre cada cilindro limita el tamaño de los electroimanes, además la inducción mutua impide colocar los electroimanes demasiado cerca unos de otros.
3. Las piezas mecánicas necesarias para la construcción del dispositivo fueron diseñadas de manera general, algunas construidas con herramientas elementales. Esto produjo cierta dificultad al momento de la instalación, así como desbalances de fuerzas que se traducen como pérdidas mecánicas.

4. La fuerza ejercida por los electroimanes no es lineal; esta característica presenta ciertas dificultades al momento de comprobar la eficiencia del dispositivo.
5. El peso del motor es una limitante para el desempeño del dispositivo; las piezas del motor deberían ser ligeras. Este inconveniente no se tomó en cuenta al momento de seleccionar el motor debido a la dificultad que se turno para conseguir un motor de tres cilindros.
6. La potencia inicial planteada en el diseño de los electroimanes no fue suficiente para obtener un desempeño aceptable en las pruebas realizadas con el dispositivo instalado en el motor. Esto ocurre como consecuencia del peso excesivo de algunas piezas utilizadas.

Durante las pruebas realizadas con el motor modificado surgieron algunas propuestas para mejorar el desempeño del mismo, como son por ejemplo la sincronización de arranque o el rache de tensión para la cadena de transmisión. Las siguientes recomendaciones se proponen como alternativas a partir de las conclusiones para mejorar el rendimiento del motor instalado:

1. El motor a utilizar debe ser de preferencia de aluminio para minimizar la inercia en el arranque y como aislante ferromagnético. Se debe tomar en cuenta el espacio entre los cilindros del motor, ya que los electroimanes no pueden estar muy cerca uno de otro. Esta condición es necesaria para evitar la

inducción de una f.e.m. debido a la dispersión magnética inherente en los electroimanes.

2. Las piezas mecánicas deben diseñarse y construirse con precisión, de preferencia con aluminio por ser un aislante de magnetismo y el diseño con asesoría de un experto en este campo.
3. Para mejorar el rendimiento del dispositivo instalado en el motor se aconseja combinar el diseño de los electroimanes con una mayor demanda de potencia y el estudio de descomposición de fuerzas tanto para el acoplamiento entre el núcleo del electroimán y el pistón utilizando un juego de palancas, como en el juego de piñones para la transmisión de potencia.
4. Considerando que la fuerza ejercida por los electroimanes no es lineal, a continuación se describe una variación para el diseño de los electroimanes, donde se tienen dos bobinas, una fija al núcleo y la otra moviéndose libremente a través del núcleo. La polaridad de las bobinas es tal que los flujos magnéticos inducidos por las dos bobinas dentro del núcleo generen polos magnéticos iguales produciendo repulsión mutua entre las bobinas.

Con el desarrollo de este proyecto se ha dado el primer paso en la aplicación real del mismo, las recomendaciones anteriores son planteadas con el ánimo de proporcionar las bases para continuar con esta investigación contribuyendo de esta manera a su optimización.

Además en Noviembre de 2001 se iniciaron los trámites pertinentes en el Instituto Ecuatoriano de la Propiedad Intelectual (IEPI) para la obtención de la primera patente industrial de la ESPOI sobre el proyecto en mención.

# ANEXOS

## ANEXO UNO

### EXPRESIONES MATEMÁTICAS UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA PARA EL MODELO PRESENTADO EN EL CAPITULO UNO

En los capítulos Uno y Cuatro se hace mención de la energía de entrada en el sistema electromecánico. En el sistema electromagnético que se muestra en la figura 1.1 del capítulo Uno, el proceso de conversión de energía involucra el estudio de las características magnéticas, eléctricas y mecánicas que se relacionan con los cambios de energía.

