



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA



T E S I S

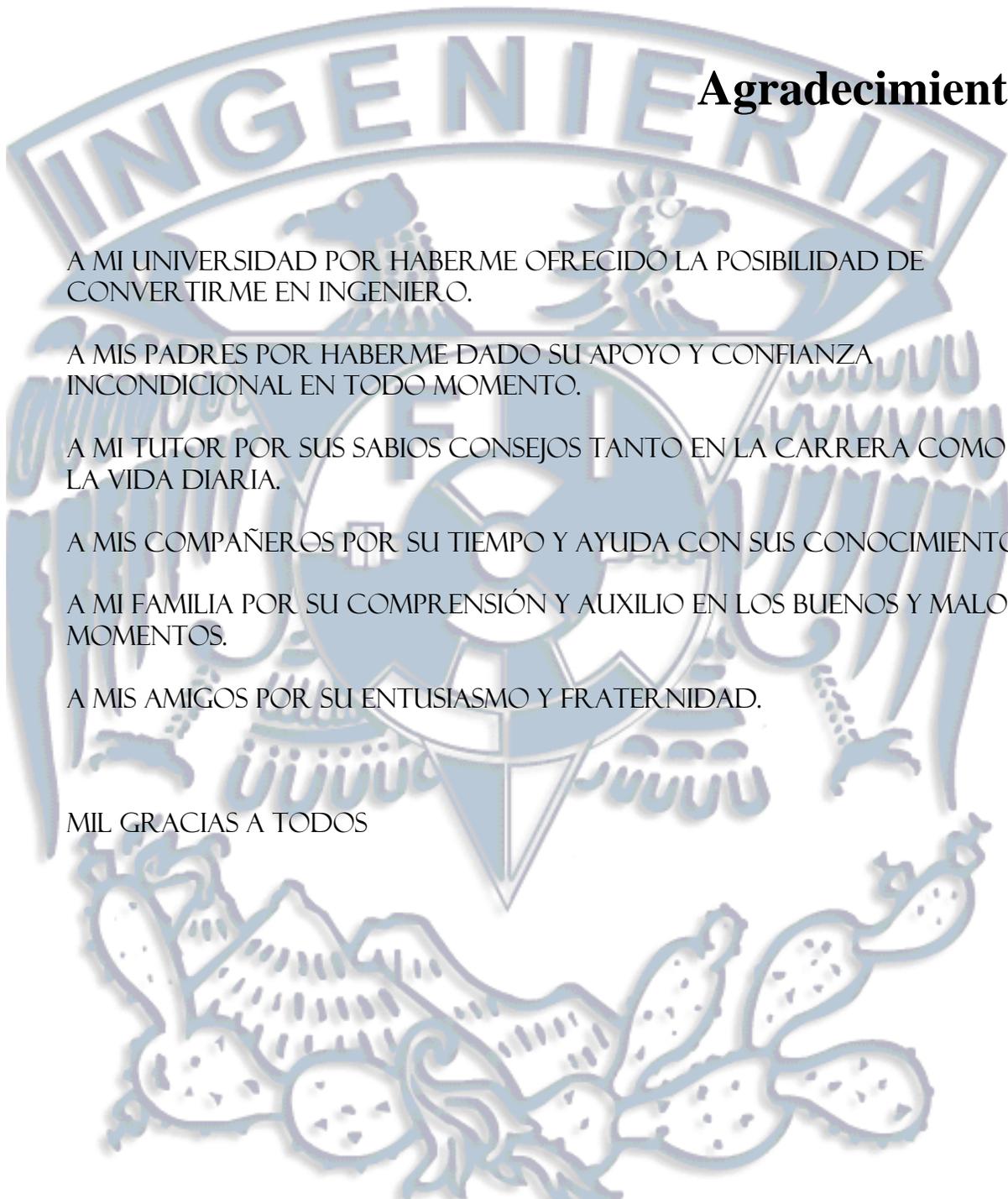
DESARROLLO DE MOTORES DE PASOS
PARA LA AUTOMATIZACION DE
MICROMÁQUINAS HERRAMIENTA

Presenta:
Oscar Pérez Reyes

Para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico
(Área Electrónica para Comunicaciones)

Dirigida por:
Dr. Alberto Caballero Ruiz

Ciudad Universitaria



Agradecimientos

A MI UNIVERSIDAD POR HABERME OFRECIDO LA POSIBILIDAD DE CONVERTIRME EN INGENIERO.

A MIS PADRES POR HABERME DADO SU APOYO Y CONFIANZA INCONDICIONAL EN TODO MOMENTO.

A MI TUTOR POR SUS SABIOS CONSEJOS TANTO EN LA CARRERA COMO EN LA VIDA DIARIA.

A MIS COMPAÑEROS POR SU TIEMPO Y AYUDA CON SUS CONOCIMIENTOS.

A MI FAMILIA POR SU COMPRESIÓN Y AUXILIO EN LOS BUENOS Y MALOS MOMENTOS.

A MIS AMIGOS POR SU ENTUSIASMO Y FRATERNIDAD.

MIL GRACIAS A TODOS

ÍNDICE

<i>Introducción</i>	I - III
Capítulo 1 Antecedentes	1- 15
1.1 Definiciones.....	1
1.2 Actuadores.....	2
1.3 Actuadores y micromáquinas herramienta en el GMM.....	8
1.4 Breve historia de los motores de pasos.....	11
Capítulo 2 Planteamiento del problema	16 - 19
2.1 Objetivo.....	18
2.2 Alcances.....	18
2.3 Metodología.....	19
Capítulo 3 Marco teórico	20 - 27
3.1 Características Estáticas.....	20
3.2 Características Dinámicas.....	21
3.3 Par-velocidad.....	22
3.4 Pérdidas.....	25
Capítulo 4 Desarrollo de motores de pasos	28 - 62
4.1 Desarrollo de motores de imán permanente.....	28
4.1.1 Principio de operación.....	28
4.1.2 Diseño de un motor de pasos de imán permanente.....	30
4.1.3 Fabricación de motores de pasos de imán permanente.....	38
4.2 Desarrollo de u motor de pasos por fuerza de Lorentz.....	48
4.2.1 Principio de operación.....	48
4.2.2 Diseño de un motor de pasos por fuerza de Lorentz.....	49
4.2.3 Fabricación de motores de pasos por fuerza de Lorentz.....	53
Capítulo 5 Pruebas y evaluación de resultados	63 - 83
5.1 Motor de imán permanente.....	63
5.1.1 Prueba par.....	65
5.1.2 Prueba velocidad.....	70
5.1.3 Prueba temperatura.....	76
5.2 Motor de fuerza de Lorentz.....	80
5.3 Motores para micromáquina.....	82

<i>Conclusiones</i>	84
<i>Trabajo a futuro</i>	85
<i>Referencias</i>	86



INTRODUCCION

Actualmente, existen diversas formas de manufacturar elementos de bajas dimensiones (100-200mm), gracias a ello algunos dispositivos de tamaño pequeño son encontrados en la industria biomédica, de electrodomésticos y sensores ópticos entre otros. Por consiguiente el consumo de elementos de estos sistemas se ha incrementado, y al mismo tiempo la demanda de nuevas formas para manufacturarlos ha llevado a crear herramientas, que realicen esta labor, una de ellas son las micromáquinas herramienta las cuales pueden ser la solución para fabricar o ensamblar estos elementos.

El desarrollo de una micromáquina herramienta en el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) contempla la implementación de una maquina que cumpla con necesidades de precisión y resolución, que permitan elaborar piezas mecánicas. Por consiguiente, se ha tomado en cuenta el análisis realizado a un primer prototipo para mejorarlo realizando nuevos diseños.

Ahora bien, si se desea que una micromáquina herramienta funcione de manera autónoma ésta debe utilizar, entre otros elementos, actuadores. Dentro de los distintos actuadores que se emplean, los motores de pasos son los de mayor interés, debido a que éstos son sincronizados con una señal pulsante de reloj, la cual puede ser variada en frecuencia fácilmente para controlar su velocidad. Asimismo, los motores de pasos tienen una precisión adecuada de posicionamiento controlados en lazo abierto y lazo

cerrado. Estas características, junto con la poca disipación de energía comparada con otros actuadores hacen que los motores de pasos sean adecuados para utilizarse en una micromáquina herramienta.

En forma general, esta tesis está compuesta de cuatro capítulos. El primero de ellos expone conceptos generales relacionados con sistemas y actuadores. Posteriormente, se describe la investigación realizada en el GMM, particularmente el desarrollo de micromáquinas herramienta y la forma en cómo se emplean los motores de pasos en esta aplicación. A continuación se mencionan algunos tipos de actuadores para después continuar con la historia de los motores de pasos.

En el capítulo 2 se realiza el planteamiento del problema y se evalúan las ventajas y desventajas que poseen los motores de pasos con respecto a otro tipo de motores eléctricos.

En el capítulo 3 se presenta el marco teórico relacionado con las características de los motores de pasos como pueden ser: pérdidas, características estáticas y dinámicas.

En el capítulo 4 se explica el desarrollo de dos tipos de motores de pasos elaborados en este trabajo. En particular se muestra la metodología seguida para realizar el diseño, la fabricación de las partes de dos motores (motor de imán permanente y motor de fuerza de Lorentz), su ensamble y la manera en cómo fueron conectadas algunas de sus partes.

En el capítulo 5 se evalúa un motor de pasos de imán permanente y se describen las dificultades presentadas en el diseño de un prototipo de motor de fuerza de Lorentz. Además, se explican los procedimientos de las pruebas realizadas a un motor de 4 pasos correspondiente al primer prototipo de micromáquina y a un motor de 28 pasos que corresponde al nuevo diseño propuesto en esta tesis. También, en el final de este capítulo, se describe la implementación de este motor en una micromáquina herramienta.

Por último se presentan las conclusiones sobre las pruebas realizadas a los motores de: 4 pasos y 28 pasos, además se proponen soluciones para un motor de pasos de fuerza de Lorentz y para terminar se proponen mejoras en los diseños descritos en esta tesis, como parte de un trabajo a futuro.

Capítulo 1

Antecedentes

Antes de comenzar con el desarrollo de los motores de pasos es necesario definir algunos conceptos importantes para comprender algunos términos nombrados en los posteriores capítulos. A continuación se presentan varias definiciones, descripción de cierto tipo de actuadores, así como la historia de los motores de pasos.

1.1 Definiciones

Definición de sistema.- Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no necesariamente es físico. El concepto de sistema se aplica a fenómenos abstractos y dinámicos, tales como los que se encuentran en economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos y similares [7].

Definición de actuador.- Es un dispositivo, el cual impone un estado en un sistema, independientemente de la carga aplicada a ellos. Ejemplos de actuadores son los motores los cuales imponen un par, o bombas las cuales imponen tanto una presión o una velocidad de fluido [14].

Definición de transductor.- Dispositivo que convierte una magnitud física en otra distinta.

Definición de sensor.- Dispositivo que detecta variaciones en una magnitud física y las convierte en señales útiles para un sistema de medida o control.

Definición de circuito magnético.- Se denomina circuito magnético a una estructura ferromagnética en la que existen fuerzas magnetomotrices, y en la cual circula de forma canalizada las líneas de fuerza magnética [5].

Definición de reluctancia magnética.- Es la resistencia que posee un circuito magnético para verse influenciado por un campo magnético. Se define como la relación entre la fuerza magnetomotriz y el flujo magnético. El término lo acuñó *Oliver Heaviside* en 1888 [8].

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad \text{Ec. 1-1}$$

Siendo R: reluctancia en un circuito magnético con forma de anillo.
 l: longitud del circuito magnético.
 μ : permeabilidad del material que constituye el núcleo .
 A: área transversal del núcleo.

1.2 Actuadores

En la actualidad existen diversos tipos de actuadores, los que funcionan con principios tales como: electrostáticos, piezoeléctricos, de expansión térmica, electromagnéticos, entre otros.

Los actuadores de tipo electrostático funcionan con la atracción de dos placas opuestamente cargadas. Su aplicación puede darse en micromotores electrostáticos aplicados en sistemas microelectromecánicos (MEMS). Los micromotores electrostáticos cuentan con un rotor central de movimiento libre con platos capacitivos a su alrededor como se muestra en la figura 1-1 [15].

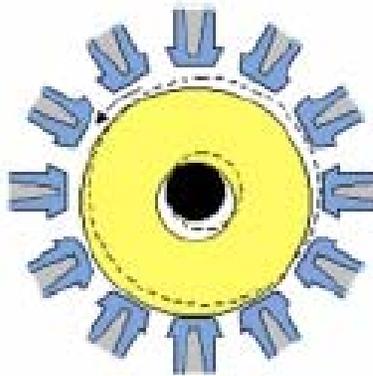


Figura 1-1 Micromotor electrostático [15].

Los actuadores térmicos utilizan la expansión o contracción que ocurre en los materiales cuando se les aplica cambios de temperatura. Como ejemplo de este tipo de actuadores se encuentran el termostato bimetalico, el cual se ilustra en la figura 1-2 [15].

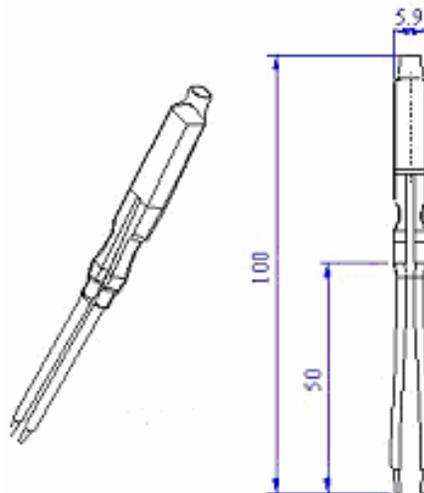


Figura 1-2 Termostato bimetalico en mm [19].

Los actuadores electromagnéticos son realizados con base en el hecho que un conductor acarrea corriente, la cual genera un campo magnético. Si este conductor es un alambre o bobina e interactúa con otro campo magnético externo se producirá una fuerza magnética. Entre los ejemplos de este tipo de actuadores se encuentran los solenoides y los motores eléctricos [15].

Los motores eléctricos, por otro lado tienen diversas formas de producir par. Estas formas de producción son una parte fundamental en la operación de los motores y algunas veces son utilizados para distinguir la diferencia entre varias clases de motores. Existen dos principios básicos para la producción de par en motores eléctricos: por par electromagnético y por par de reluctancia. Todos los motores usan una de estas formas de producción de par o ambas combinaciones [2].

El par electromagnético es el más comúnmente usado en los motores eléctricos, aunque algunos motores usan diferentes métodos de paso de corriente a través del conductor y también usan diversas maneras de producción de densidad de flujo. Esta forma de operar un motor es usada, por ejemplo en motores de inducción, motores síncronos y motores de corriente directa (CD) [2].

El par por reluctancia variable, es usado en motores de pasos, este principio de operación hace que cualquier circuito magnético tienda a moverse en una posición donde su reluctancia es mínima,

entonces la inductancia de la bobina excitada producirá la fuerza magnetomotriz [2].

Ahora bien, de manera general los actuadores eléctricos en forma de motores, constan de una parte estacionaria llamada estator tal como se muestra en la figura 1-3 (1) y una parte rotatoria llamada rotor (2). Típicamente, el estator está en la parte de afuera y el rotor gira dentro de él, aunque también existen máquinas invertidas que se encuentran en pequeños controladores de ventiladores y tienen el rotor afuera [2].

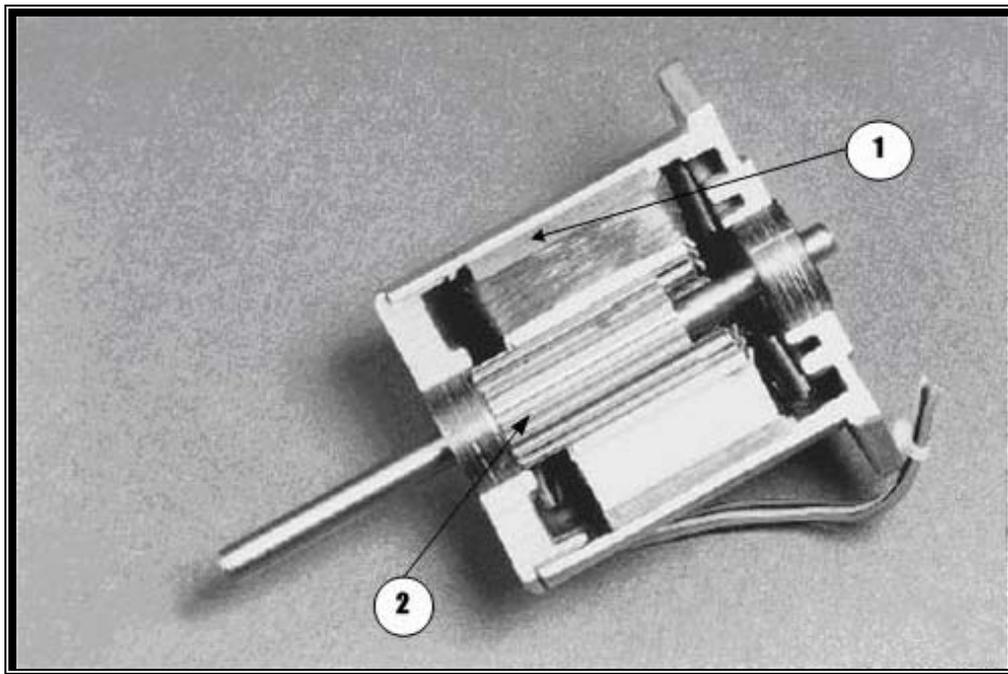


Figura 1-3 Motor de pasos de reluctancia variable [18].

Estos actuadores eléctricos pueden ser clasificados por el tipo de suministro de energía (corriente alterna (CA), CD o de conmutación), por el método de producción de par (electromagnético, reluctancia o ambos), por la velocidad sea fija o variable o por el número de fases. Sin embargo, ninguna de estas clasificaciones es enteramente satisfactoria, ya que la unión de las máquinas y los

sistemas de control electrónico han producido controles de velocidad variable, los cuales no caen fácilmente en ninguno de los grupos principales. No obstante, estos actuadores pueden clasificarse por lo general como se muestra en la figura 1-4, cubriendo la mayoría de los motores comúnmente encontrados [2].

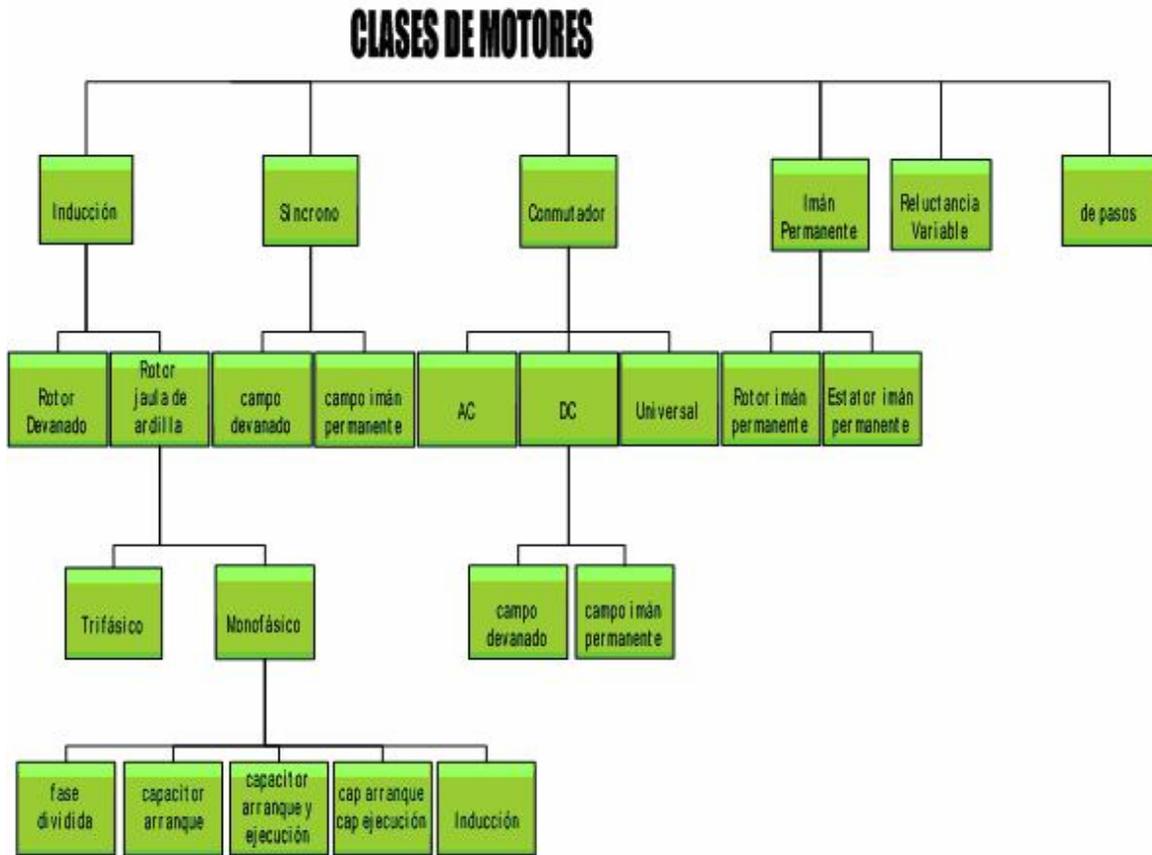


Figura 1-4 Clasificación de los motores [2].

Ahora bien, actualmente existen diversos motores ya sea de CA o CD que son empleados en distintas aplicaciones en la industria, dentro de estos podemos destacar el motor de inducción, el cual es el motor más común en uso doméstico, comercial e industrial. El motor de CA puede clasificarse en: motor de rotor de jaula y motor de rotor embobinado. Otro tipo de motores de CA son los llamados motores

síncronos. El motor síncrono es explotado en aplicaciones donde la velocidad constante es requerida, por ejemplo en la fabricación de equipo textil o papel, en la industria petroquímica, entre otras aplicaciones de bombeo donde la operación es casi continua [2].

