UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

T E S I S

METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR MOTORES A PASOS

P r e s e n t a :
Angélica Zamora Vázquez

Para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico
(Área Electrónica Analógica)

Dirigida por:
Dr. Alberto Caballero Ruiz
Dr. Leopoldo Ruiz Huerta

Ciudad Universitaria, Septiembre 2007

Este trabajo fue realizado en el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica dentro del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico en la Universidad Nacional Autónoma de México, con la tutoría del Dr. Alberto Caballero Ruiz y del Dr. Leopoldo Ruiz Huerta. Con apoyo del Dr. Gabriel Ascanio Gasca, y las aportaciones del Dr. Ernts Kussul. Apoyado por CONACYT a través de sus proyectos 52416-Y, 2005-C02-51843/A-1 y 50231 y PAPIME-EN102704.

Agradecimientos

A mis padres Carlos y Angélica, por todo su amor y apoyo incondicional, por toda la Fé y confianza depositada en mí, por sus enseñanzas y consejos con los que me han forjado, pues nada de lo que ahora soy, hubiera sido posible sin ustedes. Son mi inspiración y dedico a ustedes este trabajo. Los amo y siempre los llevo en mi corazón.

A mis hermanos Carlitos y Oscarín, y toda mi familia, quienes me han visto crecer y me han alentado a seguir adelante en momentos de adversidad. Así como, han compartido momentos de triunfo y alegría. Gracias, sigamos disfrutando y apoyándonos entre todos.

A Héctor, mi Hogar. Por todas tus sabias enseñanzas, por hacerme ver que todo tiene solución y no dejar que me ahogue en mis pensamientos, por saber escuchar, a veces, sin que necesite expresarme con palabras, por todo el apoyo y comprensión que me brindas, y en fin, por todo el amor con que nutres mi alma. Doy gracias a Dios por ponerte en mi camino. Te amo, eres mi Cielo.

A mis tutores y amigos Alberto y Leopoldo, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por todo su apoyo y enseñanzas durante gran parte de mi carrera, por impulsarme a mejorar como un profesionista que es **profesional**, pero sobretodo, por su gran paciencia y comprensión a lo largo de todos estos años. Muchas gracias por su amistad y confianza, no tengo palabras que puedan terminar de agradecer todo lo que han hecho por mi.

Al Sr. Mario, por sus enseñanzas acerca del uso de las máquinas herramienta en el taller, así como, por compartir su gran ingenio y experiencia, lo que fue fundamental para el desarrollo de este trabajo. Por su filosofía de “quitarse el *saco de las prisas* para comenzar a trabajar”. Muchas gracias por todo.

A mis amigos del Lab, Germán, Paul, Tere, Bogar, Gengis, Oscar, y todos los que forman parte del grupo, por los muy gratos momentos en su compañía. De verdad que el tiempo de trabajo es muy agradable y divertido con todos ustedes. ¡Gracias!

A mis amigos de la FI, quienes nos hemos apoyado en el camino para llegar a ser ingenieros, y al mismo tiempo, hemos entrañado una amistad que nos ha marcado para toda la vida. Muchas gracias por todo su apoyo, les deseo mucho éxito a lo largo de este arduo camino.

A mis sinodales, por sus aportaciones y comentarios, con los cuales ha sido posible la entrega de este trabajo.

Í N D I C E

Página

Introducción..... 1

CAPÍTULO 1.

ANTECEDENTES..... 4

Breve historia de los motores a pasos..... 6

Motores a pasos en México..... 6

Definición de motor a pasos..... 10

Motor de Reluctancia Variable (Motor RV)..... 11

Motor de Magneto Permanente (Motor MP)..... 14

Motor Híbrido (Motor H)..... 15

Cálculo de pasos por revolución..... 16

Motor Unipolar..... 17

Motor Bipolar..... 18

CAPÍTULO 2.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 19

Necesidades encontradas..... 19

Objetivo..... 20

Alcances..... 20

CAPÍTULO 3.