Considerando las suposiciones planteadas en el Capítulo Uno al aplicar la Ley de Conservación de Energía, donde para una variación infinitesimal de energía de entrada tenemos:

$$dW_{in} = dW_{alm.} + dW_{out} \quad [J] \quad (1.1)$$

Donde el término  $dW_{out}$  representa la variación de energía mecánica aplicada al núcleo, la cual se puede escribir utilizando la ecuación (4.5) para determinar el trabajo realizado por una fuerza variable como:

$$dW_{out} = f_y dy \quad [J] \quad (A1.1)$$

Donde  $f_y$  es la fuerza ejercida sobre el núcleo del sistema en la dirección  $y$ . Una diferencia de potencial aparece entre los terminales de la bobina como resultado de la variación de flujo magnético, utilizando la definición de potencia suministrada  $P=EI$  para expresar la energía de entrada:

$$dW_{in} = N i d\Phi \Rightarrow \quad (A1.2)$$

$$dW_{in} = \frac{\Phi y}{\mu_0 A} d\Phi \quad [J] \quad (A1.3)$$

Se puede comprobar que el flujo magnético y la energía almacenada[5] en el entrehierro son respectivamente:

$$\Phi = \frac{A \mu_0 N I}{y} \quad [Wb] \quad (A1.4)$$

$$W_{alm.} = \frac{\Phi^2 y}{2 \mu_0 A} \quad [J] \quad (A1.5)$$

Luego la variación de energía almacenada para el desplazamiento está dada por:

$$dW_{alm.} = \frac{\Phi^2 y}{2 \mu_0 A} dy + \frac{\Phi y}{\mu_0 A} d\Phi \quad [J] \quad (A1.6)$$

[5] Para una explicación detallada revisar **Massachussets, Circuitos magnéticos y transformadores**



Reemplazando las ecuaciones A1.3 y A1.6 en la ecuación 1.1 y resolviendo para la energía mecánica se tiene:

$$dW_{out} = -\frac{\Phi^2}{2\mu_0 A} dy \quad [J] \quad (A1.7)$$

Luego igualando esta expresión con la ecuación A1.2 y resolviendo para  $f_y$  se tiene:

$$f_y = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 A} \quad [N] \quad (1.3)$$

Se puede comprobar que combinando la ecuación 1.3 con la A1.4 se puede escribir la fuerza magnética resultante en términos de la longitud del entrehierro y de la fuerza magnetomotriz de la siguiente manera:

$$f_y = \frac{\mu_0 AN^2 I^2}{2y^2} \quad [N] \quad (A1.8)$$

Donde  $\mu_0$ ,  $A$ ,  $N$ ,  $I$ ,  $y$  son respectivamente la Permeabilidad del espacio libre en [ Wb / Am ], El área transversal del entrehierro en [ m<sup>2</sup> ], el número de vueltas del arrollamiento, la Corriente en [ A ] y la Longitud del entrehierro en [ m ]

## ANEXO DOS

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las especificaciones técnicas del dispositivo tienen la finalidad de permitir siguiendo las instrucciones dadas, ensamblar el mismo con un mínimo de conocimiento acerca del tema. Las características de cada electroimán se muestran a continuación:

Bobina:

- 196 vueltas distribuidas en cuatro capas de 49 vueltas por capa.
- Carrete de plástico cuyas medidas se muestran en la figura A2.1.
- $23,19 [ m ]$  de alambre esmaltado #14 marca ESSEX,  $200^{\circ}C$ .
- Papel nómex para aislar las capas del embobinado.

Circuito Magnético:

- Coraza formada con un estator de motor eléctrico de aproximadamente 1/3 Hp
- Núcleo de hierro dulce cuyas medidas se muestran en la figura A2.2.
- Tope de hierro dulce cuyas medidas se muestran en la figura A2.2.

Bases:

- Soporte de aluminio de  $\frac{1}{2}$  pulgada para el núcleo móvil.
- Soporte de aluminio en forma de canal para la coraza.

Tabla IX. Características eléctricas y mecánicas de los electroimanes.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje de alimentación	12 [ V ]
Resistencia Teórica	0.1920 [ $\Omega$ ]
Peso teórico	0.54 [ Kg ]
Resistencia medida	0.3 [ $\Omega$ ]
Corriente medida promedio	40 [ A ]
Potencia disipada en el arrollamiento	480 [ W ]
Temperatura de operación	55 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Altura máxima comprobada de operación sobre el nivel del mar	2800 [ m ]
Fuerza magnética teórica en el núcleo para un entrehierro de 10 [ mm ]	48.56 [ Kg ]
Rendimiento teórico del electroimán incluyendo pérdidas	26.12%

Tabla X. Componentes del circuito electrónico de control.