Por otro lado, el motor de CD, es el clásico motor con conmutador. La operación y el control del motor de CD son, en principio, muy simples. Modificando cualquiera, la fuerza del campo magnético o la magnitud de la corriente de armadura, variará directamente el par. De esta forma, también cambiando la dirección de cualquiera se alterará la dirección del par. Este motor es común en aplicaciones de tracción, molinos de rodamiento de acero, devanadores, tornos y grúas. A su vez existen también motores universales, los cuales operan en cualquier fuente ya sea de CD o CA unifásica [2].

Otro tipo de motores eléctricos son los servomotores eléctricos. Un servomotor de tipo eléctrico o también llamado servo es un actuador similar al motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. Está conformado comúnmente por lo general por un motor y un circuito de control. Los servos se utilizan frecuentemente en sistemas de radio control y en robótica, pero su uso no está limitado a estas aplicaciones [16]. Hay tres tipos de servomotores eléctricos: Servomotores de CD, Servomotores de CA y Servomotores de imanes permanentes o motores sin escobillas, los más utilizados son los motores de CD y los motores sin escobillas con un codificador de realimentación. Con

una computadora se puede leer la posición del motor y controlar el voltaje aplicado al motor. Por su parte los servomotores de CA son básicamente motores de inducción bifásicos que tienen dos bobinas de campo en el estator, éstos corren a una velocidad ligeramente debajo de la velocidad síncrona y es esencialmente un motor de velocidad constante. Los servomotores son más rápidos moviéndose punto a punto y son mejores acelerando maquinaria muy pesada [17].

1.3 Actuadores y micromáquinas herramienta en el GMM

El grupo de micromecánica y mecatrónica del CCADET se ha dado a la tarea de adentrarse en el estudio de la tecnología de microequipo con el propósito de desarrollar tecnología propia. Parte de esta investigación contempla análisis y fabricación de máquinas herramientas, actuadores de tipo neumático, eléctrico, mecánicos, dentro de los cuales existen distintos prototipos de motores eléctricos, particularmente motores de pasos de diferentes tamaños como se muestra en la figura 1-5.

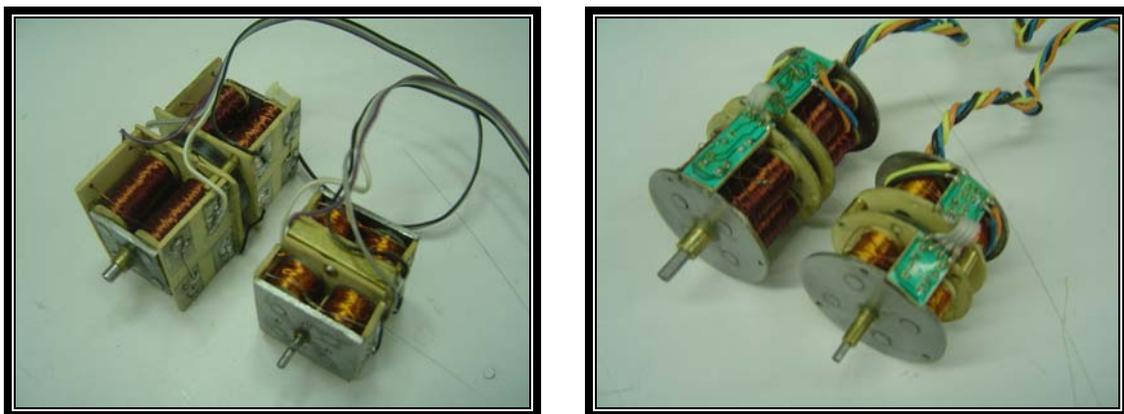


Figura 1-5 Prototipos anteriores de motores de pasos de doble estator [3].

Por otro lado, en este momento se han investigado y elaborado diseños de piezas, sistemas mecánicos, sistemas de control y actuadores para confeccionar un tipo de máquina herramienta. A continuación se describe uno de los prototipos realizados en el GMM [1].

El primer prototipo realizado en el GMM se creó para realizar diversas funciones, tales como: torneado, fresado y barrenado. Este prototipo cambia de tipo de función cuando se modifica la configuración entre la pieza de trabajo y la herramienta. Su diseño fue elaborado con el criterio de bajo costo y posibilidad de escalamiento descendente, cuyo fundamento reside en que máquinas grandes hacen piezas grandes y máquinas pequeñas hacen piezas pequeñas. Este primer prototipo se muestra en la figura 1-6 [1].

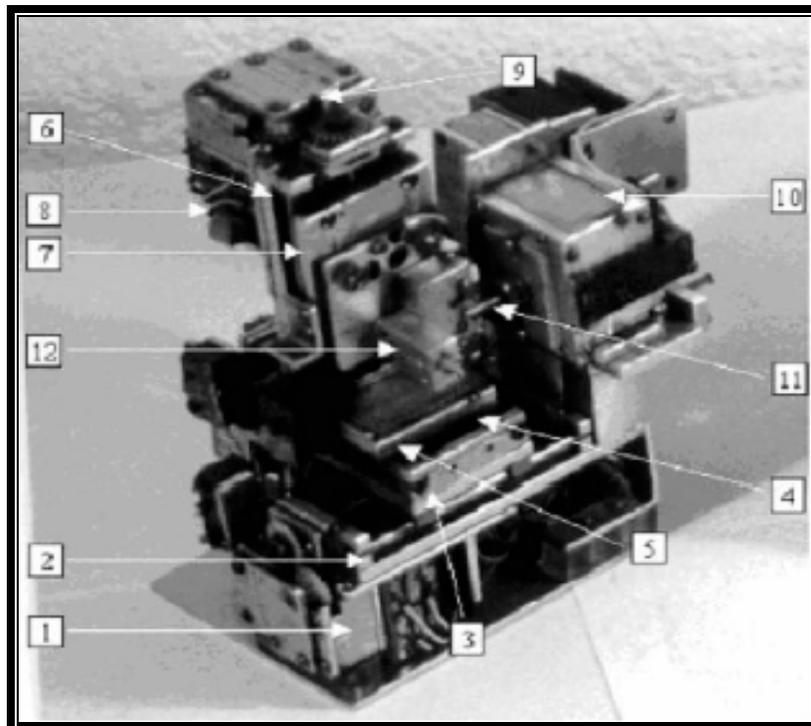


Figura 1-6 Primer Prototipo de Micromáquina herramienta [1].

En la figura 1-6 en el punto (1), se localiza la base de la micromáquina. Las guías de ésta, se encuentran localizadas en los puntos (2),(4),(6), las cuales tienen tres carros en los puntos (3),(5),(7). Estas guías son instaladas en los carros con el fin de suministrar movimientos de traslación a lo largo de sus respectivos ejes X, Y, Z. Asimismo, éstas fueron hechas de barras redondas, lo cual simplifica la producción, el ensamble y el escalamiento de las herramientas de la máquina. La caja de la flecha con la flecha se muestran en los puntos (10), (11), éstas son también instalados sobre una base. La flecha tiene un sujetador para sostener la pieza de trabajo. Además, esta micromáquina herramienta tiene otro sujetador como se muestra en el punto (12), con un cortador y posee dos pines de metal paralelos para medición del diámetro de la pieza torneada. Para fresado y barrenado, se instala un sujetador especial para manipular la pieza de trabajo en el carro del punto (7). Los controladores para los carros y para la flecha usan motores de paso como se ilustra en el punto (8).

Los motores de pasos empleados en esta micromáquina se muestran en la figura 1-7. Este motor de pasos tienen un estator, el cual está unido a una caja de engranes. Las principales funciones que deben cubrir estos motores es proporcionar movimiento traslacional a los carros y movimiento rotacional al husillo.

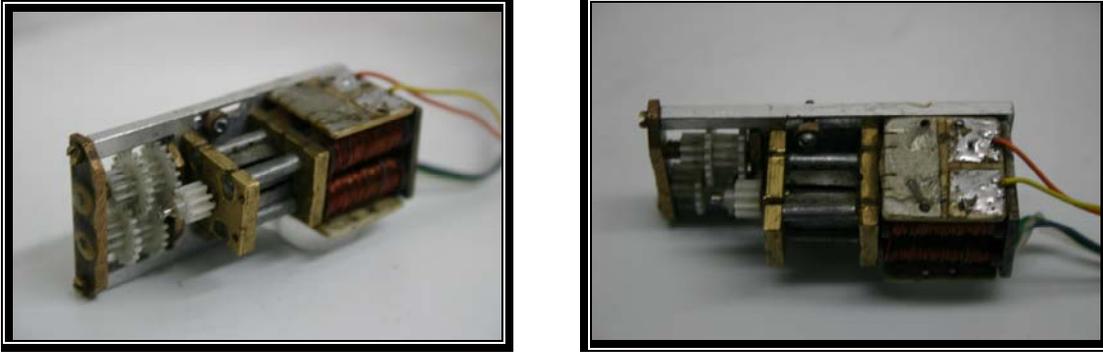


Figura 1-7 Motores utilizados en el primer prototipo de micromáquina herramienta.

Asimismo, éste motor tiene dos polos en el rotor y dos fases en el estator, que le permite dar 90° en cada paso con 4 pasos por revolución.

El sistema de control de este primer prototipo de micromáquina fue diseñado para trabajar en una computadora personal y para minimizar el equipo externo. Este contiene sólo dos buffers de 8 bits y un amplificador de corriente directa de 16 canales. El puerto de la micromáquina herramienta contiene conectores, y sensores de contacto que detectan niveles de voltaje, los cuales son compatibles con el puerto paralelo de la PC [1].

1.4 Breve historia de los motores de pasos

Los motores de pasos han sido utilizados desde los inicios del siglo XX, la primera aparición de estos en un escrito fue en la edición de la *JIEE* [9] que publicó en 1927 un artículo: “*The application of electricity in warships*” y una parte de este artículo describe un motor de pasos trifásico de reluctancia variable del tipo antes mencionado el cual fue usado para mover el control remoto del indicador de dirección de los tubos del torpedo y las armas en los barcos de

guerra británicos. Este sistema contiene un interruptor mecánico rotatorio para conmutar la corriente de excitación [4].

De acuerdo con un artículo [10] en *IEE Transaction on Automatic Control*, los motores de pasos fueron empleados tardíamente en la marina de los Estados Unidos con un propósito similar. Aunque las aplicaciones prácticas de motores de pasos modernos ocurrieron en los años 20, los prototipos de los motores de reluctancia variable ya existían anteriormente [4].

Durante los años de 1920 y 1929 se suscitaron dos inventos significativos en Gran Bretaña, que se comentan a continuación:

(I)

Estructura para minimizar el ángulo de pasos. En el Reino Unido [11] en 1919 *C.L.Walker*, ingeniero civil en *Aberdeen*, Escocia, creó una patente de una estructura de motor de pasos la cual puede moverse en pequeños ángulos de paso. Esta estructura contiene un grupo de dientes pequeños, el número de dientes en el rotor es de 32 como se muestra en la figura 1-8. Cuando la fase I es excitada y el flujo magnético ocurre a lo largo de su ruta, los grupos de dientes en esa fase van en alineamiento con algunos de los dientes del estator [4].

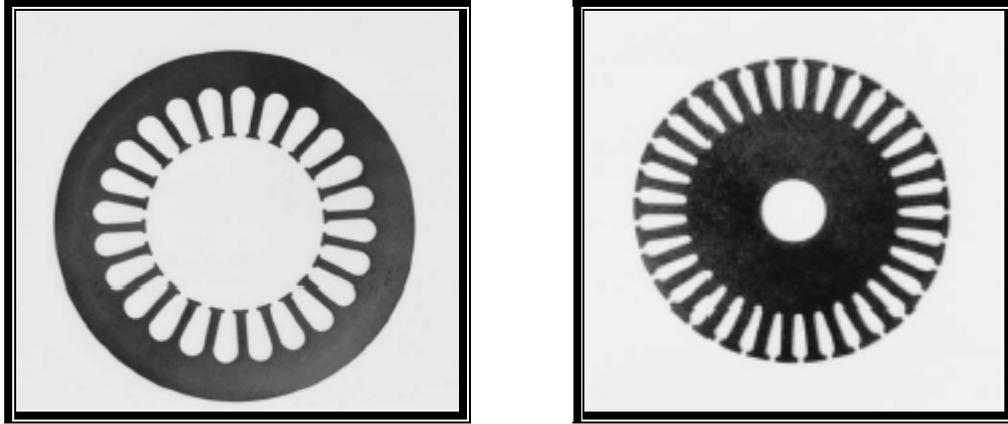


Figura 1-8 Estructura de un estator y un rotor correspondientemente con la implementación de un mayor numero de dientes [18].

En el arreglo reportado en este trabajo, los dientes del estator y el rotor en las fases II y III están fuera de alineamiento por $1/3$ de inclinación de dientes en direcciones opuestas. Cuando la corriente de excitación es conmutada desde la fase I a la fase II, el rotor girará en sentido de las manecillas del reloj a través de un ángulo de paso de $(360 / 32) / 3 = 3.75^\circ$ en este caso. Por lo tanto si la corriente de excitación es conmutada a la fase III, la revolución será en contra de las manecillas del reloj en el mismo ángulo de paso. *Walter* presentó en la especificación de su patente un plan para la construcción de un motor lineal. No fue, sino hasta el año de 1950 cuando los modernos motores de pasos empleaban el principio de esta invención y empezaban a comercializarse [4].

(II)

Producción de un gran par a partir de una estructura de emparedado. *C.B.Chicken* y *J.H.Thain* en *Newcastle* en 1920 obtuvo una patente estadounidense por la invención de un motor de pasos que producía un gran par por unidad de volumen del rotor. La construcción longitudinal de esta máquina es mostrada en el artículo

[12], junto con la característica del rotor de hierro dulce que pasa entre los dos núcleos electromagnéticos opuestos [4].

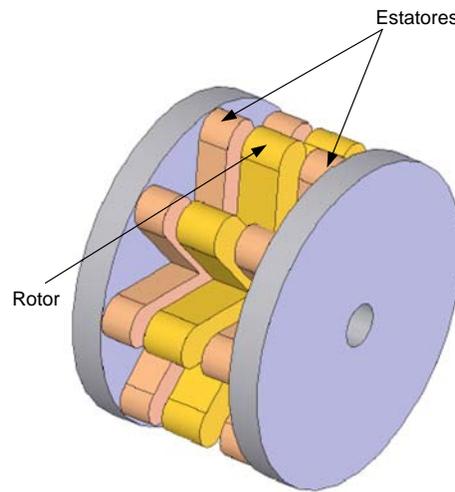


Figura 1-9 Estructura de emparedado en los motores de pasos.

No obstante este no fue utilizado hasta el año de 1970. Un motor de pasos fue usado con este principio como un motor de pasos de potencia en una máquina de control numérico hecho por *FAPUC Ltd*, un fabricante de Japón [4].

Los motores de pasos de tipo electromagnético que usan imanes permanentes así como los motores de reluctancia variable habían ya aparecido en los años 60. El primero de ellos es el más simple, ahora referido como motor de imán permanente. El estator de este tipo de motores tiene polos salientes, en los cuales el rotor es un imán permanente cilíndrico similar al de un motor síncrono normal. El segundo es un motor híbrido con un imán permanente cilíndrico polarizado axialmente que está cubierto por núcleos dentados de acero dulce. Esta máquina trabaja de la misma forma que un motor de pasos por los principios combinados del motor de imán permanente y el motor de reluctancia variable, este fue

inventado por *K.M.Feiertag* y *J.T.Donhoo* de la compañía *General Electric*, y patentado en 1952 en Estados Unidos[13]. Este motor fue manufacturado inicialmente por la compañía *General Electric* y compañía *Superior Electric* como un motor síncrono de velocidad baja para funcionar a distintas velocidades tan bajas como de 100r.p.m. y aplicado a 60Hz. Esta máquina tiene una única construcción conteniendo dos imanes en su estator [4].

El tamaño de los motores de pasos ha venido desde aquellos días, en la misma forma que los tamaños de los servomotores, por ejemplo: los tipos 08, 11, 15, 18, 20, 23 y 34, donde dichos números especifican el diámetro de los motores en pulgadas respectivamente [4].

Desde el inicio de los años 60, los fabricantes de computadoras tomaron nota de la posibilidad de uso de los motores de pasos como actuadores en dispositivos de terminales y promovidos al desarrollo confiable de motores de alto funcionamiento. *J.P. Pawletko* tomó la iniciativa e introdujo los motores de pasos con los productos de la IBM en la mitad de los años 60 [4].

En la última parte de los años 50, la investigación científica en motores de pasos inició en las universidades y laboratorios de la industria de naciones avanzadas. Los resultados de las investigaciones fueron publicados en periódicos técnicos y revistas [4].

Capítulo 2 Planteamiento del problema

En la historia, el hombre siempre ha buscado la manera de elaborar distintos elementos con ayuda de herramientas. Sin embargo, con el paso del tiempo hubo la necesidad de fabricar piezas de una manera rápida y confiable. Por este motivo, fueron creadas herramientas que operaran sin intervención de la mano del hombre, un ejemplo de ellas es la máquina herramienta.

En general la máquina herramienta puede ser operada sin intervención de la mano del hombre, ya que posee actuadores que son controlados por medio de circuitos electrónicos. Por su parte, el GMM se ha ocupado en gran parte al estudio de este tipo de máquinas, así como al desarrollo de actuadores para la operación autónoma de las mismas. Estos actuadores deben proporcionar movimientos precisos a los carros de los ejes X, Y y Z de la micromáquina, asimismo deben tener la fuerza suficiente para que puedan hacer girar la transmisión de la máquina.

El tipo de motores que pueden cubrir con los requerimientos de par y movimientos precisos, son los servomotores eléctricos y los motores a pasos. En la siguiente tabla se exponen las características de estos dos motores.

Características	Servomotores	Motores de pasos
Par alto, Baja Velocidad	Excelente.	Bueno.
Par alto y velocidad alta	Malo.	Malo.
Bajo, Rápidos movimientos repetitivos	Excelente.	Bueno.
Aplicaciones de Posicionamiento	Excelente.	Excelente.
Aplicaciones en ambiente azaroso	Bueno.	Excelente.
Velocidad baja, suavidad alta	Bueno.	Excelente.
Método de control	Lazo cerrado.	Lazo abierto y cerrado.

Tabla 2-1 Comparativa servomotores vs motores de pasos.

Como se muestra en la tabla 2.1, los servomotores son excelentes en condiciones de par alto y baja velocidad o en rápidos movimientos repetitivos. Por su parte los motores de pasos sobresalen en ambientes azarosos y en sus métodos de control. Sin embargo, debido a la facilidad para montar a los motores de pasos en sistemas no realimentados fue que el GMM decidió utilizarlos en micromáquinas herramienta.

Los motores de pasos elaborados hasta ahora en el GMM han logrado alcanzar un rendimiento modesto en cuanto a resolución, par o trabajando a altas temperaturas en sus arrollamientos. Por ejemplo en cuanto a resolución se refiere, el motor de pasos utilizado en la anterior micromáquina (éste es descrito en el capítulo 1) solo puede dar 4 pasos por revolución, lo cual implica que para que un carro de la micromáquina tenga un desplazamiento de 8 pasos, este motor tiene que dar 2 revoluciones mientras que un motor de 14

pasos puede dar este desplazamiento sin tener que dar una revolución.

Por lo anterior, este trabajo plantea rediseñar los motores de pasos con la finalidad de elaborar actuadores con mayor resolución para las aplicaciones del GMM. Una vez que se realicen pruebas a estos nuevos motores, se implementaran en una micromáquina herramienta.

2.1 Objetivo

Desarrollar nuevos motores de pasos para la automatización de una micromáquina herramienta.

2.2 Alcances

Esta tesis plantea el desarrollo de dos tipos de motores de pasos como alternativas para la automatización de micromáquinas herramientas, además de evaluar los dos principios de funcionamiento empleados en el GMM para hacer girar éste tipo de actuadores. El primero motor estará basado en el principio de fuerza electromagnética con rotor de imán permanente; mientras que el segundo motor estará basado en el principio de fuerza de Lorentz, empleando también un rotor de imán permanente. Los motores de pasos desarrollados deben tener las siguientes características:

- Una resolución mayor a los anteriores prototipos de motor (< cuatro pasos por revolución).
- Un consumo de corriente menor a 1A.
- Uso de dos estatores en un mismo motor (se explicará con mas detalle en el siguiente capítulo).
- Un par superior a los prototipos de motor anteriores.

- Dimensiones cercanas a las del prototipo de motores desarrollados anteriormente en el GMM (tal como se muestra en el capítulo anterior).

Finalmente, el motor con mejor desempeño será implementado en una micromáquina herramienta.

2.3 Metodología

Para el desarrollo de un motor de pasos para la automatización de una micromáquina herramienta planteamos algunas actividades a seguir:

- 1.- Estudiar los distintos tipos de motores de pasos, su funcionamiento, evaluar motores de pasos ya construidos y como son aplicados éstos en la automatización.
- 2.- Diseñar con ayuda de un programa CAD el primer prototipo de motor.
- 3.- Manejar herramientas del taller de Micromecánica y Mecatrónica para manufacturar nuestro motor.
- 4.- Manufacturar las piezas del motor de pasos de imán permanente.
- 5.- Ensamblar las piezas del motor de doble estator.
- 6.- Diseñar con ayuda de un programa CAD el segundo prototipo de motor.
- 7.- Manufacturar las piezas del motor de pasos de fuerza de Lorentz.
- 8.- Ensamblar las piezas del motor de fuerza de Lorentz.
- 9.- Realizar pruebas de par, velocidad y temperatura para ver el comportamiento de los motores.
- 10.- Analizar resultados de las pruebas obtenidas.
11. Implementar el mejor motor de pasos en una micromáquina herramienta.
12. Dar conclusiones sobre el trabajo realizado.