LOS MOTORES DEL GMM..... 21

Principio de operación..... 21

Motor de estator simple (MES)..... 21

Componentes que lo conforman..... 23

Circuito eléctrico..... 24

Circuito magnético..... 25

Planteamiento de Análisis del

Circuito Magnético del Motor de Estator Simple..... 26

Motor de Doble Estator (MDE)..... 35

Estructura..... 36

Circuito eléctrico..... 37

Circuito magnético..... 38

Motor de Fuerza de Lorentz..... 40

Página

Componentes que lo conforman..... 41

Principio de funcionamiento..... 42
CAPÍTULO 4.
METODOLOGÍA DE DESARROLLO
DE MOTORES A PASOS..... 45
4.1 Motor de Estator Simple
4.1.1 Diseño de los componentes del motor..... 48
4.1.2 Manufactura de los componentes del motor..... 49
4.1.3 Ensamble del motor..... 57
4.1.4 Prueba de funcionamiento..... 59
4.2 Motor de Doble Estator..... 62
4.2.1 Diseño de los componentes del motor..... 62
4.2.2 Manufactura de los componentes del motor..... 63
4.2.3 Ensamble del motor..... 66
4.2.4 Prueba de funcionamiento..... 68
4.3 Motor de Fuerza de Lorentz..... 70
4.3.1 Diseño de los componentes del motor..... 70
4.3.2 Manufactura de los componentes del motor..... 72
4.3.3 Ensamble del motor..... 75
4.3.4 Prueba de funcionamiento..... 77
Propuesta del sistema electrónico:
Etapa de control y de potencia..... 80
CAPÍTULO 5.
PRUEBAS Y RESULTADOS..... 85
Etapa de diseño en software CAD..... 85
Manufactura de algunas piezas..... 85
Ensamble del motor..... 86
Prueba de funcionamiento..... 87
CONCLUSIONES..... 88
TRABAJO A FUTURO..... 89
REFERENCIAS..... 91

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1.1. Microcentro de maquinado de mesa del GMM	7
Figura 1.2. Micropiezas fabricadas en el GMM	8
Figura 1.3. Motor de estator simple acoplado a una caja reductora de engranes	8
Figura 1.4. Motor a pasos del husillo del MCM	9
Figura 1.5. Motor de alta potencia	9
Figura 1.6. Sección de corte de un motor a pasos de tres fases de reluctancia variable y el arreglo de bobinas	12
Figura 1.7. Posición de equilibrio con una fase excitada	12
Figura 1.8. Las líneas curvas de flujo magnético crean un par	13
Figura 1.9. Transición del rotor en función del flujo magnético generado en los polos	13
Figura 1.10. Motor MP	14
Figura 1.11. Secuencia de pasos de un motor a pasos de magneto permanente	15
Figura 1.12. Rotor de un motor a pasos híbrido	16
Figura 1.13. Estructura de un motor RV de cuatro fases	16
Figura 1.14. Motor a pasos unipolar	17
Figura 1.15. Motor a pasos bipolar	18
Figura 3.1. Motor a pasos de estator simple	22
Figura 3.2. Alineación de las zapatas del motor de estator simple	23
Figura 3.3. Placa del motor de estator simple	23
Figura 3.4. Rotor del motor de estator simple	24
Figura 3.5. Conexión de los arrollamientos para formar el circuito eléctrico	24
Tabla 1. Secuencia de polarización del motor a pasos de estator simple	25
Figura 3.6. Alineación de los polos magnéticos del estator con los del rotor	25

	Página
Figura 3.7. Paso de flujo magnético a través del entrehierro formado por las zapatas del estator y los imanes del rotor	25
Figura 3.8. Circuito magnético debido a la excitación de una fase del estator	26
Figura 3.9. Núcleo del MES	28
Figura 3.10. Consideración de la zapara del núcleo como un embudo	28
Figura 3.11. Área 1 puesta en el plano cartesiano	29
Figura 3.12. Cálculo del A2.	30
Figura 3.13. Consideración de la longitud de arco media	30
Figura 3.14. Cálculo de la reluctancia del entrehierro	31
Figura 3.15. Cálculo de la reluctancia magnética de la placa	32
Figura 3.16. (a) Imán permanente. (b) Modelo equivalente de Norton. (c) Modelo equivalente de Thèvenin.	33
Figura 3.17. Líneas de flujo magnético entre las zapatas, los entrehierros y el imán permanente del rotor	34
Figura 3.18. Dimensiones consideradas para el cálculo de la reluctancia del núcleo	34
Figura 3.19. Circuito eléctrico equivalente	35
Figura 3.20	37
Figura 3.21. (a) Estructura final de un MDE. (b) Circuito eléctrico del MDE. Conexión entre bobinas.	37, 38
Figura 3.22. Imagen del rotor con los imanes orientados	38
Figura 3.23. Polarización del MDE al excitar una fase	39
Tabla 2. Secuencia de polarización de un motor a pasos de doble estator	40
Figura 3.24. Regla de la mano derecha	41
Figura 3.25. (a) Motor de Fuerza de Lorentz; (b) Vista en explosión del Motor de Fuerza de Lorentz	41
Figura 3.26. (a) Motor de fuerza de Lorentz sin energizar; (b) Motor de fuerza de Lorentz con la fase 1 energizada	43
Figura 4.1. Muestra de algunos de los motores a pasos desarrollados por el GMM	46
Tabla 3. Casos particulares de estudio de motores a pasos	46