Resistores	Valores
R0	750 [ $\Omega$ ]
R1, R2	10 [ $\text{K}\Omega$ ]
R1, P2	100 [ $\text{K}\Omega$ ]
R3, P4, P5	200 [ $\text{K}\Omega$ ]
R3	5.6 [ $\text{K}\Omega$ ]
R6	1.5 [ $\text{K}\Omega$ ]
R7	33 [ $\text{K}\Omega$ ]
R4, R18, R19	2.2 [ $\text{K}\Omega$ ]
R5, R8, R9, R10, R11, R15, R16, R17	1.2 [ $\text{K}\Omega$ ]
R12, R13, R14	120 [ $\Omega$ ]
Capacitores	Valores
C1, C2, C4, C7	1 [ $\mu\text{F}$ ]
C6	0.1 [ $\mu\text{F}$ ]
C3, C8, C5, C9	10 [ nF ]
Semiconductores	Descripción
D1, D2, D3, D4, D5	Diodos de uso común 1N4148
D6, D7, D8, D9, D10	LED 5mm
D11, D12, D13	Diodos de potencia P600M
Q1, Q2, Q3	Transistores de uso común C945
IC1, IC2, IC4	Temporizador 555
C3	Regulador LM7805
C5	Contador BCD 74161
C6	Flip Flop D 7474
C7	Puertas AND de tres entradas 7411
C8	Inversores 7404

Elementos externos al circuito de control:

- Tres relés electromecánicos de 12 [ V ] 70 [ A ]
- Interruptor óptico, módulo transistor NPN a la salida, ECG3102
- S1 : Interruptor externo para habilitar modulador.
- S2 : Platino utilizado para sincronización.
- S3 : Interruptor para habilitar el circuito electrónico.
- S4 : Interruptor principal.

## 2.1. CONSTRUCCIÓN DE LAS PIEZAS MECÁNICAS

La construcción de los soportes y de la coraza deben hacerse como se muestra en la figura A2.2. Para construir la coraza se debe trabajar el estator eliminando ranuras para crear una cavidad rectangular donde se alojará la bobina. Luego se debe perforar transversalmente sobre los lados del estator en que se eliminen las ranuras. El diámetro de la perforación debe ser igual al diámetro externo del carrete.

Los soportes para los núcleos deben trabajarse en torno para formar un tornillo sin fin, además deben perforarse tanto pistones como núcleos puesto que el soporte del núcleo debe ir atornillado al pistón, y el mismo núcleo a su vez atornillado al soporte. Las bases para sostener las corazas se construyeron en forma de canal

de acuerdo a las medidas mostradas en la figura A2.2. En la parte inferior deben doblarse y perforarse para atornillar la base al bloque del motor. Los soportes tanto para el sensor óptico como para el interruptor de sincronización no presentan mayor dificultad y se deja su construcción a criterio del armador.



Figura A2.1. Medidas del carrete para la bobina.