Capítulo 3

Marco Teórico

A continuación se explicarán algunos conceptos teóricos con la finalidad de comprender mejor el funcionamiento de los motores de pasos.

3.1 Características Estáticas

Éstas se refieren a las características analizadas cuando el motor está en funcionamiento estático o cuando el rotor del motor no presenta movimiento.

Par de retención.- El par de retención (*Holding Torque*) del embobinado de un motor de pasos es el valor pico de la curva par-velocidad cuando la corriente máxima permitida está fluyendo a través de un arrollamiento del motor. Si se procura aplicar un par externo que supere al par de retención en el rotor del motor y el voltaje se mantiene en el embobinado, entonces la flecha del motor girará [4].

Par residual.- El par residual en un motor de imán permanente o híbrido es frecuentemente referido en inglés como (*Cogging Torque/Detent Torque*), porque un observador cualquiera frecuentemente podría decir que hay un mecanismo de retención de alguna clase dentro del motor. Éste es definido como el máximo par estático que puede ser aplicado a la flecha de un motor sin excitación y sin causar rotación continua. Los motores más

comúnmente diseñados, producen un par residual que varía sinusoidalmente con el ángulo del rotor, con una posición de equilibrio a cada paso y una amplitud de aproximadamente 10% de la razón del par residual del motor (Holding Torque)[4].

En los motores de pasos de reluctancia variable, la magnetización residual en sus circuitos magnéticos puede conducir a un par residual pequeño, sin embargo en motores de imán permanente o híbrido, la combinación de la geometría del polo y el rotor de imán permanente puede conducir a un par significativo sin suministrar potencia [4].

3.2 Características Dinámicas

Las características dinámicas analizan el funcionamiento de un motor de pasos cuando empieza a girar.

Par de arranque.- Este es, a veces, definido girando a velocidades altas como par límite (*Pull-out Torque*). El par de arranque es el par friccional máximo que puede sobrellevar una carga que rota antes que ésta sea sacada de paso debido a la fricción. Algunos motores definen en sus hojas de datos un segundo par en sus figuras, el *Par de ajuste a sincronismo (Pull-in Torque)*. Este es el par máximo friccional que el motor puede sobrellevar para acelerar o detener una carga a una velocidad de sincronía [18].

En la práctica, existe siempre fricción después de mover la posición de equilibrio a un paso, el rotor es susceptible a oscilar

brevemente cerca de la nueva posición de equilibrio. La trayectoria resultante puede parecerse a la mostrada en la figura 3-2 [18].

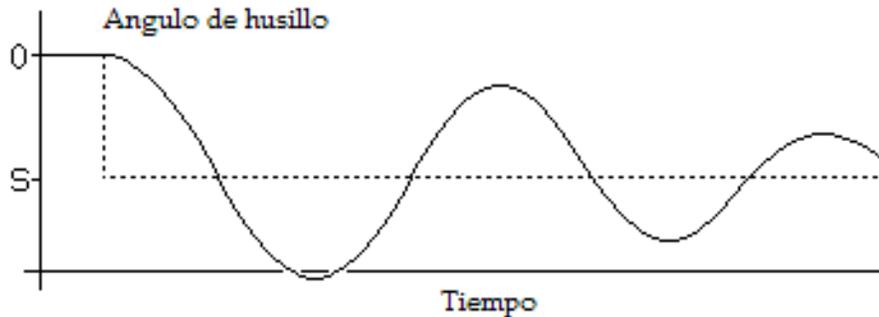


Figura 3-1 gráfica posición angular-tiempo [18].

Aquí, la trayectoria de la posición de equilibrio se muestra con una línea punteada, mientras la curva sólida marca la trayectoria que sigue el rotor del motor [18].

La exactitud en posicionamiento es un factor importante que determina la calidad de un motor de pasos. Los motores de pasos son diseñados de modo que giran a través de un predeterminado ángulo de pasos en respuesta a una señal de pulso (o control de pulsos) y va a una posición de precisión restante. Cuando la exactitud de un motor sin carga depende de la exactitud física del rotor y el estator, el error de posicionamiento no es acumulativo [18].

3.3 Par-velocidad

Una importante consideración en el diseño de controladores de motores de pasos a alta velocidad es el efecto de la inductancia de los embobinados del motor. La inductancia del embobinado del

motor determina el tiempo de asenso y decaimiento de la corriente en los embobinados. En una gráfica de corriente - tiempo podríamos esperar que la forma sea una onda cuadrada, sin embargo las fuerzas de origen inductivo son de forma asintótica como muestra la figura 3-3 [5].

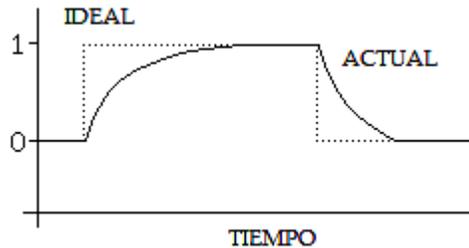


Figura 3-2 grafica corriente-tiempo [18].

Los detalles de la función corriente contra tiempo a través de cada embobinado dependen tanto de los circuitos de control, como de los mismos embobinados del motor. Esto es muy común para las constantes de tiempo de estas exponenciales ya que en un embobinado del motor circula una corriente descrita por:

$$i = (V / R) (1 - e^{-(Rt/L)}) \quad \text{Ec. 3-1}$$

siendo V: voltaje

R: resistencia

t: tiempo

L: inductancia del circuito

La constante de tiempo (R / L) descrita por la resistencia e inductancia del embobinado rige los tiempos observados en la figura 3-3 y estos pueden decrecer o aumentar dependiendo de esta relación [5].

Entonces, un motor que posee una alta resistencia tendrá pérdidas en potencia debido a la disipación de ésta en forma de calor en sus arrollamientos. A altas velocidades, el efecto de la inductancia de los embobinados del motor tiende a reducir el par disponible, tal como muestra la figura 3-4 [18].

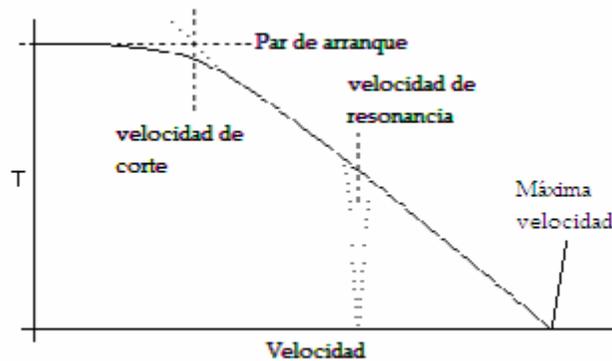


Figura 3-3 Gráfica par-velocidad [18].

La velocidad máxima del motor es definida como la velocidad en la cual el par disponible cae a cero. La velocidad de corte (*cutoff speed*) es la velocidad cerca de la cual el par comienza a decaer. Cuando el motor está operando bajo su velocidad de corte, el tiempo de ascenso y descenso de la corriente a través de los embobinados del motor ocupa una fracción insignificante de paso, mientras que la duración de paso es comparable a la suma de tiempos de ascenso y descenso [18].

Similarmente, la velocidad de resonancia depende del momento de inercia del sistema rotante entero, no sólo del rotor del motor, y el grado en el cual el par cae en resonancia, sino de la presencia de amortiguamiento mecánico y de la naturaleza del sistema de control [18].

3.4 Pérdidas

La conversión de energía de una máquina está relacionada por su forma de emplearse. Por ejemplo un motor es energizado con cierto voltaje en sus terminales y como resultado produce trabajo mecánico, de esta manera se puede decir que la conversión de energía es de eléctrica a mecánica, porque se está transformando la energía eléctrica en movimiento por medio de la rotación de una flecha. De igual forma, si se aplica energía mecánica a la flecha del motor entonces se obtendrá un voltaje en sus terminales. Una máquina que trabaja de esta forma se denomina generador [6].

Si la potencia mecánica que corresponde al producto es:

$$P_m = T\omega \quad \text{Ec. 3-2}$$

siendo T : el par de la flecha.

ω : la velocidad angular de la flecha.

P_m : la potencia mecánica.

y la potencia eléctrica es:

$$P_e = VI \quad \text{Ec. 3-3}$$

siendo V : voltaje en las terminales de la motor

I : las corrientes que circula en los arrollamientos

P_e : la potencia eléctrica.

entonces podría decirse que:

$$P_m = P_e \quad \text{Ec. 3-4}$$

$$T\omega = VI \quad \text{Ec. 3-5}$$

Sin embargo, no es del todo cierto debido a que durante la conversión de energía eléctrica a mecánica o viceversa existen pérdidas de origen eléctrico, magnético, mecánico, térmico o rotacional como se muestra en la figura 3-5 [6].

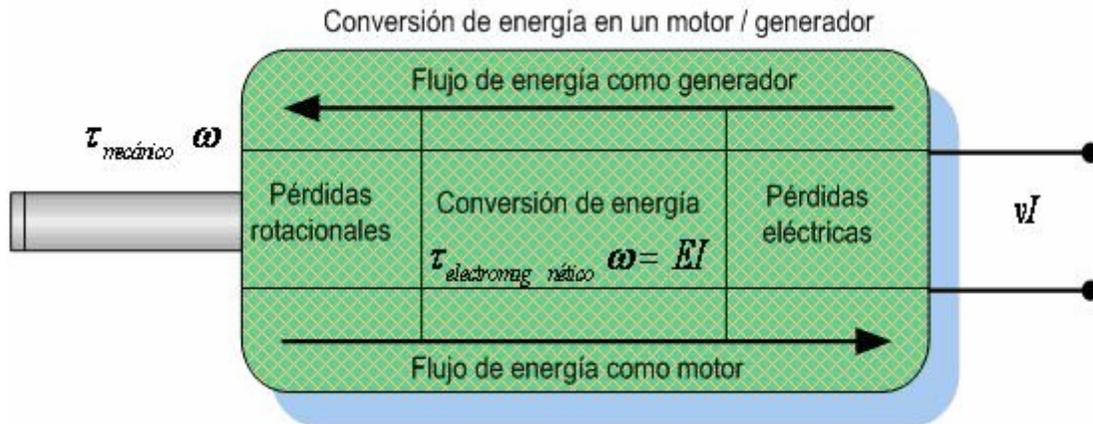


Figura 3-4 Diagrama de conversión de energía [6].

Pérdida eléctrica.- Se presenta una pequeña pérdida de voltaje originada por una resistencia en los circuitos de los estatores que se distribuye a lo largo de todo el hilo conductor. En la teoría puede denominarse resistencia de arrollamiento o resistencia del estator [6].

Pérdida mecánica.- Las pérdidas mecánicas se deben principalmente a dos factores: la fricción y la rotación. La fricción se presenta en los apoyos de la flecha. En cambio las pérdidas rotacionales son función de la velocidad, la masa y la geometría [6].

Pérdida magnética.- Las pérdidas magnéticas también se manifiestan por un par en oposición al sentido de rotación, y tienen dos componentes que son la de histéresis y las corrientes parásitas [6].

La histéresis magnética es la propiedad de los materiales ferromagnéticos de retener parte del flujo con que fueron magnetizados. Las corrientes parásitas, también llamadas corrientes de remolino o corriente de Foucault, se deben a que el material ferromagnético es además conductor de la electricidad. Esto ocasiona que se organicen circuitos en forma de espirales cerradas, alrededor del flujo. Al moverse estos circuitos junto con el núcleo, varía el flujo en ellos, se inducen fuerzas electromotrices y circulan corrientes, formando entre todos un solenoide con su flujo central, que al ser atraído por el flujo polar se forma el par debido a corrientes parásitas [6].

Pérdida por calor.- Las pérdidas por calor son originadas en los devanados del motor; es ahí donde la corriente circula a través de los hilos magnéticos con una resistencia dada, debido a esto algunos arrollamientos producen pérdidas en forma de calor en los arrollamientos [6].

En resumen se tendrán motores de pasos con cierta capacidad de entrada (eléctrica) y de salida (mecánica). Ahora bien, considerando que las pérdidas antes mencionadas actúan sobre el motor, entonces como consecuencia toda su potencia de entrada no se reflejará íntegramente en su salida.

Capítulo 4

Desarrollo de motores de pasos

A continuación se expondrá el diseño y fabricación de dos motores de pasos. Primero se describirá el desarrollo de un motor de pasos de imán permanente. Segundo se describirá el desarrollo de un motor de pasos de fuerza de Lorentz.

4.1 Desarrollo de motores de imán permanente

El desarrollo de un motor de pasos puede dividirse en diseño y fabricación. Sin embargo, antes de exponer el diseño y fabricación de un motor de imán permanente, se explicará el principio de funcionamiento del mismo.

4.1.1 Principio de operación

Un motor de pasos de imán permanente está formado, como lo indica su nombre, por un rotor de imán y un estator donde se encuentran los arrollamientos.

Los arrollamientos son bobinas por las cuales circula una corriente que induce un flujo magnético en núcleos de material ferromagnético (ubicados en el interior de las bobinas). Cuando esto ocurre, en los extremos de estos núcleos se tienen polaridades de norte o sur, según el sentido de las corrientes en los arrollamientos.

Estos polos norte y sur inducidos en los núcleos son aprovechados para interactuar con los polos del motor.

Generalmente, un motor de pasos puede estar formado por dos fases, las cuales son energizadas con una fuente externa para proporcionar condiciones de polarización en el estator. Como respuesta a esa polarización, los imanes del motor, intentan alinear sus polos norte o sur con los núcleos del estator de tal manera que éstos últimos atraen al rotor a una posición fija, tal como se ilustra en la figura 4-1a.

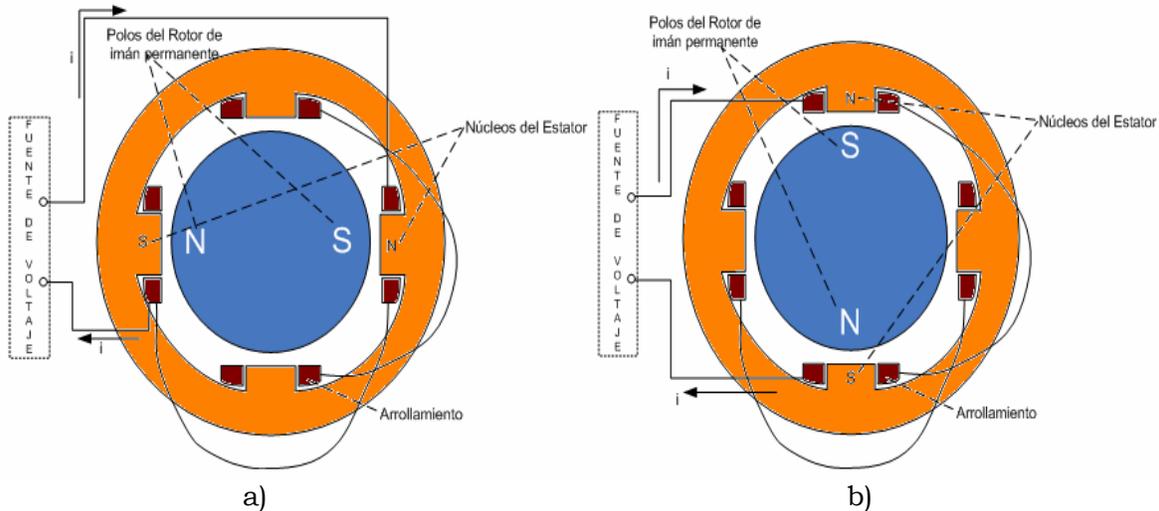


Figura 4-1 Principio de operación del motor de imán permanente.

Una vez que el rotor gira a esa posición, éste permanece ahí hasta que cambie la polaridad en las fases del estator. Cuando esto sucede, el rotor cambia a una nueva posición atraído por los núcleos en el estator (figura 4-1b). Una vez más el rotor permanece en esta posición hasta el momento que vuelva a cambiar la polaridad en las fases del estator. Si este proceso es llevado de manera continua se observará que el rotor gira.

4.1.2 Diseño de un motor de pasos de imán permanente

Se comenzó un nuevo diseño de motor de pasos guardando similitudes con anteriores motores de pasos. Por ejemplo, un nuevo motor de imán permanente debe conservar dimensiones parecidas a los motores elaborados en el GMM, así como el uso de 2 fases en el estator para su manejo, además, como parte adicional este diseño debe incrementar el par y la resolución.

El motor de pasos de la micromáquina anterior fue diseñado para utilizar un estator con 4 bobinas y un cilindro como rotor tal como se ilustra en la figura 4-2a. Para este nuevo diseño la estructura del motor cambia, ya que se hace uso de un disco con imanes alojados en el interior del mismo para formar el rotor. La estructura del rotor del diseño anterior y del nuevo diseño son mostrados en la figura 4-2a y 4-2b respectivamente.

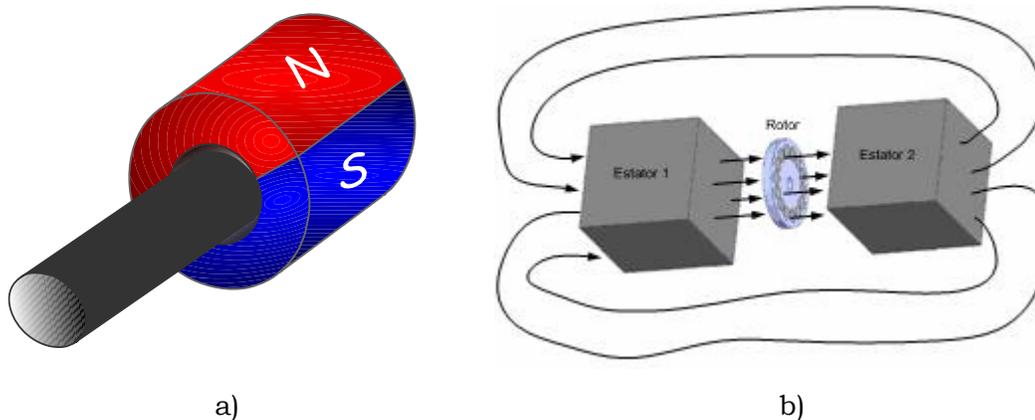


Figura 4-2 a) Rotor en forma de cilindro de un motor de doble estator.

b) Rotor en forma de rueda de un motor de doble estator.

Como se muestra en la figura 4-2b este nuevo diseño considera 2 estatores con un rotor en forma de disco. Los estatores interactúan

con el rotor de manera axial, es decir las líneas de flujo magnético atraviesan las caras de los imanes en el disco para cerrar el circuito magnético. Esta modificación se realizó debido a que usando dos estatores en lugar de uno, se puede incrementar el par del motor.

Por otro lado, este diseño de motor propone también, mejorar su resolución de la siguiente manera.

Los motores de pasos giran hasta un ángulo de paso fijo por cada pulso. Esto quiere decir que si se disminuye el ángulo de paso se incrementa la resolución de posicionamiento. Además, el número de pasos por revolución, los cuales se denotan por S y el ángulo de paso θ_S se relaciona como se indica a continuación:

$$\theta_S = 360/S \quad \text{Ec . 4-1}$$

S está relacionado con el número de imanes o polos en el rotor (N_r) y con el número de fases (m), en el caso de motores de imán permanente e híbridos, como lo indica la siguiente expresión:

$$S = mN_r \quad \text{Ec. 4-2}$$

Por lo tanto, para incrementar la resolución de un motor de pasos de imán permanente se debe incrementar el número de imanes en el rotor o cambiar el número de fases. Los motores de pasos realizados en el GMM solamente tienen dos fases para controlar el motor las cuales, no puede alterarse sin tener que

cambiar el sistema de control, por lo tanto se eligió incrementar la resolución incrementando el número de imanes.

Una vez considerada esta opción, se colocó la mayor cantidad de imanes que pudiera alojar el rotor con el propósito de aprovechar mejor esta nueva configuración, esta modificación se muestra en la figura 4-3. Así pues, el número máximo de imanes que pudieron colocarse en el rotor fue 14.



Figura 4-3 Incrementando el número de imanes en el rotor iniciando con un número de 6 imanes.

Entonces, el número de imanes en el rotor de este nuevo diseño es de $Nr = 14$, con un número de fases de $m = 2$. Según la Ec. 4-2, se tiene que $S = 28$ y también por la Ec. 4-1 se obtiene que el ángulo de pasos es de $\theta_S = 12.86^\circ$. Esto quiere decir que el ángulo mínimo que puede acceder este motor es de 12.86° sin recurrir a una técnica de micropaso o medio paso, o dicho de otra forma, el rotor tiene que avanzar 28 pasos para dar una revolución completa. Asimismo, el motor de pasos de un estator de 4 pasos tiene un número de polos en el rotor igual a $Nr = 2$ y de fases igual a $m = 2$ con lo cual, realizando los cálculos anteriores se puede conseguir un ángulo de $\theta_S = 90^\circ$.

Ahora bien, el rotor elaborado para este motor debe ser de un material rígido para evitar que éste se doble. Además, se consideró que el rotor se elaborará con el menor radio posible, ya que éste puede rozar con las conexiones ubicadas en los extremos de las placas de los estatores y en consecuencia provocar juego mecánico. También se aumentó el espesor del rotor con la finalidad de montar un imán más grande que proporcione más flujo magnético. En la figura 4-4 se ilustran dos rotores elaborados para este diseño, ambos con un barreno en el centro el cual es utilizado para colocar la flecha del motor.

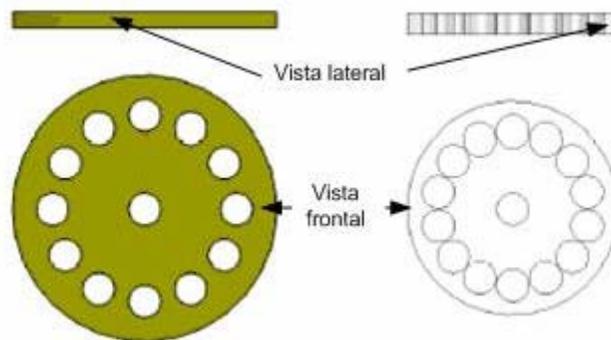


Figura 4-4 Disminución del radio y aumento del espesor de los rotores.