desarrollados en el GMM.	
	Página
Figura 4.2. Diagrama explosivo del motor de estator simple	49
Tabla 4. Piezas que conforman al motor de estator simple.	49
Figura 4.3. Bobina empleada en el motor de pasos de estator simple	50
Tabla 5. Datos de distintos alambres magneto	50, 51
Figura 4.4 (a) Embobinado de los devanados del motor con ayuda del torno. (b) Bobina terminada	51
Figura 4.5. Soportes empleados en el motor de pasos de estator simple	53
Figura 4.6. Núcleo de la bobina empleada en el motor de pasos de estator simple	53
Figura 4.7. Rotor del MES. Plano del cuerpo del rotor e imagen del rotor completo	54
Figura 4.8. Rotor del motor de estator simple.	55
Figura 4.9. Construcción de los dientes del rotor de estator simple.	55
Figura 4.10. Buje de la flecha del motor de estator simple, dibujo y plano de características geométricas	56
Figura 4.11. Imagen y plano de los separadores	56
Figura 4.12. Dibujo y plano de un aro de conexión para el motor a pasos de estator simple	57
Figura 4.13. Pegado de los aros de conexión en los separadores.	57
Figura 4.14. Ensamble del estator del MES	58
Figura 4.15. Proceso final de ensamble del estator.	57
Figura 4.16. (a) Conexión de las bobinas a los aros de conexión del motor de estator simple. (b) Conexión de las dos fases del motor.	58, 59
Tabla 6. Parámetros establecidos para el alambre magneto AWG40 y las bobinas del MES.	59
Figura 4.17. Forma de onda de la señal de voltaje recibida por las fases del motor a pasos	60
Figura 4.18. Simulación en PSpice de la corriente promedio que atraviesa una fase del motor	61
Tabla 7. Piezas que conforman al motor de doble estator	64

	Página
Figura 4.19. (a)Motor de Doble Estator totalmente ensamblado. (b)Vista en explosión	64
Figura 4.20. Barreno central de los sujetadores donde se alojan los rodamientos	65
Figura 4.21. Dibujo y plano de las características geométricas del rotor del motor de doble estator	65
Figura 4.22. Dibujo y plano del núcleo para el motor a pasos de doble estator	66
Figura 4.23. (a) Ensamble de un estator (b) Pegado de las piezas	67
Figura 4.24. Colocación del rotor en ambos estatores	67
Tabla 8. Parámetros establecidos para el alambre magneto AWG40 y las bobinas del MDE.	68
Figura 4.25. Parámetro de diseño del rotor del motor de Fuerza de Lorentz	71
Figura 4.26. Parámetro de diseño de las bases	71
Tabla 9. Piezas que conforman al motor de Fuerza de Lorentz	72
Figura 4.27. Motor de Fuerza de Lorentz	72
Figura 4.28. Dibujo y plano de la características geométricas de una de las bases de motor de Fuerza de Lorentz	73
Figura 4.29. Cuerpo del rotor del motor de Fuerza de Lorentz	73
Figura 4.30. Sujetador del motor de Fuerza de Lorentz	74
Figura 4.31. Diagrama vectorial del MFL al polarizar una fase	75
Figura 4.32. Cilindro del cuerpo de estator del motor del Fuerza de Lorentz	75
Figura 4.33. Ensamble de los separadores en el cilindro	75
Figura 4.34. Alambrado de las bobinas del motor de fuerza de Lorentz	76
Figura 4.35. Propuesta de conexión del circuito eléctrico del motor de Fuerza de Lorentz	76
Figura 4.36. Ensamble de una de las bases del motor	77
Figura 4.37. Ensamble completo del motor a pasos de Fuerza de Lorentz	77
Figura 4.38. Diagrama vectorial del funcionamiento de una fase del motor de fuerza de Lorentz	78
Tabla 10. Parámetros establecidos para el alambre magneto	79