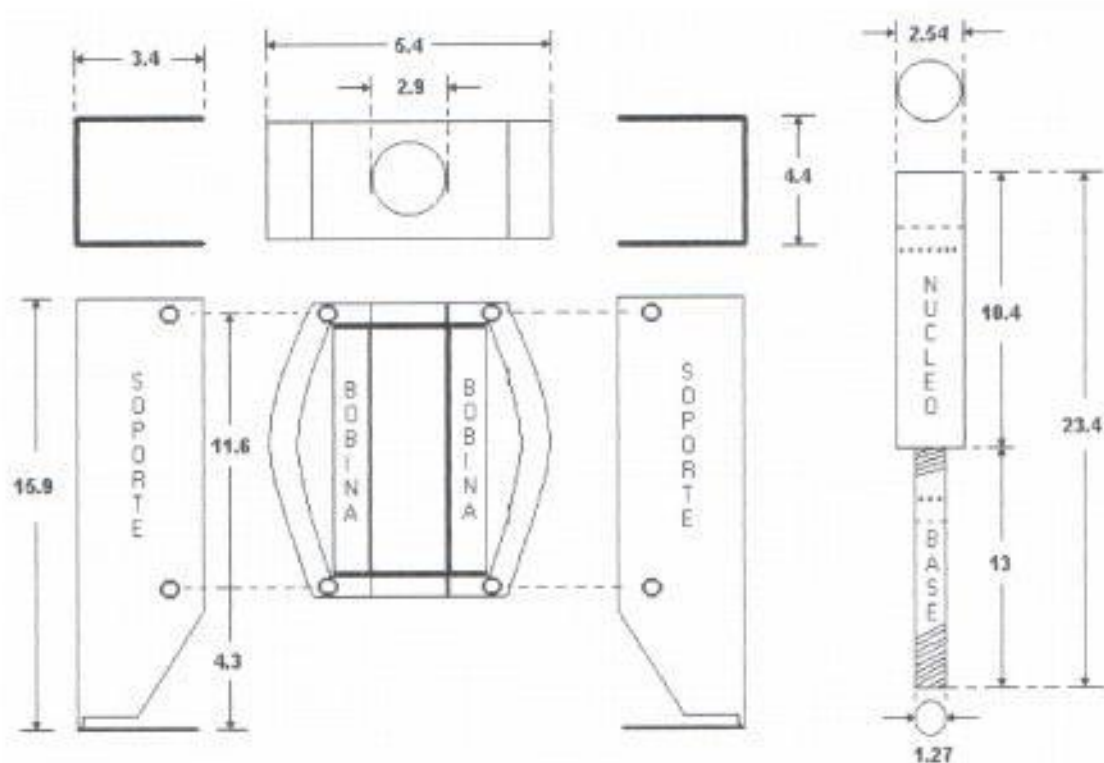


Figura A2.2. Esquema de los electroimanes con medidas.

La posición del sensor óptico debe ser tal que cuando el agujero respectivo del disco pase por el sensor, el pistón ya se ha desplazado 2° o 3° desde el pms.

La construcción del carrete de la bobina se debe realizar respetando las dimensiones mostradas en la figura A2.1. Las bobinas deben construirse respetando el número de vueltas por capa designado, y deben alojarse las vueltas de manera uniforme. Las medidas mostradas en las figuras A2.1 y A2.2 están en *centímetros*.

## 2.2. CIRCUITO ELECTRÓNICO

La construcción de la tarjeta electrónica se deja a criterio del armador, siempre y cuando se tome en cuenta las entradas, salidas y los controles respectivos para habilitación y calibración del circuito.

## 2.3. ENSAMBLAJE

Una vez terminadas las piezas mecánicas se procede a ensamblar el dispositivo de acuerdo al siguiente orden:

1. Atornillar la base del núcleo por un extremo sobre un pistón. Se utilizan dos tuercas que se colocan sobre y bajo el pistón, estas tuercas tienen la función de

apretar el soporte y darle mayor firmeza y resistencia a los esfuerzos de tensión horizontales y verticales. Además se utiliza un anillo de presión para mayor seguridad.

2. Desarmar la coraza en dos partes iguales, recuerde que esta formada por láminas. Luego colocar la bobina respectiva en la cavidad de la mitad de una coraza, después colocar la otra mitad de tal forma que la bobina quede encerrada por la coraza. Utilizar los agujeros de la coraza para sujetar esta a los soportes en forma de canales. Los agujeros en los soportes deben hechos respetando las medidas mostradas en la figura A.2, y con suficiente precisión puesto que de ello depende el correcto deslizamiento sin fricción del núcleo de la bobina.
3. Perforar los agujeros de los soportes de una coraza para atornillar esta al bloque del motor. Estos agujeros se hacen con un diámetro mayor al del perno para permitir una calibración manual de la posición de los electroimanes.
4. Una vez armados los pistones con sus respectivos soportes, el motor debe tener la apariencia mostrada en la figura A2.3. Colocar los electroimanes armados con sus soportes sobre cada cilindro y fijarlos con pernos sin apretar.
5. Colocar los núcleos atornillados a la parte superior de cada soporte talque el entrehierro entre la cara inferior del núcleo y el tope del electroimán sea aproximadamente 3 *milímetros* de longitud en el pmi.

6. Modificar la posición de cada electroimán de tal forma que el núcleo al moverse no roce con el interior del carrete de la bobina, una vez que se cumple lo anterior apretar los pernos respectivos.
7. Colocar la base del interruptor de sincronización graduando la distancia entre el núcleo y el interruptor para permitir un movimiento normal del núcleo. Se puede utilizar algún tope de caucho para evitar el choque directo entre núcleo e interruptor. Cabe señalar que este interruptor debe colocarse sobre el electroimán del pistón que inicia la secuencia de activación.
8. Colocar el sensor óptico en la posición respectiva dependiendo del criterio del armador.
9. Instalar la tarjeta electrónica y conectar las correspondientes entradas, salidas y los controles de habilitación.
10. Instalar los relés electromecánicos. Para la conexión de los terminales NA y C se utiliza cable AWG #8, y borneras #8.