Por su parte, la flecha del rotor es fabricada de un material paramagnético para evitar efectos magnéticos sobre la misma durante la operación del motor. Asimismo, la flecha está constituida de dos radios, uno que corresponde al barreno central del rotor y otro que tiene el mismo diámetro de dos rodamientos montados en un soporte para la flecha (explicado en el siguiente párrafo). La longitud de esta pieza, debe ser por lo menos más grande que el tamaño del estator a fin de que transmita el movimiento del rotor al exterior. El esquema de esta flecha se muestra en la figura 4-5.

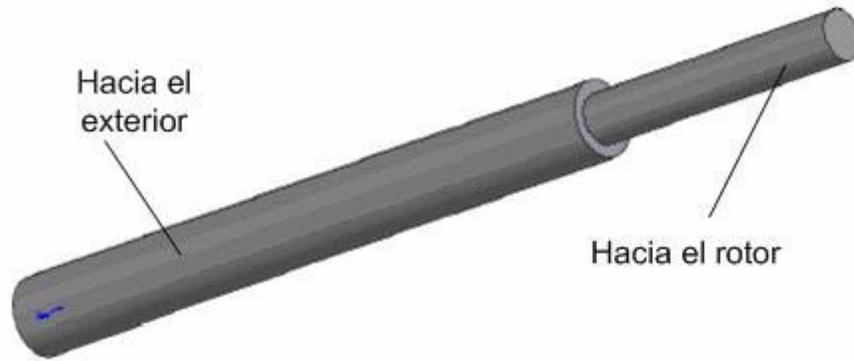


Figura 4-5 Flecha del motor con dos radios.

Todo motor debe de buscar una forma para conducir su flecha a través de su cuerpo, es por eso que se diseñó un soporte de flecha para que la flecha gire libremente con un buen apoyo sin tener problemas de juego mecánico. El diseño de esta pieza considera, al igual que la flecha, un material paramagnético para evitar la interacción con el campo magnético generado por las bobinas o por los imanes en el rotor. Su longitud es la misma que la de los núcleos de las bobinas debido a que al igual que éstos, el soporte de flecha tiene que atravesar todo el estator cuando es ensamblado.

Ahora bien, es importante señalar que en los extremos de este soporte, se manufacturaron dos cajas donde son alojados dos rodamientos utilizados para evitar fricción (los cuales fueron comprados) y es en ellos en donde descansa la flecha. En la siguiente figura 4-6, se ilustra el soporte de flecha indicado con el número (1) y sus rodamientos indicados con el número (2).

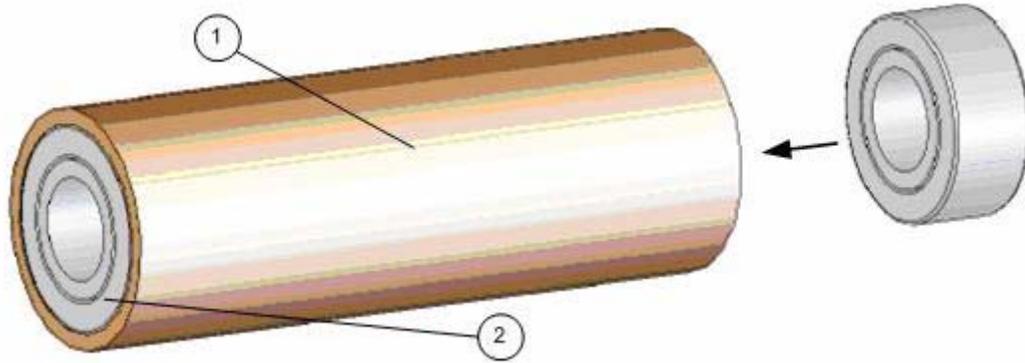


Figura 4-6 Soporte de flecha con rodamientos.

Hasta ahora en este nuevo motor de doble estator de imán permanente, se ha explicado como se diseñó el rotor, la flecha y su soporte. En la sección de fabricación, se explicará como fueron unidas estas piezas, pero a continuación se comentará el diseño de las placas y conexiones de un nuevo motor de pasos de doble estator.

Para conceptualizar la forma de las placas, las conexiones de las mismas y las piezas del rotor anteriormente descritas, se hicieron esquemas del diseño del motor en la PC con ayuda de un programa de diseño asistido por computadora (*Computer Aided Design* por sus siglas en inglés CAD). En el diseño en CAD del motor de pasos de imán permanente, se planteó la idea de utilizar placas para formar los estatores, estas placas están hechas dos de baquelita y dos de lámina, ambas del mismo espesor. En la placa de baquelita se trazan las pistas del circuito de conexiones de los arrollamientos (este punto se comentará en el siguiente párrafo), mientras que en la otra placa de lamina cierra el circuito magnético que hace funcionar al motor. Las dos placas poseen barrenos, tal como se muestra en la figura 4-7. Estos barrenos ayudan a fijar las bobinas por medio de sus núcleos.

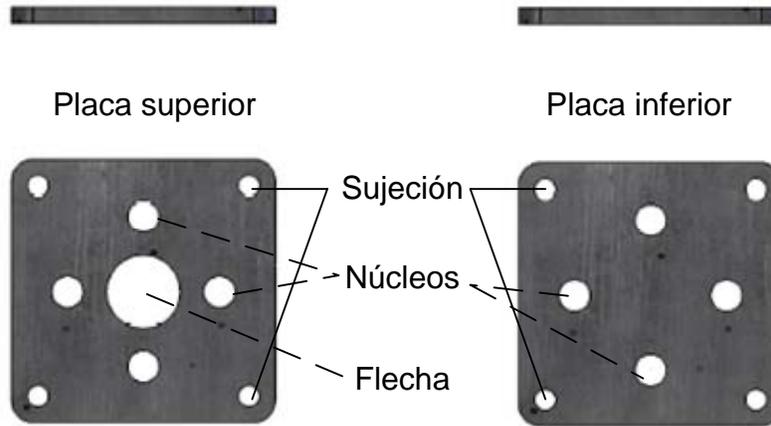


Figura 4-7 Placas metálicas de cada estator del motor de pasos de imán permanente.

En esta figura, se observa que una de las placas tiene un barreno en el centro con el fin de dar paso a la flecha pero también tiene otros barrenos en los extremos estos últimos sirven para sujetar el motor a la micromáquina.

Las conexiones de los arrollamientos en el motor son importantes en el rediseño, ya que por medio de éstos se realiza el control del motor. Las bobinas en este diseño son conectadas de manera interna en una placa de baquelita tal como se muestra en la figura 4-8, esto debido a que en prototipos anteriores se ha tenido cortos o incluso problemas de circuito abierto en sus conexiones.

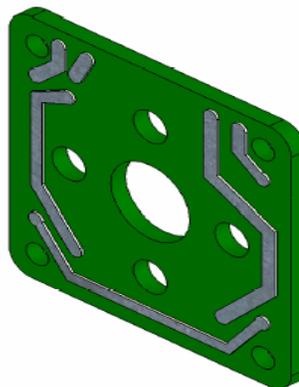


Figura 4-8 Placa de circuito impreso para conexiones.

Las conexiones en los dos estatores del motor de pasos constan de ocho bobinas (4 por estator) con dos fases. Las dos fases controlan el motor y éstas son conducidas por medio de conexiones exteriores hacia un circuito de control. En la figura 4-9 se muestran las conexiones en los estatores, cada uno de ellos compuesto de cuatro bobinas las cuales están alambradas en dos fases A ó B. Una fase total del motor está compuesta de las conexiones de dos bobinas en el estator 1, junto con las conexiones de otras dos bobinas ubicadas en el estator 2. Como resultado cada estator tiene dos bobinas unidas a la fase A y las otras dos unidas a la fase B.

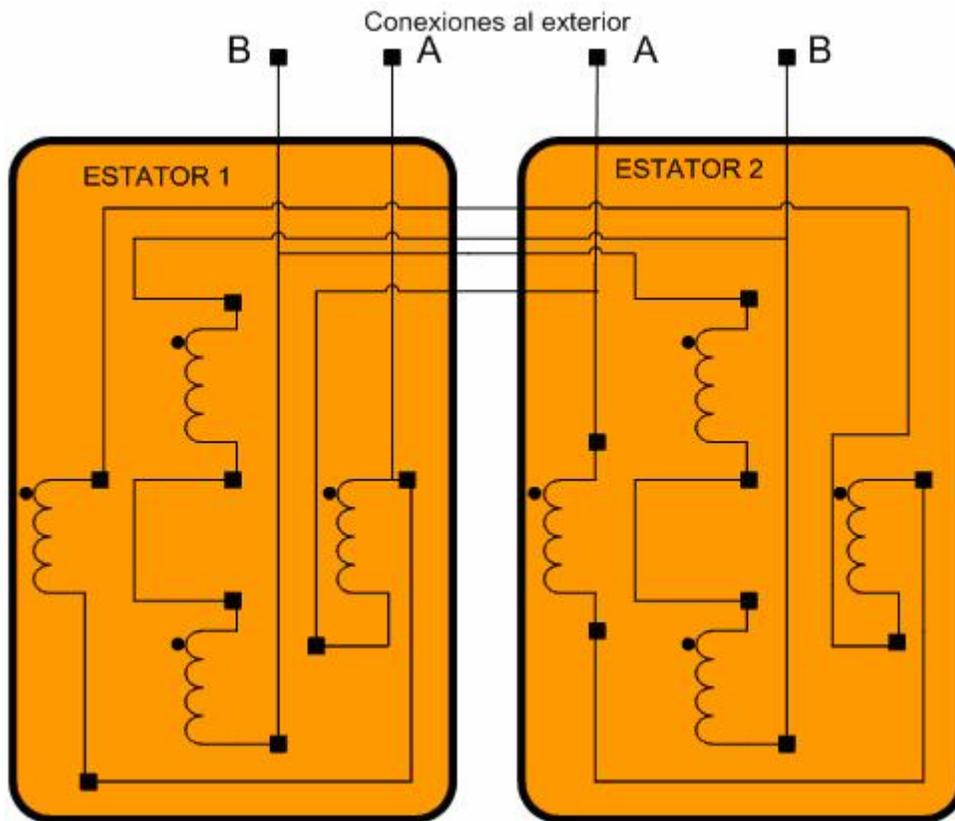


Figura 4-9 Conexiones en el interior de los estatores.

La resistencia de cada bobina es de 30Ω , y la suma de una fase A por ejemplo en el estator 1 es de 60Ω . Sin embargo, cuando son

conectadas las dos bobinas del estator 1 junto con las otras dos bobinas del estator 2, su resistencia cambia a 30Ω debido a que la conexión entre los dos estatores es realizada en paralelo. Por eso cada fase A ó B del motor tiene una resistencia de 30Ω .

Las piezas y el ensamble de un motor de imán permanente fueron diseñadas primero en un programa CAD antes de ser fabricadas, para darse una idea de cómo quedará el motor de cuerpo entero en la figura 4-10 se ilustra el motor de pasos de imán permanente.

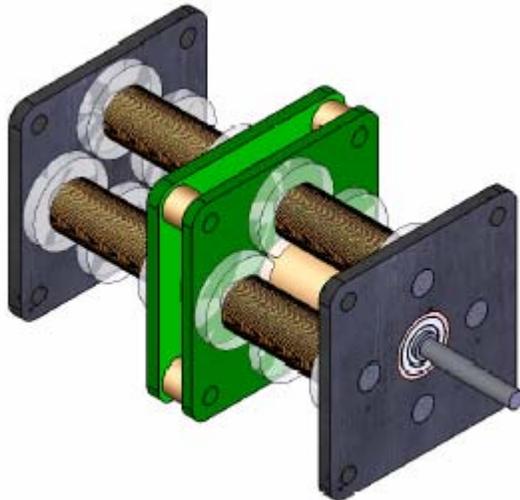


Figura 4-10 Esquema de un motor de imán permanente por medio de un programa CAD.

4.1.3 Fabricación de motores de pasos de imán permanente

La fabricación de un motor de pasos de doble estator, se hizo tomando como base un diagrama de manufactura mostrado en la figura 4-11. En este diagrama se muestran todas las piezas

utilizadas para la construcción del motor de pasos, así como los ensambles de las piezas.

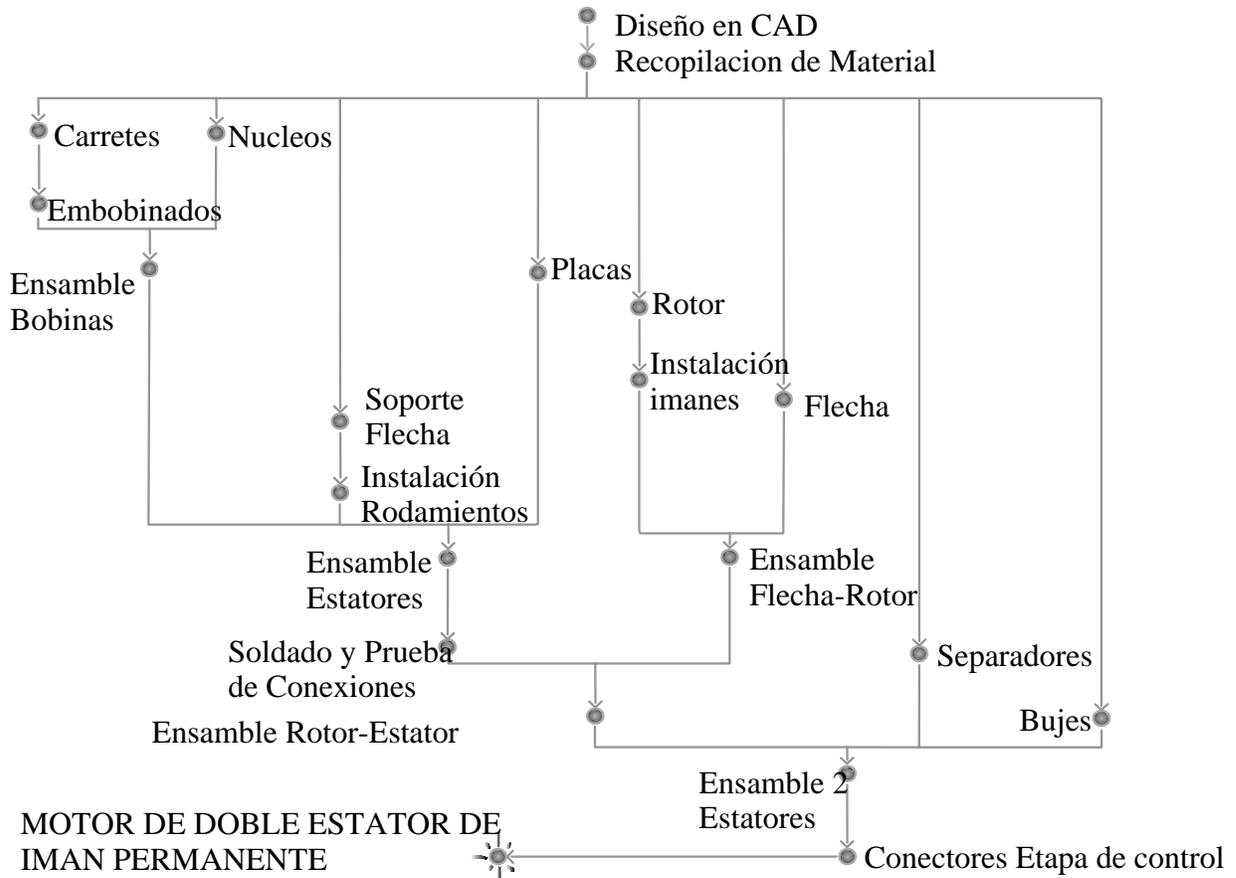


Figura 4-11 Diagrama de manufactura y ensamble de un motor de imán permanente.

Primero, se comenzó a elaborar ocho carretes de material paramagnético (acrílico en unos motores y PVC en otros motores) del mismo tamaño todos ellos tal como se ve en la Figura 4-12 punto (2), para formar las bobinas de dos estatores de un motor de pasos. Cada estator contiene 4 carretes y cada carrete tiene un núcleo de acero *cold rolled* (1) en su interior (se utilizó este material debido a su alta permeabilidad magnética).

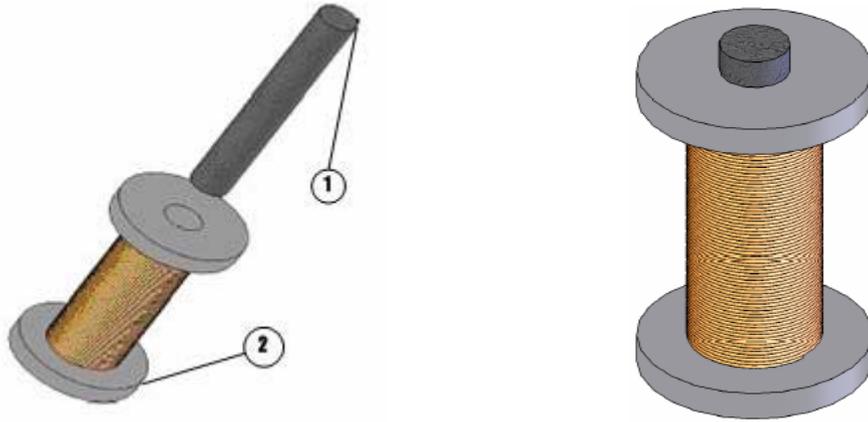


Figura 4-12 Carretes PVC con núcleo de acero *cold rolled*.

Los carretes fueron elaborados con herramientas del taller del GMM como son torno, brocas, buriles, los cuales ayudaron a dar formas circulares y elaborar barrenos. La longitud de los núcleos, es más grande que los carretes, ya que deben ser conectados con las placas para dar forma a los estatores.

Los carretes de los dos estatores del motor son diferentes, su modificación se muestra en la figura 4-13. La mitad de los carretes es decir cuatro de ellos (referenciados con el punto 1), fueron modificados para proporcionar espacio en el interior de un estator, ya que éste contiene un soporte de flecha que es por donde pasa precisamente ésta.

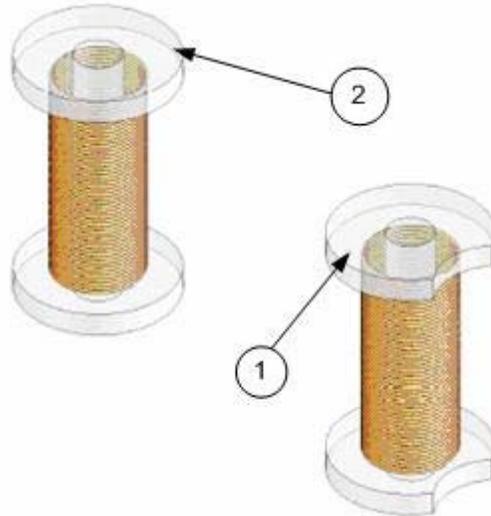


Figura 4-13 Carretes en acrílico.

Una vez elaboradas estas piezas se comenzó a embobinar los 8 carretes con alambre magneto. Cada arrollamiento fue medido con un multimetro para saber el valor de su resistencia la cual debía tener un valor de 30Ω en todos los carretes. Una vez que se terminó de embobinar, se aplicó a los arrollamientos barniz con el fin de aislar los posibles cortos en su conexión.

Después de terminar con todos los carretes se empezó a elaborar el soporte de flecha. Este fue hecho de latón y elaborado con un torno, brocas y buriles (tal como fue mostrado en la figura 4-6 punto 1). En esta pieza se elaboraron cajas en sus extremos por medio del uso de un buril para alojar un rodamiento en cada una de estas cajas. También esta pieza tiene un barreno en su centro por el cual pasa la flecha de nuestro motor, este barreno fue elaborado utilizando brocas montadas en un portabrocas de un torno del GMM.

Después de elaborar el soporte de la flecha del motor, se comenzó a fabricar las placas de los estatores. Las placas tienen

varias funciones: sostienen las bobinas, cierran el circuito magnético del motor, contienen el circuito de conexión de las bobinas, sujetan al motor a la micromáquina y dan paso a la flecha del motor.

Se tienen cuatro placas, dos de baquelita y dos de lámina de acero, todas ellas elaboradas con ayuda de una máquina de control numérico del taller del GMM. Esta máquina de control numérico utilizó cortadores para manufacturar las placas y brocas para realizar los barrenos. Para elaborar las pistas de las placas de baquelita, se realizó el diseño de circuito impreso en un CAD, este se imprimió con la finalidad de elaborar el circuito en las placas y después se le colocó una capa aislante para cubrir las pistas, las cuales pueden averiarse cuando son soldadas. Terminado lo anterior, se realizaron los barrenos de cada placa con un taladro de mano y brocas. En la figura 4-14 se muestran ejemplos de placas de acero y baquelita.

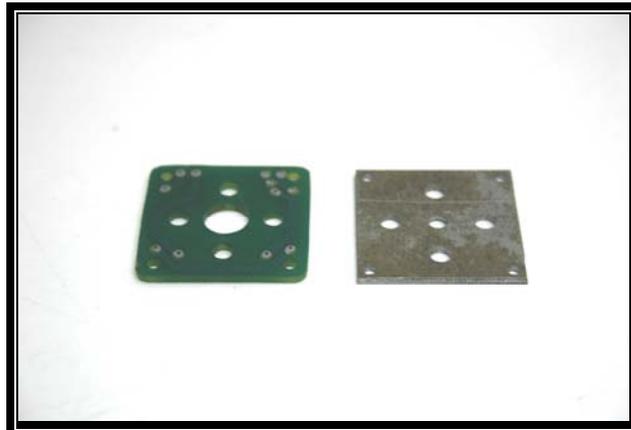


Figura 4-14 Placa de baquelita a la izquierda y placa de lámina de acero a la derecha.