AWG30 y las bobinas del MFL.	
	Página
Figura 4.39. Diagrama de bloques del L297	82
Tabla 11. Configuración para los tres diferentes modos de giro del motor a pasos	83
Figura 4.40. Diagrama esquemático de la etapa de control y potencia unidas.	83
Figura 4.41. Diagrama esquemático de la etapa de control y potencia unidas independientes de un microcontrolador	84
Tabla 12. Prueba de funcionamiento del MES.	87

Introducción

En la actualidad, la búsqueda constante de la humanidad por mejorar el uso de espacios, consumo de recursos energéticos, minimización de la intervención de mano de obra para mejorar la calidad de vida del hombre, reducir al mínimo el consumo de materia prima, buscar la mejor optimización de procesos con el fin de hacerlos cada vez más eficientes y menos contaminantes, reducir los desechos de producción, reducir los tiempos de operación, entre otros retos; ha obligado a la ciencia y tecnología a avanzar a pasos agigantados conforme el tiempo sigue su curso y los recursos naturales comienzan a presentar escasez, en muchos de los casos considerados como no renovables. Sí, la toma de conciencia acerca de la situación de desequilibrio entre lo que consumimos y lo que regresamos a la naturaleza, ha hecho que el mundo de hoy se obligue a mejorar o a tratar de revertir el camino de gran consumo (natural y energético) que se siguió a lo largo de muchos años en el pasado.

La comunidad científica, por su parte, se ha esforzado por brindar a la sociedad alternativas para alcanzar dichos retos. Una buena mancuerna que se ha dado como resultado de la búsqueda de soluciones a problemas prácticos, es precisamente la de comunidad científica-industria. Éstos últimos se han visto en la necesidad de invertir grandes porciones de su capital en tecnología, convirtiéndose de esta forma en uno de los elementos más vitales para el desarrollo y avance tecnológico. En recompensa a ello, la industria ha logrado obtener mejores resultados y beneficios en sus procesos, lo que repercute directamente en la sociedad y el medio ambiente en general.

Alguno de los beneficios que surgen de la cooperación industrial a la sociedad es en el ámbito educativo, piedra angular en el desarrollo de tecnología y beneficio a la humanidad. El desarrollo de la técnica y la aplicación de la ciencia, convirtiéndose en tecnología, tiene lugar en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), específicamente en el Grupo de Micromecánica y

Mecatrónica (GMM), en el que se cuenta con este enfoque hacia el desarrollo de tecnología de punta.

Diversos prototipos desarrollados en el GMM, tales como el desarrollo de una Micro Máquina Herramienta (MMH) [1], un probador de válvulas cardiacas [5], entre otros, requieren como parte de su implementación y automatización actuadores que lleven a cabo movimientos precisos y controlables, los cuales deben tener características particulares afines al proyecto que se desarrolle. Es por esto que el GMM ha decidido tomar una línea de investigación dedicada al desarrollo de este tipo de actuadores, entre los cuales se tienen los de tipo electromagnético: motores a pasos.

El presente trabajo de tesis se avoca a proponer una metodología para el desarrollo de tres motores a pasos que se desarrollan en el GMM: 1) motor de estator simple, 2) motor de doble estator y 3) motor de fuerza de Lorentz. Este trabajo se desglosa en cinco capítulos. En el capítulo uno se plantean los antecedentes dentro del campo de desarrollo de actuadores, comenzando por un breve relato de cómo llegaron éstos al campo de la industrialización en el mundo, los diferentes tipos de actuadores que se han desarrollado hasta ahora, desde los de tipo neumático hasta los de tipo electromagnético, para concluir al tema de los motores a pasos. Se hablará del uso de este tipo de actuadores en algunos proyectos desarrollados en el GMM. Como marco teórico de los motores a pasos se hará una clasificación de acuerdo al tipo de sus componentes y se explicará su principio de funcionamiento, así como otra clasificación de acuerdo a la configuración de conexión de su circuito eléctrico.