Figura A2.3. Núcleos ensamblados



#### 2.4. CONEXIÓN DE LA BATERÍA Y CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO

Ahora se debe conectar la batería para alimentar al circuito de control, para realizar la calibración del dispositivo se debe girar manualmente el eje del motor y observar la activación de cada fase. A continuación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Fijar los valores de P1, P2, P3 que se sugieren en el Capítulo Dos, observar el diodo indicador D9 y chequear la correspondencia con el paso del agujero del disco respectivo por el sensor óptico.
2. Chequear la disposición física entre el interruptor de sincronización S2 y el sensor óptico, esta es la parte crítica de la calibración. Se debe tratar en lo posible que el tiempo desde que el interruptor S2 conmute hasta que el agujero del pistón correspondiente pase por el sensor óptico debe ser mínimo posible.
3. Una vez colocado el sensor óptico en una posición de acuerdo a las recomendaciones del paso 2, se procede a calibrar los tiempos de duración de los pulsos que producen sus respectivos circuitos. De manera experimental se ha obtenido los siguientes valores:
  - $P3 = 20 [ K\Omega ]$
  - $P5 = 60 [ K\Omega ]$
4. Chequear la activación de los electroimanes por medio de los diodos D3, D4, D5, repetir el paso 3 hasta que no se obtengan activaciones erróneas.

5. Conectar la batería a los relés para cerrar el circuito de potencia. Arrancar el motor y observar si existen pérdidas de sincronización, de darse esto último calibrar P3 y P5 tal que la activación sea uniforme.

## ANEXO TRES

### GLOSARIO DE TÉRMINOS

#### B

**Biela.** \_ Barra que transmite el movimiento del pistón al cigüeñal. Junto con el cigüeñal convierten el movimiento de vaivén en movimiento rotacional.

#### C

**Cigüeñal.** \_ Árbol acodado de un motor sobre el cual actúan los pistones mediante sus respectivas bielas.

**Circuito Magnético.** \_ Recorrido o camino que siguen las líneas magnéticas de fuerza generadas por imanes o electroimanes.

**Corrientes Parásitas.** \_ Corrientes inducidas en una masa de metal siempre que se mueve en un campo magnético.

#### D

**Densidad de Campo Magnético.** \_ Es el número de líneas de fuerza por unidad de área que pasa en cualquier sustancia a través de un plano perpendicular a la dirección de las mismas líneas. Su unidad es el *Maxwell sobre  $cm^2$* . También se puede expresar en *Weber sobre  $m^2$* .

#### E

**Energía.** \_ Capacidad para producir trabajo. Su unidad es el *Joule*.

**Estator.** \_ Parte del circuito magnético de una máquina eléctrica que se encuentra estático.

**Flujo Magnético.** \_ Número total de líneas de fuerza que comprende el campo. Su unidad es el *Maxwell* o *línea de fuerza* en el sistema c.g.s. También se puede expresar en *Weber*.

**Fuerza Contraelectromotriz.** \_ Fuerza electromotriz autoinducida en una bobina como consecuencia del almacenamiento de energía en el campo magnético generado. Su unidad es el *voltio*.

**Fuerza Electromotriz.** \_ Denominada también presión eléctrica, Tensión, diferencia de potencial, se utiliza para designar el impulso que mueve o tiende a mover los electrones de un lugar a otro, es decir, el impulso que hace fluir la electricidad. Su unidad es el *voltio*.

**Fuerza magnética.** \_ Fuerza de atracción o de repulsión entre las caras polares de dos imanes. Se puede expresar en *Newton* o en *Kilogramos fuerza*.

**Fuerza Magnetomotriz.** \_ Es la fuerza o agente debido al cual se produce el flujo de líneas de fuerza. Su unidad es el *amperio-vuelta*.

**Inductancia.** \_ Capacidad de un circuito eléctrico para producir una fuerza electromotriz por inducción electromagnética cuando cambia o varía la corriente que

luye por el mismo. La unidad es el *Henry*, con frecuencia se utiliza la milésima parte de él.