En la figura 4-15, se muestran dos placas de baquelita diferentes. Una placa de baquelita que tiene un barreno en el centro formaría un estator junto con la placa metálica que también tiene un

barreno en el centro, mientras que las otras dos placas sin barreno en el centro (tanto de baquelita como de lámina de acero), formarían el otro estator.

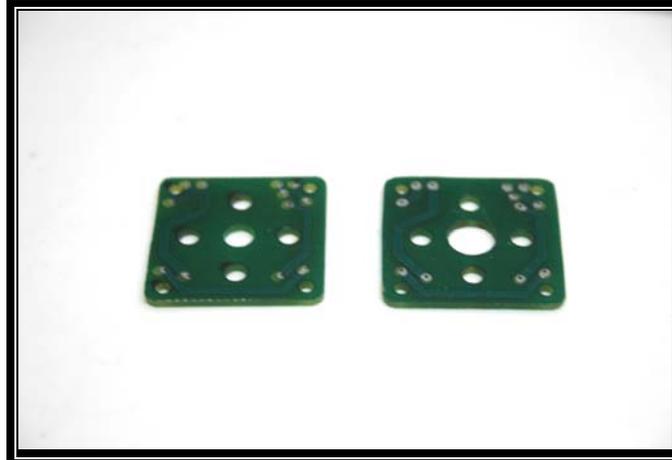


Figura 4-15 Los dos tipos de placas de baquelita para dos estatores.

Una vez construidas las placas se procedió a ensamblar los estatores como se muestra en la figura 4-16. En esta figura se ilustra el ensamble de un estator de la parte superior del motor. En esta figura se puede ver en el punto (1) y (6) las placas del estator que alojan a las bobinas de acrílico indicadas estas últimas con el número (5), asimismo esta figura ilustra como pasa el soporte de flecha indicado con el número (3) por en medio de los estatores para dar paso a la flecha del motor. Cabe resaltar que se utilizaron dos rodamientos en los extremos del soporte tal como lo indica el número (4). En el ensamble de los estatores se cuidó que las placas, los núcleos de las bobinas y los imanes del rotor coincidieran exactamente al momento de ser montados en el rotor, ya que con ello se conseguirá aprovechar todo el flujo que los núcleos puedan suministrar a los imanes.

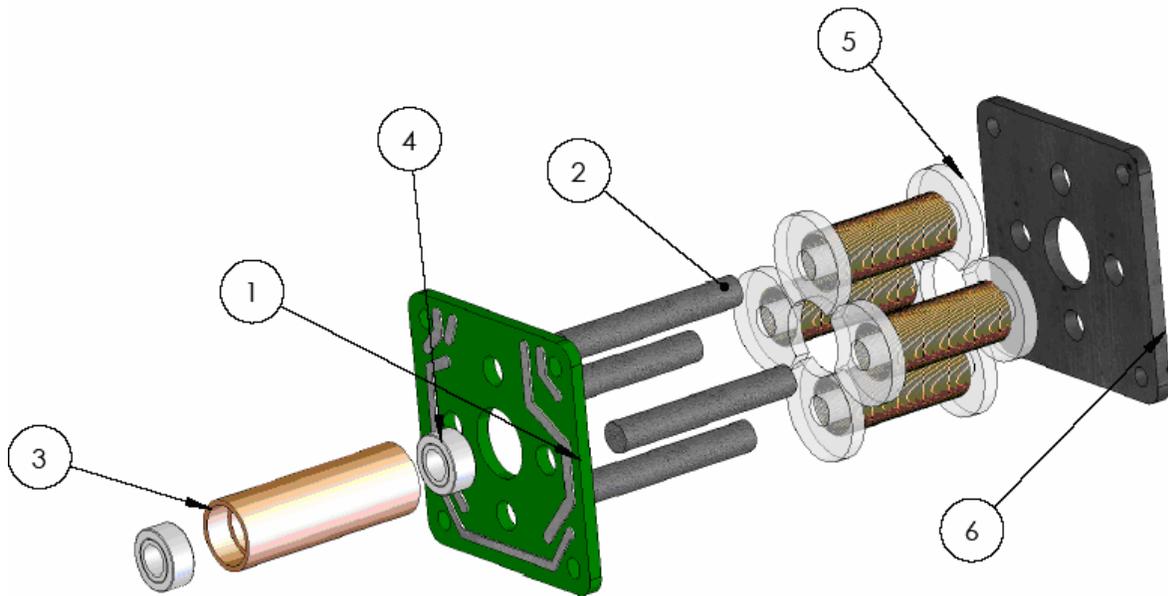


Figura 4-16 Ensamble de estator superior.

Otra parte importante de manufacturar es el rotor, éste fue elaborado con ayuda de una máquina de control numérico utilizando dos tipos diferentes de material como son la baquelita y el acrílico. Dentro de él, se realizaron barrenos para colocar los imanes que interactuaran con los núcleos de las bobinas. Los barrenos de los rotores fueron elaborados utilizando distintas brocas y la forma del rotor fue hecha usando cortadores que utiliza la máquina de control numérico para realizar ésta operación. Algunos de los rotores elaborados para un nuevo motor de pasos de imán permanente se muestran a continuación en la figura 4-17.



Figura 4-17 Tipos de rotores elaborados para desarrollar un nuevo motor de pasos.

La flecha del rotor fue elaborada de acero inoxidable (como se mencionó en el diseño) para minimizar los efectos magnéticos, al igual que el soporte de la flecha. Esto les proporciona una mayor rigidez sobre todo a la flecha, la cual es acoplada a la transmisión de la máquina herramienta. La flecha tiene un diámetro que coincide con los rodamientos y una rosca la cual se coloca a un engrane que será con el que se unirá a la transmisión de la máquina. Del otro extremo de ésta, se tiene otro radio también enroscado el cual se unirá al rotor. Para fabricar esta pieza se utilizó un torno con distintos buriles, un contrapunto y dados de tarraja para realizar las roscas. Una fotografía de la flecha se muestra en la siguiente figura 4-18.



Figura 4-18 Flecha del motor de imán permanente.

El ensamble de la flecha con el rotor y el soporte de la flecha se muestran en la figura 4-19. En el punto (1) se encuentra el rotor con sus respectivos imanes indicados con el número (2), también en el punto (3) se ilustra la flecha y su lugar en el ensamble. Esta es colocada en el centro del rotor y atraviesa el soporte de flecha indicado por el número (4).

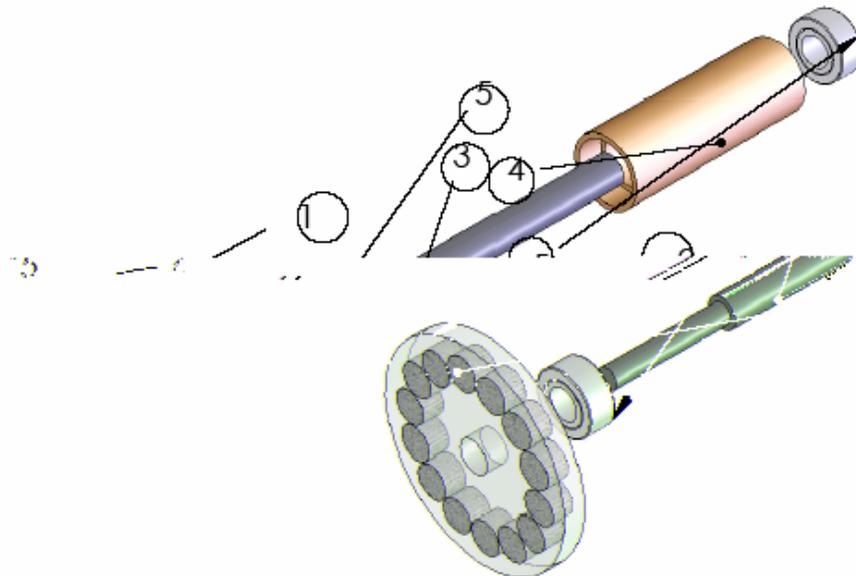


Figura 4-19 Ensamble del rotor-flecha.

Por otro lado, antes de ensamblar el rotor con los estatores se fabricaron 4 separadores de latón con una altura igual, los cuales son utilizados para fijar a una distancia uniforme el ensamble

estator1 – rotor – estator2. Estos separadores son ajustados por medio de unos pernos de acero inoxidable que entran en el barreno maquinado en el mismo por medio de una broca de centro y una broca normal tal como se ve en la figura 4-20. Los pernos son colocados en las esquinas de las placas de baquelita y después se colocan los separadores.

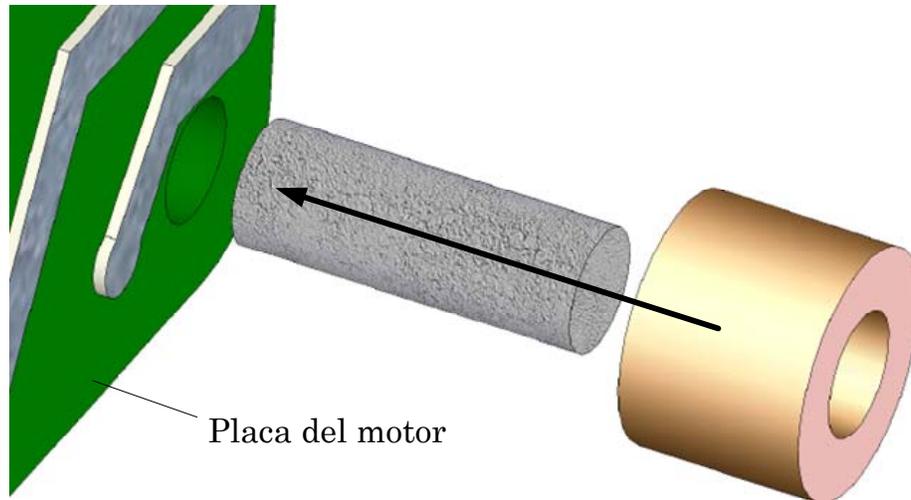


Figura 4-20 Separadores de los dos estatores del motor de pasos.

La fabricación del diseño del motor de pasos de imán permanente se inició elaborando primero un motor de pasos prototipo que ayudó a evaluar con más detalle sus características mecánicas y eléctricas. Con los resultados que se obtuvieron, se perfeccionó su diseño y se mejoró los próximos motores que se elaboraron. En otras palabras, después de elaborar el prototipo de motor, se realizó una segunda versión perfeccionada.

4.2 Desarrollo de un motor de pasos por fuerza de Lorentz

Anteriormente se describió el procedimiento para desarrollar un motor de pasos de imán permanente, ahora se comentará el diseño y fabricación de un motor por fuerza de Lorentz comenzando con su principio de operación.

4.2.1 Principio de operación

Para explicar el principio que rige este motor, se tomará en cuenta un hilo conductor que circula corriente, tal como aparece en la figura 4-21. En este conductor existe un campo magnético uniforme que tiene una densidad de B [wb/m²] = [T]. Si el conductor tiene una longitud de L en metros y la corriente es de I Amperes, se puede demostrar que la fuerza F en Newton sobre el conductor en la dirección, es dada por:

$$F = B \times I \times L \quad \text{Ec. 4-3}$$

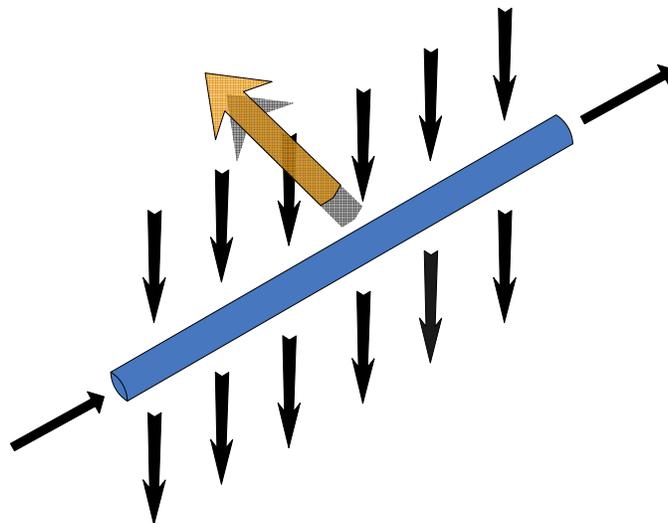


Figura 4-21 Fuerza de Lorentz.

Esta fuerza es llamada fuerza de Lorentz porque es el producto de una corriente eléctrica con una densidad de flujo magnético. Si esta fuerza actúa sobre un conductor montado sobre el rotor de un motor con un radio de R metros, entonces el par que actúa sobre el rotor es de $F \times R$ en [N m]. En consecuencia el rotor del motor tenderá a girar a una nueva posición debido a la repulsión de la fuerza electromagnética que actúa sobre el imán del rotor.

4.2.2 Diseño de un motor de pasos por fuerza de Lorentz

El diseño de un motor de fuerza de Lorentz presenta otra forma de hacer girar el rotor de un motor de pasos con las mismas consideraciones que se tuvieron para el motor de imán permanente. Un punto importante dentro de este motor es que éste es un poco mayor en tamaño respecto del motor de pasos de imán permanente. No obstante, el interés de esta tesis se enfoca en los efectos y comparaciones que tiene este motor asociado con otro casi del mismo tamaño para después, como trabajo a futuro conseguir diseños más reducidos y eficientes.

Iniciamos el diseño con la idea de que un prototipo de motor debe compartir al igual que el motor de imán permanente la característica de tener dos estatores con el propósito de conseguir un mejor par en el motor de pasos.

En este diseño de motor, se elaboró un estator que albergará cuatro bobinas en las ranuras de su cuerpo, el cual debía ser de un material ferromagnético por el cual circula un determinado flujo magnético figura 4-22.

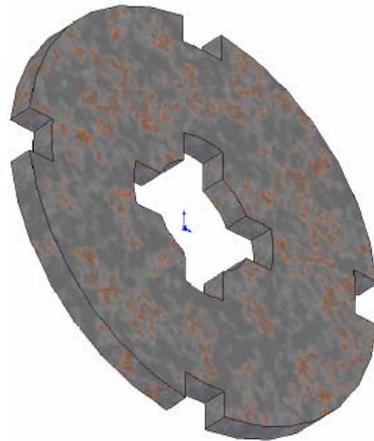


Figura 4-22 Diseño de estator del motor de fuerza de Lorentz.

La razón de utilizar una lámina de acero en este tipo de material se debe al principio de operación del motor que involucra flujo magnético encerrado con una determinada dirección en el interior del estator para generar su fuerza, después estos estatores son colocados en un soporte central.

Los embobinados del motor deben estar colocados en el estator como se muestra en la figura 4-23, ya que es aquí donde se generan las fuerzas de Lorentz que harán girar al motor en el siguiente paso. Cada estator de este diseño contiene cuatro arrollamientos con dos fases. Estos tienen un hilo magnético del No.35 para simplificar la elaboración del embobinado. Esta consideración afecta el consumo de corriente la cual originará el campo magnético que circula por el interior de este estator, sin embargo se tiene otro campo magnético originado por los imanes y es la suma de estos campos con el producto vectorial de la corriente lo que da origen a la fuerza de Lorentz por eso la consideración de este calibre influye en el funcionamiento del motor.

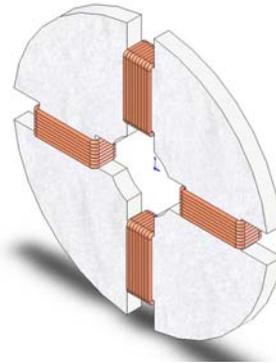


Figura 4-23 Estator embobinado del motor de fuerza de Lorentz.

La resolución es un punto muy importante en el diseño de motores de pasos. Por eso con la experiencia antes obtenida del anterior motor de pasos, se modificó el rotor desde su inicio con imanes más gruesos que los ya colocados en el motor de imán permanente, pues un imán de mayor tamaño contiene más flujo magnético y por consiguiente origina también una fuerza mayor. Asimismo, al igual que el diseño anterior se modificó el número de polos, también se incrementó el número de imanes en el rotor de este diseño colocando la mayor cantidad de imanes que pudieron caber en el rotor respetando el orden norte-sur-norte, pero incluyendo el doble de imanes con el fin de cubrir toda el área del embobinado.

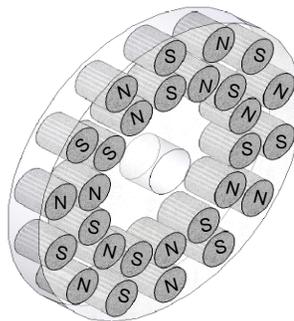


Figura 4-24 Rotor con imanes.

El cálculo del ángulo de paso descrito para el motor de imán permanente, es el mismo que para el motor de doble estator, porque

sólo se consideran los imanes del círculo exterior o interior como se muestra en la figura 4-24. Un modo sencillo de saber el número de imanes que actúan puede ser comprendido como:

$$N_r = N_{imanes} / 2 \quad \text{Ec. 4-4}$$

siendo N_r : Número de imanes en el rotor que originan la fuerza.

N_{imanes} : Número total de imanes en el rotor.

Para el cálculo del ángulo de paso se obtiene el número de pasos del rotor por medio de Ec. 4-2, dado que $N_r = 14$ y $m = 2$ por lo tanto se tiene un número de pasos igual a $S = (14)(2) = 28$ pasos/rev. Para un motor con 28 pasos se considera la ecuación Ec. 4-1 para calcular el ángulo, cuyo valor es de $\theta_s = 12.86^\circ$.

Al igual que en el diseño del motor anterior, se elaboró un esquema con ayuda de un programa CAD del prototipo de motor de fuerza de Lorentz como se muestra en la figura 4-25, para tener una idea clara de las piezas que se elaborarán.

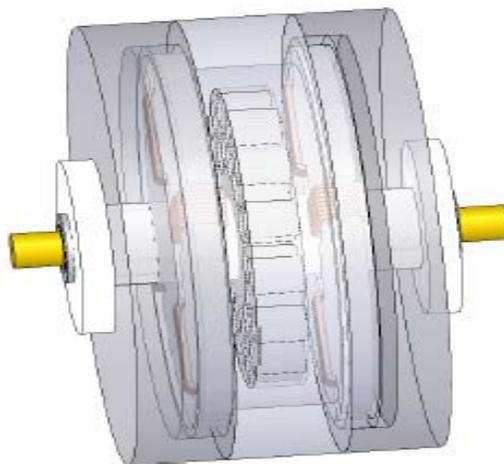


Figura 4-25 Motor de Fuerza de Lorentz en CAD.

Después de esto se procedió a la fabricación de las piezas, este proceso se describe a continuación.

4.2.3 Fabricación de motores de pasos por fuerza de Lorente

La manufactura de un motor por fuerza de Lorentz es más sencilla que la del motor de imán permanente. En la figura 4-26 se muestra el diagrama de manufactura del motor, el cual ayudó a elaborar un plan de trabajo.

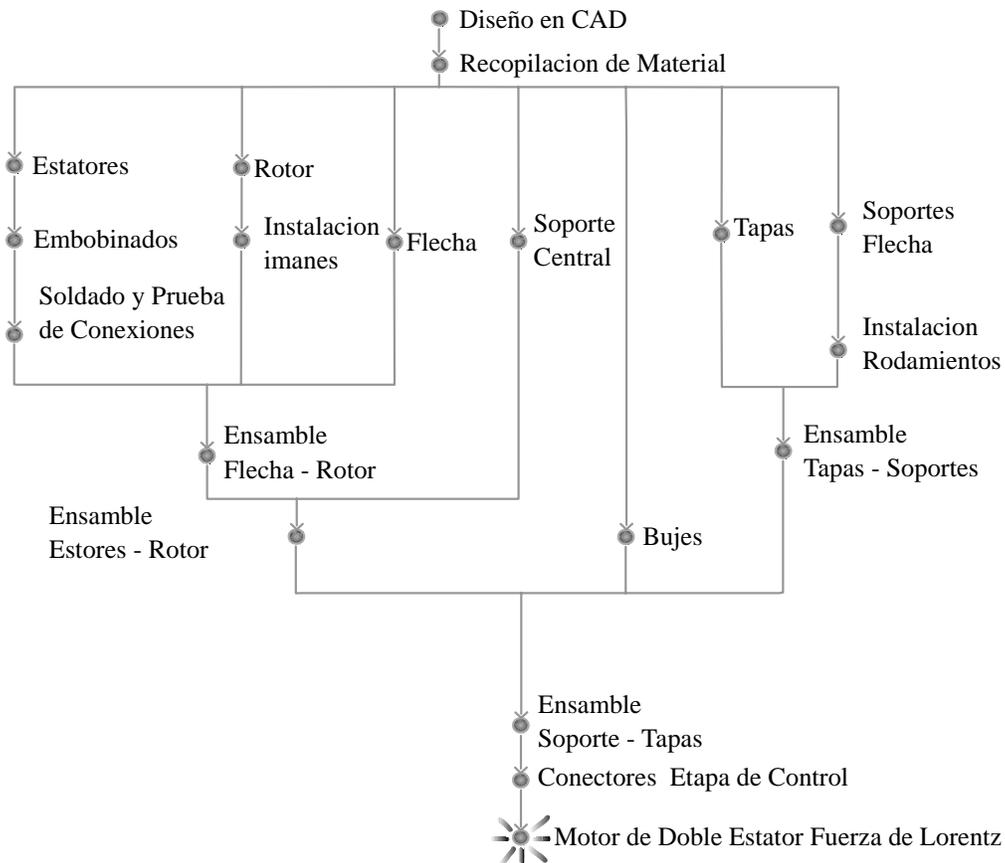


Figura 4-26 Diagrama de manufactura y ensamble de un motor fuerza de Lorentz.

El cuerpo de este motor se fabricó casi en su totalidad de acrílico ya que este material brinda una mayor visibilidad para montar el rotor.

Los estatores se elaboraron de un material rígido y ferromagnético como lo es la lámina de acero, después cada uno de los estatores es aislado con barniz para evitar cortos entre los arrollamientos montados en los estatores hechos de lámina de acero. Cabe aclarar que se uso un barniz blanco para identificar claramente los lugares donde no se le había aplicado el cuerpo del estator como se ilustra en la figura 4-27.

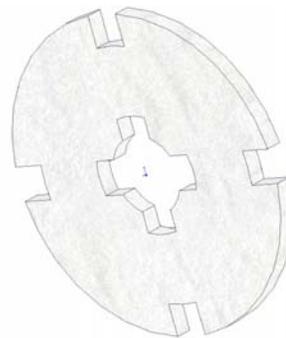


Figura 4-27 Estator aislado con barniz.

Siguiendo con el diagrama de manufactura se hilaron los arrollamientos, los cuales son montados en sus correspondientes ranuras del estator donde se pueden colocar aproximadamente un promedio de 20 hilos por vuelta figura 4-28.

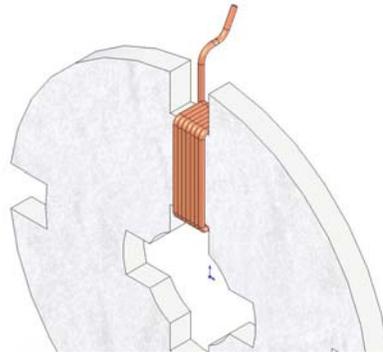


Figura 4-28 hilando la bobina en el estator.

Cuando se hila el arrollamiento al rotor, en cada recorrido completo de 20 vueltas de bobina, se le coloca barniz de manera que sirva de aislante ante posibles cortos. Además, esta capa de barniz ayuda a construir un hilado uniforme con lo cual, se evita posibles fugas de dispersión de flujo magnético que impiden que el motor funcione correctamente. Es por esto que se tuvo cuidado al hilar los arrollamientos, ya que como este motor se rige por la fuerza de Lorentz el devanado debe estar perpendicular con el imán del rotor para que se consiga una fuerza de Lorentz uniforme. Su elaboración se muestra en la figura 4-29.



Figura 4-29 Estatores con los cuatro embobinados y las tapas del motor.

Después de terminar de embobinar el estator, se procede a elaborar el rotor con acrílico. Se insertan dos imanes en lugar de

uno, de modo que cubran el área de los embobinados en el estator. El rotor se muestra en la figura 4-30.

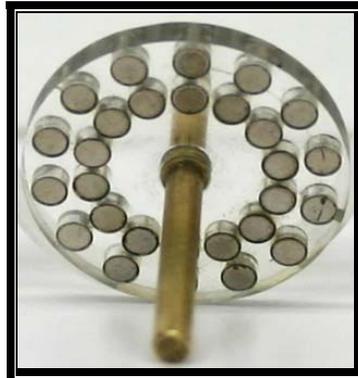


Figura 4-30 Rotor de acrílico con sus respectivos imanes.

En la figura 4-31, se muestran dos tipos de rotores elaborados para el motor de fuerza de Lorentz. En esta figura se puede observar el incremento del número de imanes para conseguir un ángulo de paso menor al igual que como se realizó en el motor de imán permanente.

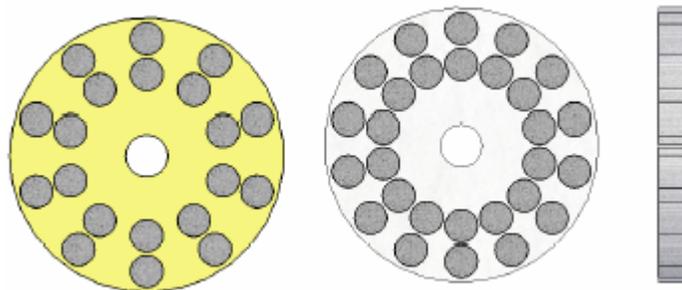


Figura 4-31 Imanes del motor de fuerza de Lorentz.

Por otro lado la flecha del rotor se fabricó de latón o acero inoxidable, con el fin de evitar efectos de inducción de los imanes con el rotor. Ante todo se debe considerar que la flecha de este motor debe pasar por las dos tapas exteriores con el propósito de que tenga un buen apoyo en los rodamientos de sus respectivos soportes de flecha. En la siguiente figura se muestra la flecha del motor de fuerza de Lorentz.



Figura 4-32 Flecha motor fuerza de Lorentz.

Uno de los dos radios de la flecha coincide con el barreno del rotor y el otro radio coincide con el rodamiento del soporte de la flecha el cual está ubicado en el extremo de la tapa, tal como se ilustra en la figura 4-33.

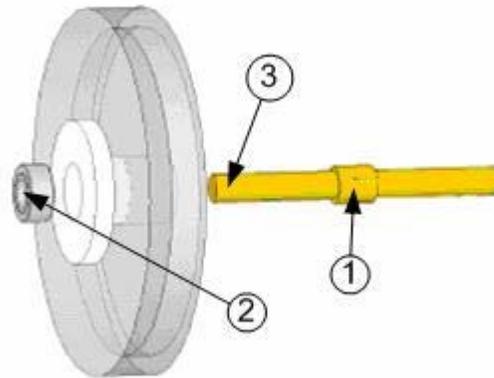


Figura 4-33 Ensamble tapa flecha (1) diámetro mayor de la flecha (2) diámetro del rodamiento (3) diámetro menor de la flecha.

El soporte central del motor es donde van montados los dos estatores este es mostrado en la figura 4-34.

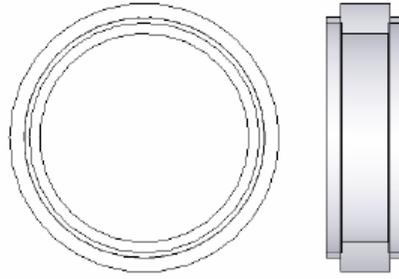


Figura 4-34 Soporte central motor fuerza de Lorentz.

Estos estatores deben estar colocados fijamente a una distancia determinada con un espacio bobina-rotor igual en ambos lados del rotor. En particular, se planeó en el diseño una caja para situar los estatores como se ve en la figura 4-35. Este soporte central (1) se elaboró de acrílico considerando que el ensamble estator – rotor pudiera ser realizado fácilmente con este tipo de material translucido. El soporte central aloja a los dos estatores en su interior y por fuera embona con las tapas exteriores del motor. En el caso de la distancia entre estator – rotor se considera el ancho de los embobinados y el ancho del rotor para dejar un espacio reducido y uniforme en ambos lados.

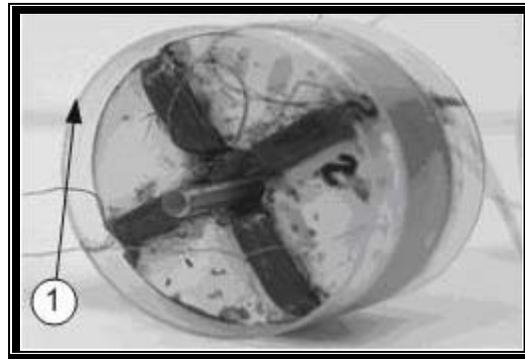


Figura 4-35 Soporte central con los dos estatores montados.

Las tapas que cubren los estatores en este soporte central corresponden con el diámetro del soporte central tal como muestra en la figura 4-36.

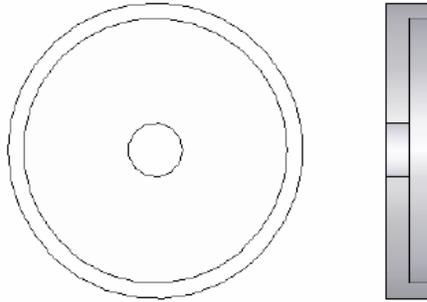


Figura 4-36 Dimensiones de las tapas del motor de fuerza de Lorentz.

Se tomó en cuenta en este diseño, que el motor debe estar aislado de cualquier desperdicio de material que pudiera introducirse durante su función en una máquina herramienta, de esta manera se protegen los embobinados del motor. Las tapas están hechas también de acrílico para facilitar la visión del ensamble. En medio de la pieza en la figura 4-36, se observa que tiene un barreno por el cual pasa otra el soporte de flecha junto la misma flecha.

El soporte de flecha conduce a la flecha al exterior del motor, proporcionando apoyo de tal manera que evite tener algún posible juego o fricción durante el funcionamiento del motor de pasos, para este diseño se elaboraron dos soportes de flechas las cuales corresponden a los dos extremos del motor de fuerza de Lorentz. En la figura 4-37 se muestra que los soportes de flecha tienen una pequeña caja en su cara exterior. Precisamente, ahí es donde se ubican los rodamientos que reducen fricción de movimiento en los soportes de flecha. Estas piezas están hechas de nylamid, un material ligero y opaco.

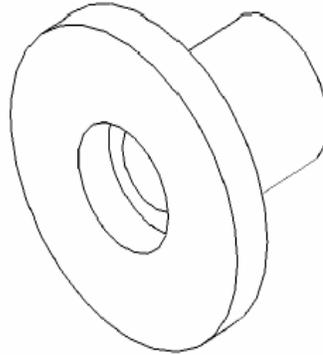


Figura 4-37 Soporte de flecha del motor de fuerza de Lorentz.

Una vez terminadas todas las piezas se comienza a ensamblar el motor y se realizan las conexiones pertinentes. En el circuito de la figura 4-38 se muestra el circuito de conexión del motor y sus salidas de las fases (A) y (B) al circuito de control del motor.

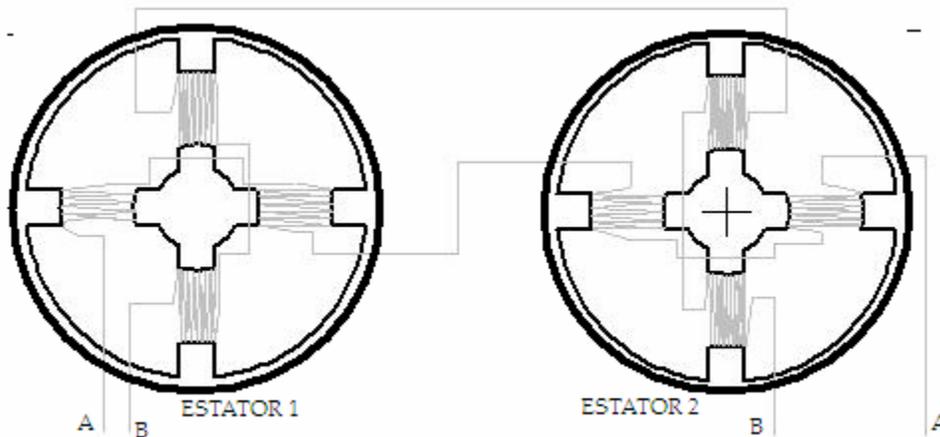


Figura 4-38 Conexiones dentro del motor de fuerza de Lorentz.

Las conexiones de las fases de motor son complementarias y en serie para dar continuidad al circuito magnético. Por ejemplo, si por un descuido el motor es conectado de una manera errónea, como conectar norte-norte o sur-sur el motor no arrancara, por lo tanto el motor debe ser conectado N-S-N-S o S-N-S-N. Las conexiones de la figura 4-38 muestran también que las conexiones de una fase fueron llevadas en serie y no en paralelo como en el de imán permanente.

De este modo, el valor en resistencia de un arrollamiento es de 6Ω , esto sumado con su correspondiente de ese estator sería 12Ω , y sumándole la resistencia del otro estator da como resultado un valor de 24Ω /fase.

Otro punto fundamental en este motor de pasos es el ensamble de rotor-flecha. Éste es importante debido a que el rotor debe estar alineado a 90° con la flecha para evitar roces con los arrollamientos del motor y evitar un posible desgaste que pudiera dañar los embobinados del motor e incluso impedir que gire. Para ayudar al rotor a mantener una distancia uniforme con los estatores se consideró la inserción de bujes, los cuales apoyan en la eliminación del juego que pudiera tener el disco del rotor debido al espaciamiento entre disco-estatores.

En la figura 4-39 se muestran como se realizó el ensamble del estator derecho con el punto (5), en el punto (4) se ilustra el soporte central con su tapa indicada con el numero (6). El soporte de flecha con el punto (7) y la flecha con el punto (3) son también colocados durante la realización de este ensamble. Siendo todo este ensamble la parte derecha, todavía faltaría la parte izquierda del motor.

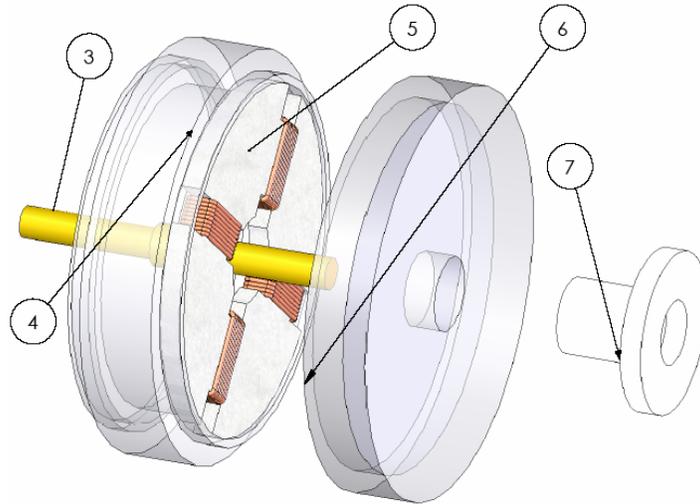


Figura 4-39 Mitad del ensamble del motor fuerza de Lorentz.

En la siguiente figura 4-40 el motor de fuerza de Lorentz realizado terminado.

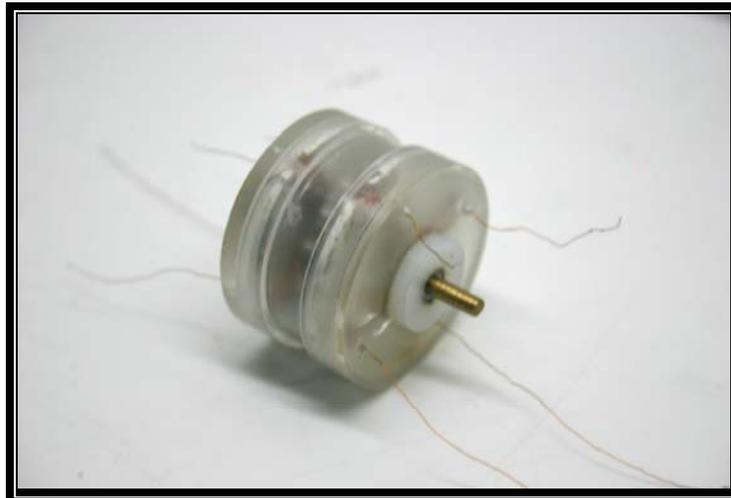


Figura 4-40 Motor de pasos por fuerza de Lorentz.

Como se observa este tipo de diseño de motor de fuerza de Lorentz no requiere de una manufactura complicada. Sin embargo, se realizarán pruebas para dar una conclusión definitiva sobre el desempeño de este tipo de motores.

Capítulo 5

Pruebas y Análisis de resultados

En este capítulo se describirán las pruebas de par, velocidad y temperatura realizadas a dos motores de pasos. Después se describirá un motor de fuerza de Lorentz y, por último, se comentará un poco sobre el empleo de los nuevos motores de pasos de imán permanente en una micromáquina herramienta.

5.1 Motor de Imán Permanente

El funcionamiento de un motor de pasos debe ser evaluado desarrollando pruebas (figura 5-1a). Sin embargo, estas pruebas deben ser comparadas con las pruebas de otro motor de proporciones semejantes de tal manera que, revisando los resultados se aprecie una mejora de sus capacidades respecto a los otros diseños de motores.

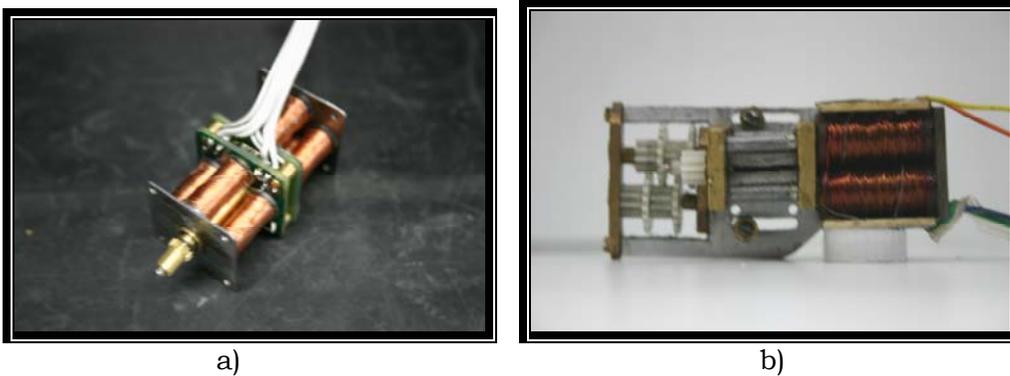


Figura 5-1 a) Nuevo motor de imán permanente de 28 pasos.
 b) Primer motor de pasos implementado en una micromáquina herramienta en el GMM.

El motor con el cual es comparado el nuevo prototipo se muestra en la figura 5-1b. Éste sólo puede dar cuatro pasos por

revolución, tiene un estator con cuatro bobinas y fue aplicado en un primer prototipo de micromáquina herramienta desarrollada en el GMM.

Por otro lado, el motor de 28 pasos de imán permanente, fue elaborado para una nueva micromáquina y su diseño partió, en un principio, de varias especificaciones del primer prototipo mostrado en la figura 5-1b.

Ahora bien, antes de explicar las pruebas realizadas a éstos dos tipos de motores de pasos se expondrán las características de corriente-tiempo en sus bobinas. Para este propósito se midieron sus inductancias cuyos valores son los siguientes:

$$L_{\text{fase1 motor28pasos}} = 18.2\text{mH}, L_{\text{fase2 motor 28 pasos}} = 19.3\text{mH}$$

$$L_{\text{fase1 motor4pasos}} = 6\text{mH}, L_{\text{fase2 motor4pasos}} = 6.6\text{mH}$$

Debido a la forma en como están conformadas las bobinas (explicado en capítulo 4) del nuevo motor de 28 pasos, la inductancia por fase es la misma que la de una sola bobina. En el caso del motor de 4 pasos, la inductancia de una bobina es igual a $L_{\text{fase1 motor4pasos}} / 2$. De esta forma, empleando la ecuación Ec. 3-1 se puede trazar una gráfica corriente-tiempo, mostrada a continuación.

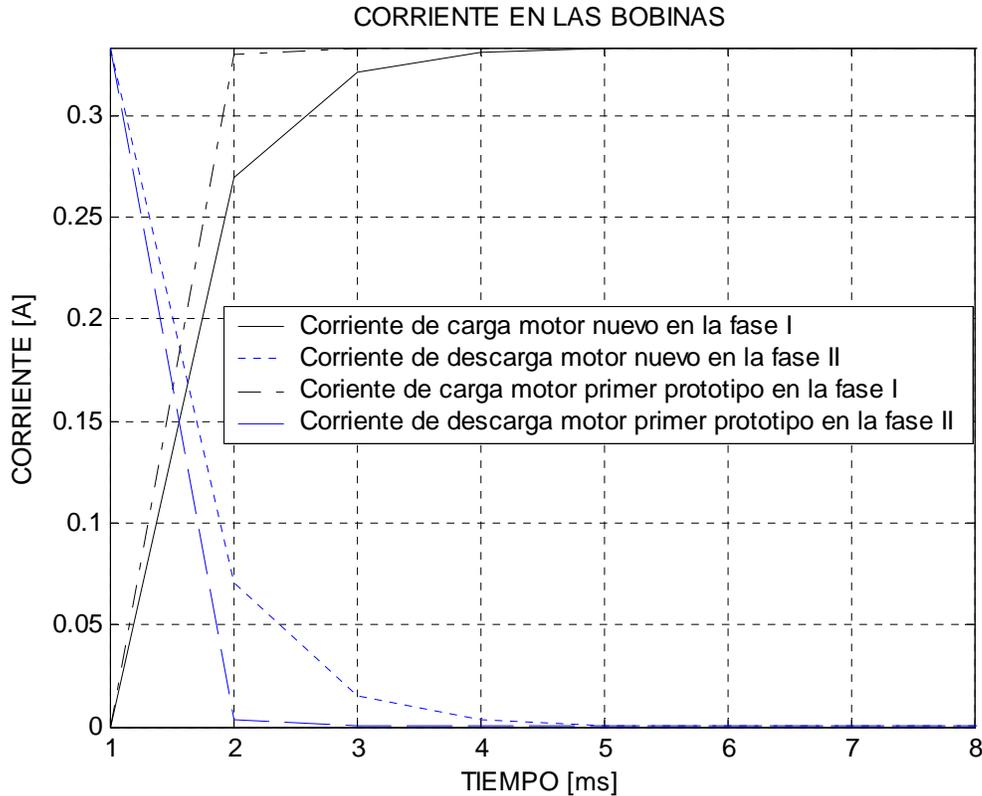


Figura 5-2 Carga y descarga de la corriente en las bobinas en los motores de imán permanente.

En la figura 5-2, se puede observar la corriente en las fases del motor de 28 pasos y también la corriente en las bobinas del motor de 4 pasos. En estas curvas se muestra tanto la acción de carga como la de descarga de la corriente en cada motor operando a un voltaje fijo de 10V.

5.1.1 Prueba par

Esta prueba se realizó con el fin de observar cual es el peso máximo que puede sostener la flecha de un motor de pasos cuando es energizado (a esta fuerza se le llama par de retención o “ *Holding Torque*” como fue mencionado en el marco teórico) y tomar lectura de datos para respaldar el análisis de par de una manera cuantitativa.

Este procedimiento hace uso de distintos elementos para su desarrollo como son: una fuente, una polea de acrílico, un hilo de cáñamo enrollado en la polea y diferentes pesos en gramos, figura 5-3.



Figura 5-3 Pesos patrón con los cuales se realizaron las mediciones de par.