**inercia.** \_ Propiedad de la materia de resistirse a cambiar su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme.

**Intensidad de Campo Magnético.** \_ Es una medida de la capacidad del campo de producir flujo o líneas de fuerza. Se puede expresar en *Amperios-vuelta sobre cm.*

L

**Líneas de Fuerza.** \_ Líneas imaginarias a lo largo de las cuales actúa la fuerza de atracción o repulsión de un imán o electroimán. Constituyen una unidad para medir el magnetismo de un campo magnético.

P

**Permeancia.** \_ Una medida de la propiedad de los materiales de permitir el paso de un flujo magnético en ellos. El perm es la unidad de permeancia.

**Pérdidas.** \_ Energía disipada como calor no utilizable.

**Pistón.** \_ Émbolo confinado en un cilindro donde se produce el movimiento de vaivén en un motor endotérmico.

**Potencia.** \_ Es la rapidez con que se realiza trabajo. Por lo general la potencia eléctrica se expresa en *Vatios*, la potencia mecánica en *caballos de fuerza*.

**Punto Muerto Superior.** \_ Posición vertical de la biela donde el pistón alcanza el punto más elevado.

**R**

**Relevador.**\_ Dispositivo electromecánico que permite controlar o aislar etapas de control y potencia en un circuito electrónico.

**Reluctancia.**\_ Una medida de la propiedad de los materiales de oponerse a la creación de flujo magnético en ellos. La unidad es el *rel*.

**Rendimiento.**\_ Es la razón entre la potencia de salida a la potencia de entrada.

**S**

**Solenoides.**\_ Cualquier bobina que tiene vueltas de alambre esmaltado y que transporta una corriente.

**T**

**Torque.**\_ Es una medida de la tendencia a producir rotación. Se puede expresar en *metros-Kilogramos*.

**Trabajo.**\_ Es el vencer una oposición a través de cierta distancia. Su unidad es el *Joule*.

## ANEXO CUATRO

### SIMBOLOGÍA

$A$  : Área Transversal

$B$  : Densidad de Campo Magnético

$H$  : Intensidad de Campo Magnético

$I$  : Corriente

$N$  : Número de vueltas

$R$  : resistencia

$\Phi$  : Flujo magnético

$\gamma$  : Rendimiento

## ANEXO CINCO

### ABREVIATURAS

Af : Área efectiva

C : Común

D : Diámetro de alambre

E : Espesor del papel aislante

f.m.m. : Fuerza magnetomotriz

f.e.m. : Fuerza electromotriz

h : Longitud de arrollamiento

pms : Punto Muerto Superior

pmi : Punto Muerto Inferior

NA : Normalmente Abierto

n : Número de capas de alambre

Np : Número de pulsos

Pin : Potencia de entrada

Pprom. : Potencia promedio

w : Ancho de arrollamiento

Walm : Energía Almacenada

Win : Energía de entrada

Wout : Energía de salida



## ANEXO SEIS

### FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Se conoce que los automóviles impulsados por motores de combustión interna son máquinas de poca eficiencia, en condiciones ideales menos del 15% de la energía disponible en el combustible se utiliza para impulsar el vehículo. El proceso de combustión interna consta de los siguientes pasos:

1. Admisión.\_ El pistón se desplaza desde el pms hasta el pmi, durante este desplazamiento la válvula de admisión se abre dejando pasar a la recámara la mezcla aire combustible.
2. Compresión.\_ El pistón se desplaza desde el pmi hasta el pms, durante este desplazamiento las válvulas de admisión y expulsión permanecen cerradas. La mezcla aire combustible se comprime aproximadamente en forma adiabática.
3. Encendido.\_ Una vez que el pistón sobrepasa el pms, se produce el encendido de la mezcla por medio de una bujía haciendo que la presión y la temperatura aumenten con rapidez casi a volumen constante. Los gases quemados se expanden y fuerzan al pistón hacia atrás.
4. Escape.\_ Cuando el pistón retorna desde el pmi hasta el pms se abre la válvula de escape para expulsar los gases quemados en la recámara.

El funcionamiento descrito es el de un motor de combustión interna de cuatro tiempos, se puede observar que la fuerza que impulsa los pistones siempre actúa una a la vez por cada pistón.