Ante todo para realizar esta prueba se tiene dos restricciones:

- El límite de voltaje aplicado al sistema de control no debe rebasar una tensión máxima de 10V.
- Sólo debe polarizarse una fase para esta prueba. Aunque también se puede polarizar las dos fases al mismo tiempo, es preferible por simplicidad sólo energizar una fase.

Esta prueba se inicia aplicando un voltaje (en este caso de 5V), se coloca el menor peso patrón disponible en el extremo del hilo, tal como se ilustra en la figura 5-4.

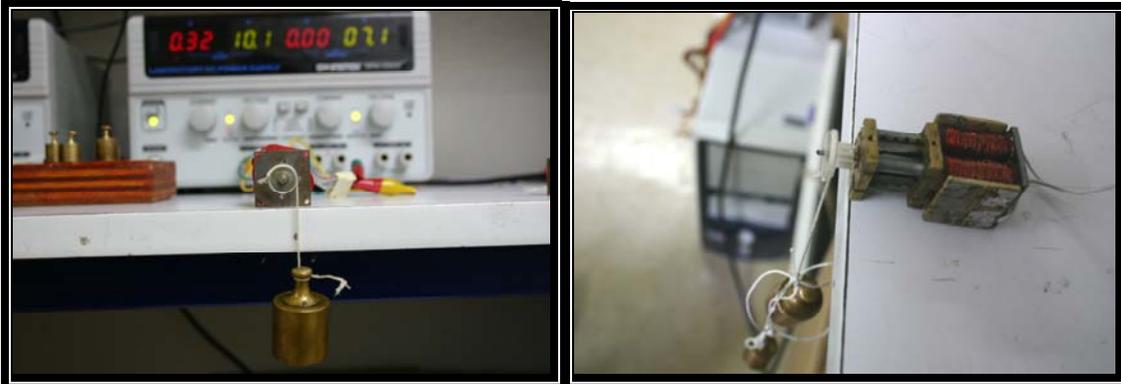


Figura 5-4 Forma en como fue desarrollada la prueba de par en ambos motores.

Éste peso es incrementado en valores de 5g, con lo cual llegará un momento en que el peso aplicado supere la fuerza que hace permanecer a éste en la posición inicial del experimento, por consiguiente el rotor del motor girará dejando caer los pesos. En este momento se toma la medición de corriente correspondiente a ese voltaje leído en el indicador de la fuente y también se considera el peso que logró hacer girar el rotor del motor.

Una vez que se ha tomado mediciones voltaje, peso y corriente se apaga la fuente para incrementar el valor del voltaje 0.5V más, después se enciende la fuente y se repite el experimento. Este procedimiento se repite hasta llegar a un valor de 10V en la fuente o sobre pasar el valor de corriente en las restricciones, sucediendo lo anterior, la prueba termina.

El par mecánico es concebido por el producto de la fuerza por la distancia de aplicación de la misma, por lo tanto éste puede ser calculado por la ecuación:

$$T = r \times F \quad \text{Ec 5-1}$$

donde r : Radio de la polea.

F : Peso patrón.

de este modo se tiene que la fuerza es igual a:

$$F = 9.81M \quad \text{Ec 5-2}$$

donde M : La masa del peso patrón.

Entonces r es una constante ya que el radio de la polea es fijo, por tanto el par queda determinado solamente por la masa

$$T = 0.1197M \quad \text{Ec 5-3}$$

Suponiendo que se tiene un peso de 45g, el par sería de:

$$T = 9.81(m/s^2) \times 0.1197(m) \times 0.045(kg) = 0.005386[N\ m]$$

Para analizar los datos de la prueba, se realizaron gráficas de par-corriente. La gráfica correspondiente a los cálculos de las pruebas del motor de 4 y 28 pasos se muestra en la figura 5-5.

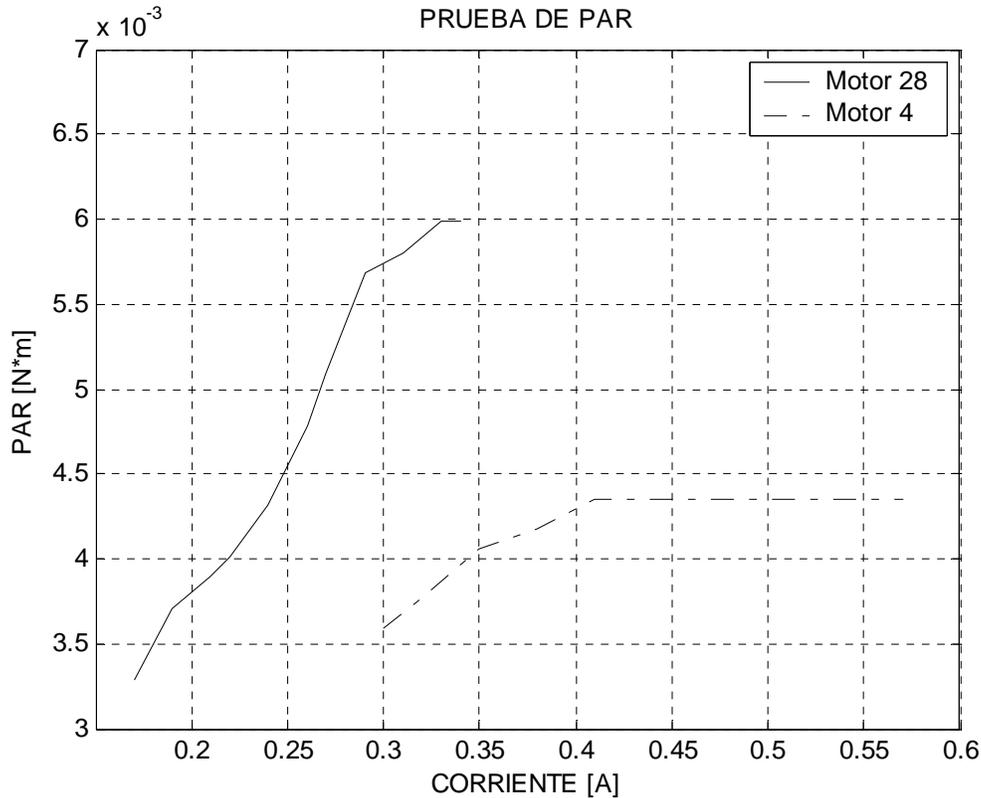


Figura 5-5 Resultados de la prueba de par para un motor de 4 y 28 pasos.

En la figura 5-5, se muestra que el motor de 4 pasos consumió una mayor corriente empezando con un valor de 0.3A hasta valores superiores a 0.5A, en cambio el motor de 28 pasos tiene una corriente en el rango de 0.17A–0.35A. Ahora bien, el par del motor de 28 pasos en un principio parece ser menor que el de 4 pasos sin embargo el par de éste último se estabiliza cerca de 0.0044N m a un valor de 0.4A esto debido a que el motor ya no pudo sostener más peso, aun incrementando el voltaje en la fuente con lo cual, para las demás pruebas, éste continuo sosteniendo el mismo peso. Esto no ocurrió con el motor de 28 pasos, el cual logró alcanzar valores de 0.005985N m para un valor de corriente menor que no llega a los 0.35A.

Por ejemplo, si se requiriera un par de 0.0042N m para mover una transmisión de un eje de la micromáquina, para un motor de 28 pasos sólo bastaría que consumiera un valor menor que 0.25A, mientras que el motor de 4 pasos necesita un consumo superior de 0.4A para lograr alcanzar ese valor. Con esto podemos darnos cuenta que este motor suministra un par mayor con un consumo de corriente menor. Además, se observa también que este motor tiene una fuerte tendencia a no consumir corriente arriba de 0.4A esto se debe a la resistencia de los embobinados de 30Ω por fase lo que le limita elevar su corriente a un valor por arriba de 0.4A. Este motor por tanto tiene un consumo de corriente relativamente pequeño comparado con otros motores elaborados en el GMM.

5.1.2 Prueba velocidad

Esta prueba tiene la finalidad de observar cual es el rango de velocidades en el que opera un motor de pasos. En este procedimiento se utilizaron: una fuente, un osciloscopio, un sistema de control con un microcontrolador PIC y una computadora (para aplicar rampas pequeñas de aceleración). Para explicar este procedimiento se partió de las siguientes restricciones:

- No debe incrementarse de manera brusca la velocidad.
- No se puede tomar mediciones cuando el motor esté en resonancia o perdiendo pasos.

Si bien algunos motores no son tan sensibles a cambios grandes de aceleración, otros pueden tener problemas de sincronización debido a su propio diseño. Por eso, para evitar estas

dificultades durante las mediciones se aplican incrementos pequeños de aceleración.

La prueba inicia a un voltaje fijo y a una frecuencia baja (por ejemplo de 50hz). Se coloca un instrumento de medición (un osciloscopio) con puntas atenuadoras en la entrada y salida para ver los respectivos voltajes, tal como se ilustra en la Figura 5-6.

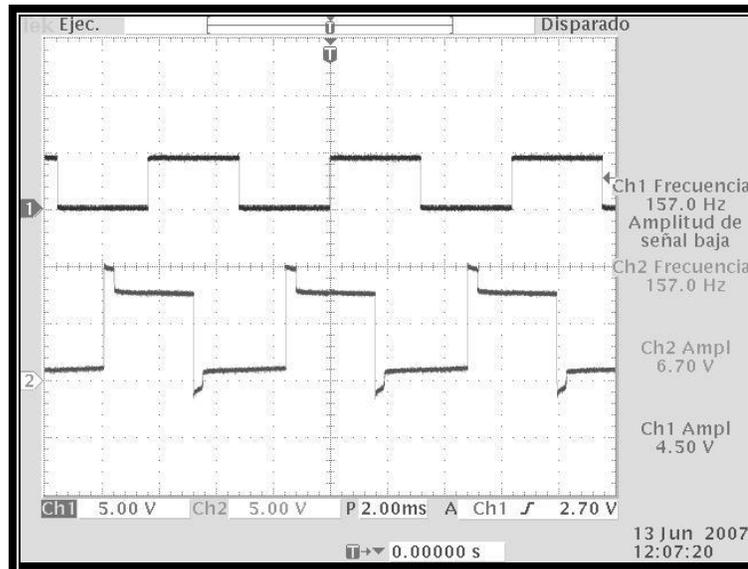


Figura 5-6 Foto del osciloscopio canal 1 entrada trazo superior y canal 2 salida trazo inferior.

Una vez establecidas las condiciones iniciales se procede a incrementar por medio del sistema de control la frecuencia de 10hz en 10hz realizando mediciones de frecuencia en el osciloscopio y corriente en el indicador de la fuente en cada incremento, hasta llegar al punto en el cual el motor empieza a perder pasos. En ese momento detenemos la prueba y se prosigue con el mismo experimento aumentando el voltaje 1V, después se repiten el procedimiento anterior. La prueba finaliza cuando con un voltaje de 10V.

Los datos de esta prueba son graficados como RPM- corriente para un voltaje fijo, la ecuación 5-4 muestra la forma en cómo se obtuvieron los valores RPM's a partir de la frecuencia:

$$RPM = (f \times 4 \times 60) / 28 \qquad \text{Ec 5-4}$$

Esta ecuación, se obtiene al analizar las características de la etapa de control. En forma general, se tiene que pasar 7 ciclos de reloj para que de una revolución el motor de 28 pasos, por eso se divide entre 28. Se multiplica por 4, ya que se debe multiplicar el doble producto del número de fases que tienen los motores, después se multiplica por 60, ya que un minuto tiene 60 segundos. Un ejemplo del cálculo es el presentado a continuación.

$$RPM = [f(\text{ciclos/s}) \times 4(\text{pasos/ciclo}) \times 60(\text{s/min})] / 28(\text{pasos/revolución})$$

En la figura 5-7 se pueden ver todas las curvas de velocidad realizadas desde un voltaje de 5V a 10V.

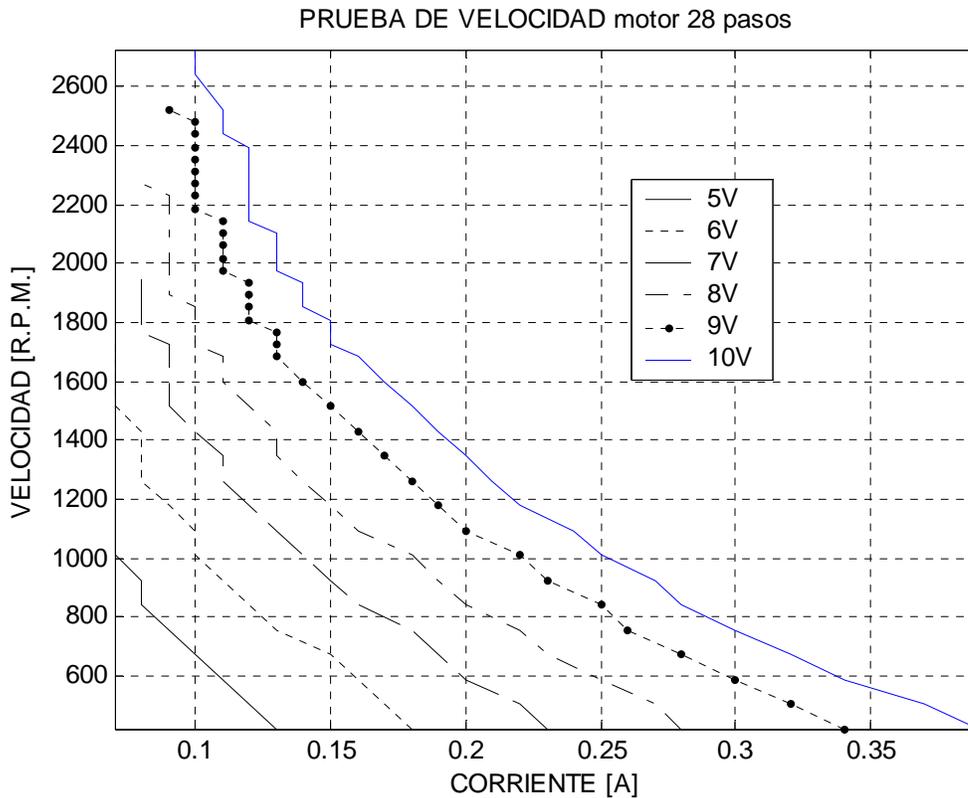


Figura 5-7 Resultados de la prueba de velocidad del motor de 28 pasos.

En la anterior figura se aprecia que para una corriente máxima de 0.4A el motor experimenta 2650 RPM's. Dicho valor sería la máxima velocidad que puede alcanzar el rotor, entonces su rango es de (0 - 2650RPM). Por otra parte en esta figura se apreciar también que mientras alcanza una mayor velocidad, su curva se vuelve menos suave, esto se debe a que el rotor está llegando a la velocidad máxima en la que puede operar con esas condiciones de polarización.

En la figura 5-8 se muestran los datos del primer motor de imán permanente. Observando la figura se ve que este motor consume más corriente que el anterior, pero alcanza una mayor

velocidad llegando por arriba de las 6000 RPM en un voltaje de 10V, con consumo de 0.8A.

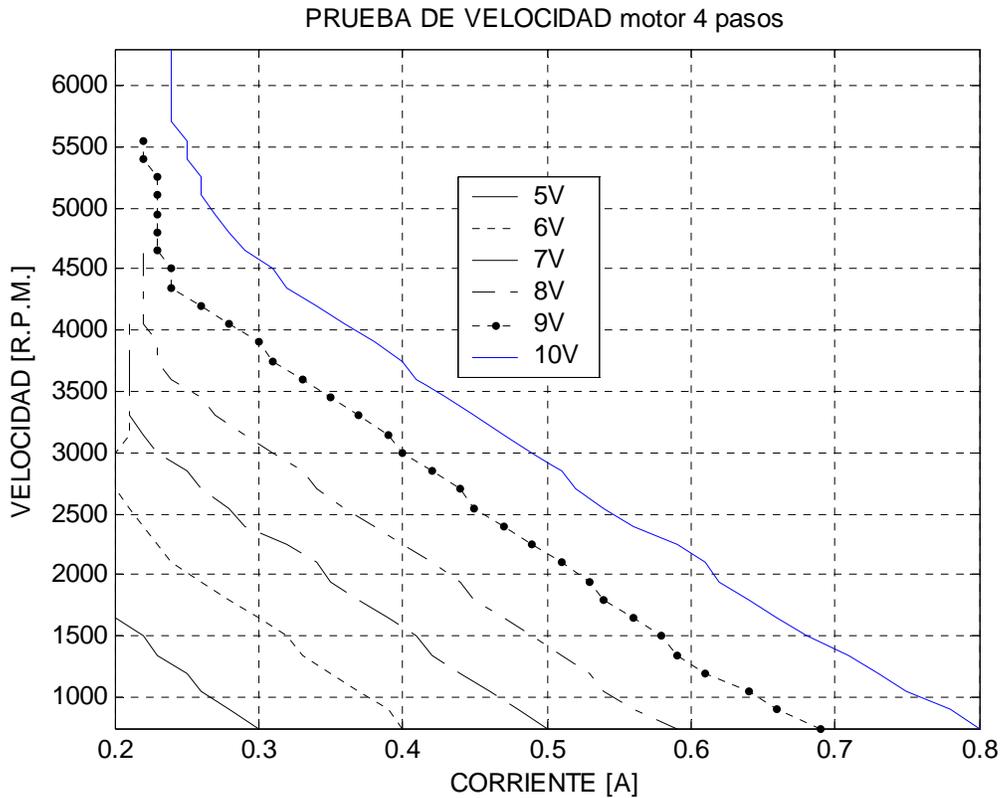


Figura 5-8 Resultados de la prueba de velocidad del motor de 4 pasos.

En todos los motores existe una tendencia a que decaiga el par a altas velocidades, es decir si tenemos en este motor una velocidad de 6000RPM su par posiblemente cae por debajo de la mitad. Esto es porque en un motor de pasos de imán permanente, el campo magnético del rotor cambia con los cambios en la flecha. El resultado de éste es que al girar su rotor se induce un voltaje de CA en los arrollamientos de cada motor. Este voltaje es conocido también como una fuerza contraelectromotriz (FCEM), ya que el voltaje inducido en cada arrollamiento del motor está siempre en fase y contra la forma de onda ideal requerida para girar el motor en la misma dirección. Tanto la frecuencia y la amplitud de la FCEM se incrementa con la

velocidad del rotor, de este modo la FCEM contribuye a reducir el par con incrementos de razón de paso.

En la figura 5-9 se muestran las curvas de velocidad a 10V de ambos motores. Es evidente que la curva del motor de 4 pasos es mayor que la curva del motor de 28 pasos. Este último maneja un rango de velocidades menor al de 4 pasos debido a la forma como fue construido, ya que el motor de 4 pasos de imán permanente, posee zapatas en su interior que hacen que se sincronice de una mejor manera al flujo ejercido por el rotor. Además, la inductancia influye en la velocidad (tal como se muestra en la figura 5-2), ya que la inductancia es inversamente proporcional a la corriente que circula por las bobinas. La corriente establece el flujo que interactúa con los imanes del rotor, por lo tanto mientras mas rápida sea la respuesta de corriente en la bobinas mas fácilmente el motor de pasos podrá alcanzar velocidades altas.

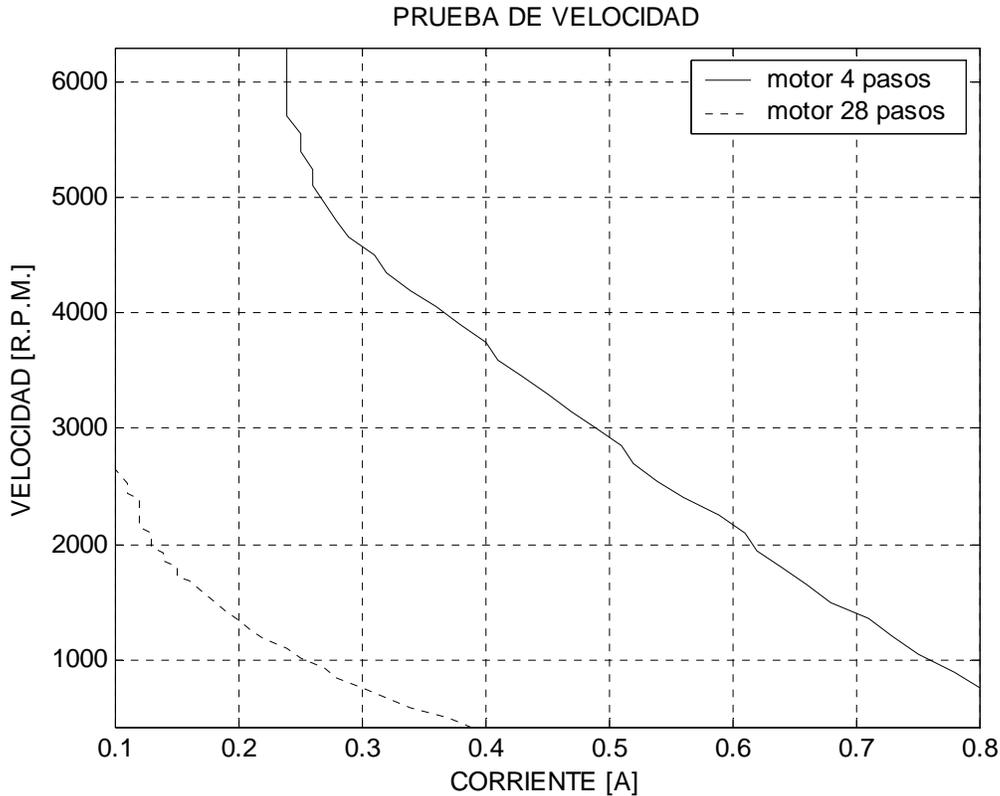


Figura 5-9 Comparación entre curvas de los dos motores a un nivel medio de voltaje.