Existen muchos mecanismos que contribuyen a las pérdidas de energía en un automóvil común. Unas dos terceras partes de la energía disponible se pierde en el motor. Casi 10% de la energía disponible se pierde en el mecanismo del tren de impulsión del automóvil, la fricción representa aproximadamente 6% de la energía disipada, 4% de la energía disponible se utiliza para hacer funcionar bombas de gasolina, aceite, etc. Por último, casi el 14% de la energía disponible se utiliza para impulsar el automóvil.

Debido a la cantidad de pérdidas de diferente índole que aparecen en un vehículo, se puede pensar que para obtener un buen desempeño en el diseño de un motor el consumo de energía debe ser suficiente para superar estas pérdidas.

## ANEXO SIETE

### ACUMULADORES DE PLOMO

Una pila secundaria o acumulador comprende dos placas o electrodos, relativamente inactivos, de metal o de compuestos metálicos sumergidos en un electrolito que actúa sobre las placas solo después de hacer pasar por ellas una corriente, de una placa a la otra. La acción de la corriente hace cambiar las relaciones químicas de los elementos del acumulador y, cuando se lo conecta a un circuito externo, el acumulador hará circular una corriente a través del circuito.

En la práctica se conectan eléctricamente varias placas entre sí para formar una placa positiva única, y se unen varias más para formar una placa negativa única. Una combinación de una placa compuesta positiva y una placa compuesta negativa en un recipiente que contenga un electrolito constituye un acumulador comercial.

Un acumulador no acumula electricidad, acumula energía. Cuando se impele una corriente a través de un acumulador para almacenar en él energía química, el acumulador se carga. La corriente de carga debe hacerse circular en contra de la f.e.m. del acumulador, por lo tanto la f.e.m. de carga debe ser mayor que la f.e.m. del acumulador.

Cuando se conecta un acumulador a un circuito externo, su f.e.m. impele una corriente a través del circuito y a medida que la corriente fluye, la energía química del

acumulador se vuelve a convertir en energía eléctrica. La unidad de capacidad de cualquier acumulador es el amperio-hora y la capacidad de las baterías de acumuladores para uso general está basada comúnmente en un régimen de descarga de ocho horas. Los cinco puntos más importantes para el mantenimiento de un acumulador son:

1. **Electrolito.** \_ Hay que estar seguro que el electrolito está libre de impurezas, y mantener el nivel sobre la parte superior de las placas. El peso específico del electrolito debe mantenerse entre 1,195 y 1,205 para un acumulador cargado.
2. **Acumulador.** \_ Mantener el acumulador limpio y quitar el sedimento cuando ha depositado metal cerca de los bordes inferiores de las placas. Mantener la aislamiento de los acumuladores con respecto a tierra y entre uno y otro.
3. **Carga y Descarga.** \_ Comenzar a cargar inmediatamente después de la descarga. No continúe con la carga si las placas negativas desprenden gas en gran cantidad.
4. **placas.** \_ Vigilar el color de las placas, si empiezan a ponerse más claras hay que remover el sulfato.
5. **Sobrecarga.** \_ Dar una sobrecarga prolongada a la batería, por lo menos una vez por mes. Esta sobrecarga debe continuar a un 60% del régimen de ocho horas hasta que se haya producido durante una hora el desprendimiento de gas de las placas negativas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Croft Terrel, Tratado de Electricidad Práctica, 4<sup>ta</sup> Edición traducida al español, México DF, 1940, pp. 124-298. Editorial Continental S.A. Biblioteca Central de Ingeniería ESPOL.
- Departamento de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Massachussets, Circuitos magnéticos y transformadores, 1<sup>ra</sup> Edición, New York, 1943, pp. 114-121, John Wiley & Sons, Inc. Biblioteca Central de Ingeniería ESPOL.
- Giacosa Dante, Motores Endotérmicos, 3<sup>ra</sup> Edición traducida al español, Barcelona, 1970, pp. 1-20 120-128 158-162 201-230, Editorial Científico-Médica, Biblioteca Central de Ingeniería ESPOL.
- Nasar S.A. y Unnewehr L.E., Electromecánica y Máquinas Eléctricas, 1<sup>ra</sup> Edición traducida al español, México DF, 1982, pp 143-157, Editorial Limusa Biblioteca Central de Ingeniería ESPOL.