5.1.3 Prueba temperatura

La prueba de temperatura tiene la finalidad de evaluar el calentamiento del motor durante su operación continua. Esta prueba utilizó una fuente de voltaje, un sistema de control con PIC y un termómetro infrarrojo. Para este protocolo tenemos dos restricciones:

- Distanciamiento entre termómetro y motor de pasos no menor a 15cm con el fin de evitar lecturas erróneas.
- La temperatura del motor en sus embobinados no deben superar los 55°C con el propósito de evitar daño en las bobinas.

Antes de empezar el experimento, se debe acordar un tiempo en el cual el motor estará operando (en nuestro caso fue 30min), así como el número de lecturas en ese lapso (se tomaron lecturas cada 2.5min). La prueba inicia con un voltaje de 5V de la fuente aplicado al motor por medio del sistema de control con PIC. En esta prueba se deja girar al rotor libremente durante 30 minutos, por lo que se toma una lectura para el instante 0s de nuestra prueba. A continuación se toma una lectura cada 2.5min hasta llegar al minuto 30, cuando esto sucede se apaga la fuente y entonces se incrementa el voltaje 1V. Después se vuelve a realizar el mismo procedimiento antes descrito. La prueba acaba cuando se llega a 10V. Los datos son mostrados en la figura 5-10.

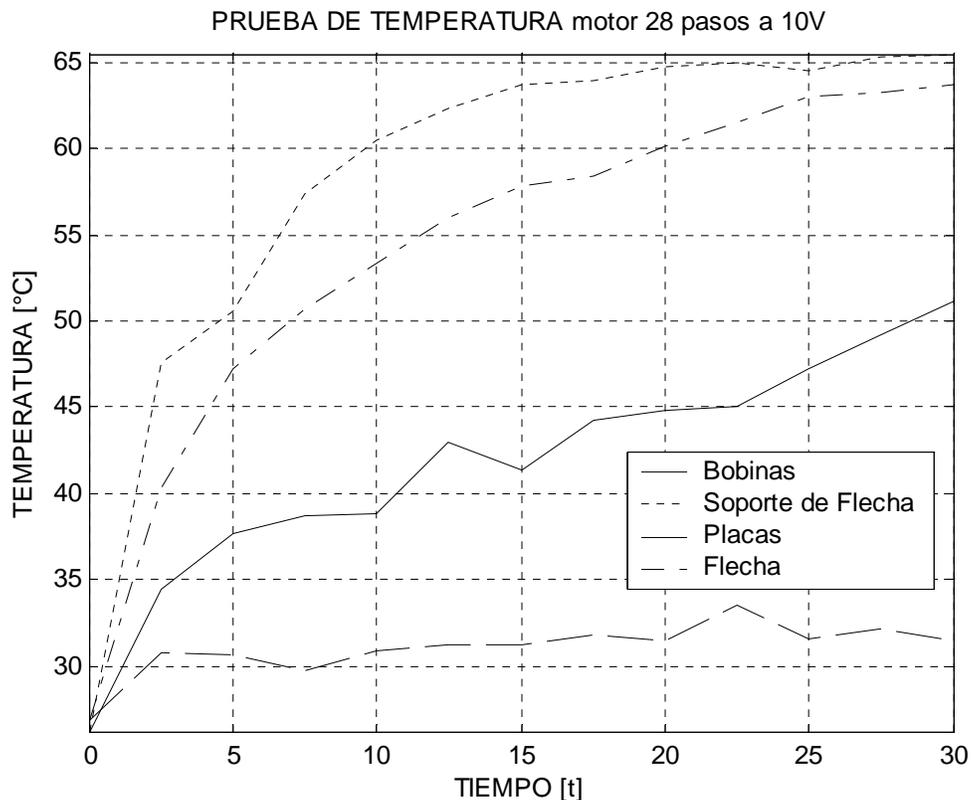


Figura 5-10 Gráfica de temperatura de motor de 28 pasos.

En la figura 5-10 se muestra que el nuevo motor presenta una mayor cantidad de temperatura en el soporte de flecha. En efecto

este resultado es lógico ya que se encuentra encerrado por los carretes y la placa, en cambio la placa de metal puede disipar mejor el calor debido a las propiedades que presentan los metales frente a estos fenómenos físicos y es casi de 15°C menos que la temperatura en el soporte de flecha. Por otro lado, en la figura anterior también se presentan las curvas del soporte de flecha y las placas. Como se observa, este motor trabaja con una temperatura menor a 55°C en sus bobinas durante su operación continua en un tiempo de 30 minutos y la temperatura en la flecha y su soporte se va estabilizando después de este tiempo.

Ahora bien en la figura 5-11, se muestran las curvas de temperatura del motor de 4 pasos. Tal como se ve ésta, los elementos del motor de 4 pasos se calientan más rápido que el de 28 pasos por ejemplo para el nuevo motor de 28 pasos se necesito de cerca de 28 minutos para alcanzar la temperatura de 50°C , en cambio en el motor de 4 pasos sólo bastó de menos de 2 minutos y medio para llegar a ese valor.

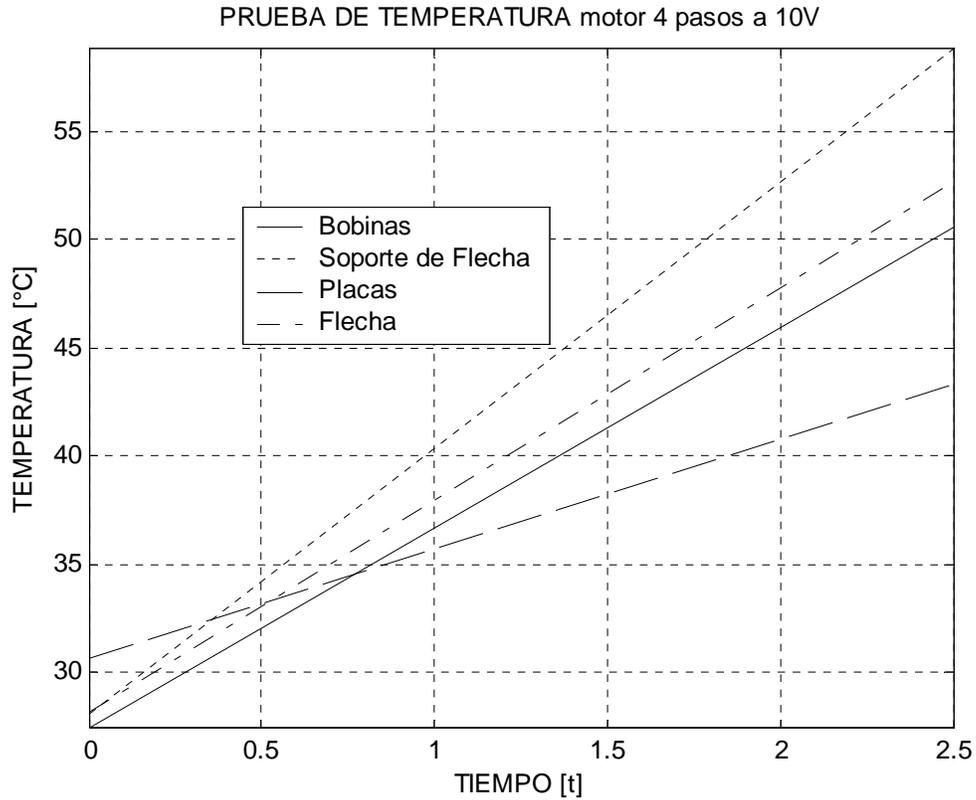


Figura 5-11 Gráfica de temperatura de motor de 4 pasos.

En la figura 5-12, se muestra otra gráfica de comparación de los motores a un voltaje de 10V donde se expone claramente que la curva del motor de 4 pasos crece más rápido que la del motor de 28 pasos. Como se sabe las principales causas que afectan el nivel de temperatura en un motor son: la histéresis, las corrientes parásitas y el calentamiento en sus arrollamientos debido a una ineficiente disipación.

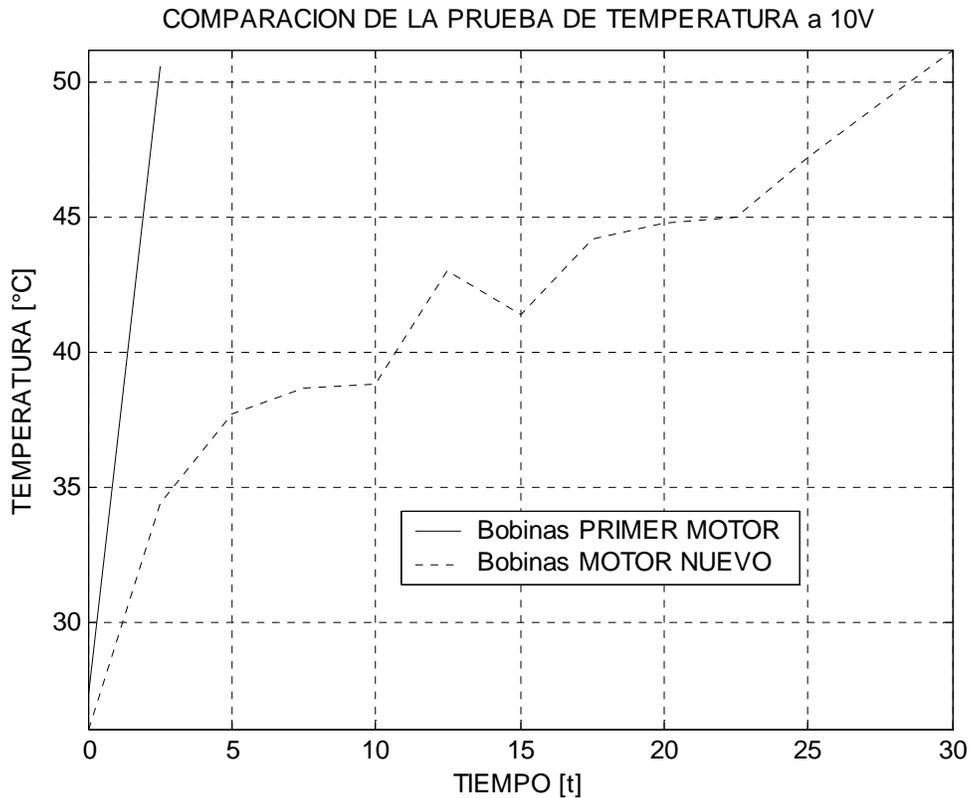


Figura 5-12 Comparación de la temperatura de los dos motores de imán permanente.

5.2 Motor Fuerza de Lorentz

La operación del prototipo de fuerza de Lorentz presentó diversas complicaciones de origen térmico y mecánico. Un ejemplo de éstas, fue que cuando se arrancó el motor, el rotor del mismo presentó fricción con respecto a los soportes de flecha ubicados en los costados, con lo cual no permitía que girara el rotor. Esto pudo solucionarse fácilmente, tan solo dejando un mayor espaciado entre soportes-rotor y agregando también bujes con aceite, sin embargo esto no resultó así. Otra complicación que presentó este diseño hizo que el rotor quedará bloqueado, aún con las anteriores modificaciones.

La temperatura en el interior del motor durante su puesta en operación, se incremento cuando se energizaron las fases de los embobinados, las piezas del motor comenzaron a calentarse demasiado a causa de que no tenían una ventilación adecuada, ni tampoco un lugar donde disipar el calor. El calentamiento de las piezas hizo que se dilatará el soporte de los estatores y por consiguiente, uno de los estatores hizo contacto con el rotor. El motor había sido fijado anteriormente sin posibilidad de desarmarse de nuevo como lo muestra la figura 5-13, motivo por el cual no pudo volver a colocarse a la distancia adecuada y por ello no pudieron realizarse pruebas.

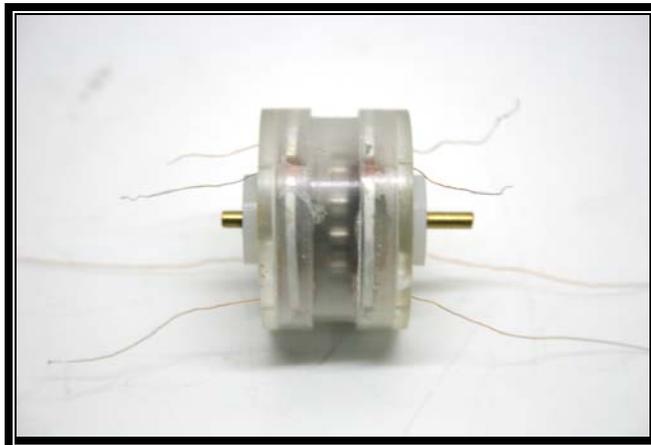


Figura 5-13 Motor de pasos fijado a sus tapas.

Aunque sólo una vez fue probado el motor de fuerza de Lorentz, se observó que la velocidad y el par resultaban ser muy bajos con respecto a otros prototipos, debido a que la fuerza de Lorentz sólo actúa en la pequeña área del embobinado en el estator y los imanes del rotor, con lo cual aun cuando se aumente el numero de vueltas, éste no puede actuar en una área más grande en el rotor, tal como se puede ver en la figura 5-14.

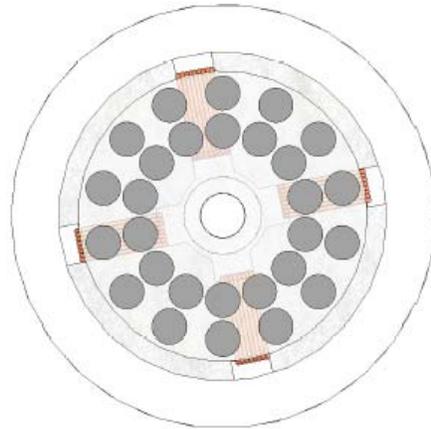


Figura 5-14 Forma de los imanes del rotor de fuerza de Lorentz.

Éste aspecto puede ser perfeccionado si se aumenta el área sobre el que actúa la fuerza de Lorentz, es decir aumentando el área del embobinado en el estator y de los imanes en el rotor.

Otra sugerencia acerca de este diseño, es que para hacer funcionar el motor de fuerza de Lorentz, es necesario realizar ranuras por las cuales pueda ventilarse el motor u ocupar otro tipo de materiales que disipen mejor el calor, además debe rediseñarse la forma en cómo las conexiones de los embobinados son conducidas del interior al exterior para no tener problema durante su mantenimiento si presentará un problema de operación en el futuro.

5.3 Motores para micromáquina

En resumen, se elaboraron 3 motores de pasos para los respectivos ejes X, Y, Z de una micromáquina herramienta. Su proceso fue más rápido partiendo de un primer prototipo. Debido a las dificultades presentadas por el diseño de un motor de pasos por fuerza de Lorentz se implementaron los motores de imán permanente en la transmisión de la máquina herramienta figura 5-15.

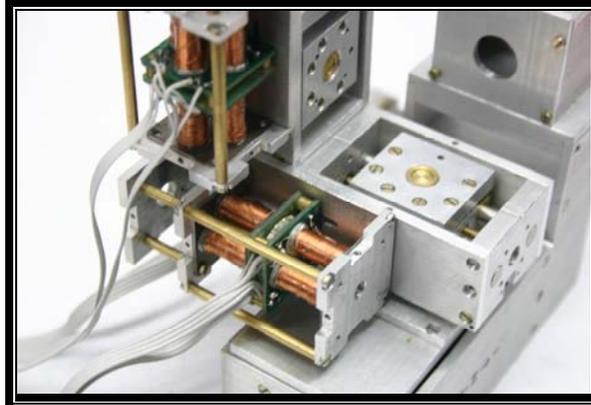


Figura 5-15 Motores alojados en las transmisiones de la micromáquina herramienta.

La transmisión de la maquina, ayuda al motor a dar un par mayor. En la figura 5-16 se muestra la micromáquina herramienta, la caja donde es montado el motor de imán permanente, la transmisión de la máquina y el mismo motor de pasos.

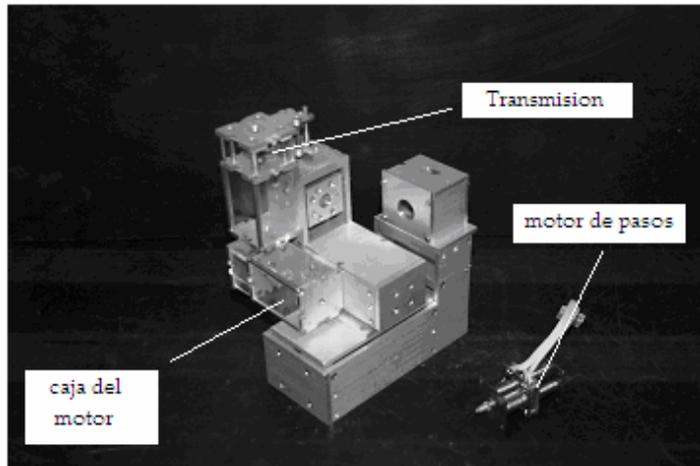


Figura 5-16 Micromáquina con motor de pasos de imán permanente.

Los sistemas de control para este tipo de motores pueden ser de distintas formas, ya sea con controladores y puentes H, como lo es el L297 y el L298N, por medio de un FPGA, por lógica digital con controladores lógicos programables, o alguna otra interfaz. Por el momento se tiene contemplado utilizar un PIC con puentes H para operar los tres motores de pasos montados en las transmisiones de la máquina herramienta.

Conclusiones

Esta tesis presenta el diseño y fabricación de dos motores de pasos con diferente principio de operación, para la aplicación de uno de ellos en una micromáquina.

Los resultados presentados en las pruebas revelaron que un nuevo motor de 28 pasos presentó un buen desempeño en cuanto par se refiere. Este pudo alcanzar valores de 5.985mN m para un valor de 0.35A comparados con los 4.4mN m para un valor de corriente de 0.4A de un motor de 4 pasos, además se cumplió con el objetivo de utilizar una corriente menor de 1A.

La resolución del motor aumentó debido a la inserción de más imanes en el rotor, pudiendo obtener 28 pasos en una revolución comparado con el motor anterior que sólo tiene 4 pasos por revolución.

Otro punto a considerar, es la reducción de la temperatura del motor. Este motor logró permanecer en una temperatura menor a los 55°C en sus bobinas en 10V, mientras que en otras partes la temperatura se elevó hasta 10 grados. Comparando esto con el hecho de que el motor de 4 pasos para el mismo voltaje tuvo un incremento mayor de 55°C durante dos minutos y medio demuestra que la disipación de calor en este nuevo motor es mejor que el de prototipos anteriores.

A pesar de los inconvenientes en el ensamble y la operación del motor de fuerza de Lorentz, se ha llegado con base en la experiencia

conseguida en esta tesis que este tipo de motores presentan una fabricación sencilla y un principio de funcionamiento interesante para ser implementados en una micromáquina herramienta, sin embargo se debe rediseñar algunos de sus elementos antes de que éste pueda ser utilizado.

Trabajo a Futuro

Los motores de pasos elaborados en este trabajo mejoraron aspectos con respecto a los anteriores motores de la GMM, sin embargo se deben considerar algunas debilidades que estos presentaron.

Un punto que se debe mejorar en los motores de imán permanente es la disipación de calor de sus partes. Como propuesta se pueden elaborar piezas que puedan disipar más el calor, por ejemplo las placas exteriores de lámina de acero pueden ser elaborados de un mayor grosor con la finalidad de conducir mayor calor.

Por último, el motor de fuerza de Lorentz presenta un ascenso considerable de la temperatura en su interior. Esto puede solucionarse proporcionando una ventilación adecuada. En el aspecto electromagnético, este diseño de motor de pasos puede mejorar su rendimiento de par si se incrementa el área de los embobinados y también consiguiendo imanes con un área semejante a la del embobinado.

Referencias

- [1] E. Kussul, T. Baydik, L. Ruiz-Huerta, G. Velasco and L. Kasatkina “Development of macromachine tool prototypes for microfactories” .
- [2] D.F. Warne “Electrical Engineer’s Handbook” NEWNES.
- [3] López Meyer Paulo “Diseño de un motor de pasos de alta potencia y propuesta de control adaptivo” Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería 2005.
- [4] Kenjo Takashi & Sugawara Akira “Stepping Motors and their microprocessor controls” Oxford Science Publications 2th Edition.
- [5] Gabriel A. Jaramillo Morales “Electricidad y Magnetismo” Editorial Trillas UNAM 1997.
- [6] Vicente Perez Amador Barron “Generadores, motores y transformadores electricos” Facultad de Ingenieria UNAM.
- [7] Katsuhiko Ogata “Ingenieria de Control” Prentice Hall 3th Edition.
- [8] Francis W. Sears “Fundamentos de Fisica II Electricidad y Magnetismo” Aguilar.
- [9] McClelland, W. (1927). The application of electricity in warships. JIEE 65, 829-71. (Related part: pp. 850-2.
- [10] Kiebertz, R.B. (1964). The step motor – The next advance in control systems. IEEE Transactions on Automatic Control. January, pp. 98-104.
- [11] Walker, C.L. (1919). Improvements in and connected with electro-magnetic step-by-step signalling and synchronous rotation. UK Patent 137, 150.
- [12] Chicken, C.B. and Thain, J.H. (1920).Electrical signalling apparatus. US Patent 1,353,025.
- [13] Feiertag, K.M. and Donahoo, J.T. (1952).Sybamolectric machine. US Pantent 2,589,999.
- [14] Ilene J. Busch – Vishnial “Mechanical Engineering Series. Electromechanical sensors and actuators” Edit.Springer.
- [15] “An introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)” PrimeFaraday Technology Watch.
- [16]Francisco Palacios, Fernando Remiro, Lucas J. Lopez “Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos” 2ª Edicion Edit. Alfa Omega.
- [17] John J. D’Azzo and Constantine H. Houppis, Stuart N. Sheldon “Linear control system Analysis and design with MatLab Fifth Edition” Marcel Dekker, Inc. 2003
- [18] William J. Yeadon, Alan W. Yeadon “Handbook of small electric motors” McGraw-Hill
- [19] <http://www.gmelectronica.com.ar/gm/graficos/catalogo/112A.jpg>