En el capítulo dos se hace el planteamiento del problema a resolver, donde se analizan las necesidades encontradas y se plantea un objetivo preciso del trabajo de tesis y los alcances del mismo.

En el capítulo tres se deja sentado el principio de operación/funcionamiento de los tres motores a pasos con los que se ha trabajado hasta ahora en el GMM. En este capítulo se hace una descripción detallada de todos los elementos que conforman a cada motor, así mismo, del circuito eléctrico que conforman

algunos de sus elementos, y del circuito magnético. También se explican las debidas secuencias de polarización que debe darse a cada motor.

En el capítulo cuatro se propone una metodología para desarrollar los tres tipos de motores a pasos mencionados arriba. Dicha metodología (el caso general) se desarrollará paralelamente con tres casos de estudio (el caso particular) de motores a pasos de dimensiones conocidas. La metodología se divide en cinco pasos, uno de los cuales se llama “Manufactura de los componentes del motor”, en dicha sección se hacen las especificaciones generales de cada componente de cada motor, para después dar lugar al caso particular de las características dimensionales de cada una de las piezas de los motores. Otro de los pasos que se tratan en este capítulo es uno llamado “Diseño de los componentes del motor”, en el cual se explican algunos parámetros de diseño para algunos componentes. Además, se propondrá un sistema electrónico que sea capaz de controlar y dar la potencia necesaria para que los motores funcionen. Esta propuesta se basa en la búsqueda de la mayor sencillez de implementación de un sistema electrónico de control.

En el capítulo cinco, de pruebas y resultados, se hace una secuencia fotográfica de la metodología aplicada a uno de los motores tratados en este trabajo de tesis: El Motor de Estator Simple.

Por último, se presentan las conclusiones y una breve sección que sugiere el trabajo a futuro que puede complementar o mejorar el presente trabajo de tesis.

Capítulo 1
Antecedentes

La necesidad del hombre por mejorar, agilizar y hacer más precisos sus procesos (sea en el campo que sea), ha obligado la existencia de diversos actuadores para facilitar dichas tareas. Así mismo, se ha buscado una menor intervención del trabajo humano en ciertos procesos para mejorar la calidad y consumo de recursos de estos procesos, al mismo tiempo que se mejora la calidad de vida de la sociedad.

Como ejemplo de algunos casos particulares de procesos de control, se tiene que antiguamente el ajustar una válvula para mantener un nivel constante en un tanque, o el flujo de salida constante de una tubería, etcétera, se hacía de forma manual por alguna persona encargada de dichas tareas. En alguna parte de la historia, se aprendió que este control podía llevarse a cabo más fácil y exacta y precisamente usando aire presurizado en conjunto con actuadores, orificios, fuelles, entre otros dispositivos. Al tener retrasos de tiempo en la construcción de dispositivos neumáticos y controlar la mecánica de los sistemas, los controladores neumáticos se desarrollaron y fueron usados exclusivamente para controlar procesos industriales críticos por muchos años. Los controladores neumáticos continúan siendo preferidos para algunas aplicaciones [3].

A finales de los años 1950s, el estado de arte en el desarrollo de actuadores era tal que los retrasos y ganancias de tiempo podían ser más fácilmente configuradas usando tecnología electrónica [1].

Los actuadores llevan a cabo tareas útiles en respuesta a un comando o señal de control. La cantidad de trabajo que llevan a cabo y el gasto de energía que

requieren para realizar el trabajo deseado, depende drásticamente del método de impulsión. Estos métodos, en la área de los micro-actuadores, pueden ser divididos en seis categorías: eléctrico, magnético, térmico/fase, óptico, mecánico/acústico y químico/biológico [3]. Cuando se habla de actuadores de mayor escala, sin descartar los métodos de impulsión de escala micro, también se tienen otras clases de actuadores de tipo neumático e hidráulico.

Hablando de actuadores eléctricos se tiene una importante clase dentro de esta clasificación: los de tipo electro-magnético, cuya entrada es una señal de tipo eléctrico en forma de voltaje que crea una fuerza magnética, la cual produce movimiento mecánico sobre un rango limitado. Así el actuador magnético convierte la entrada de energía eléctrica en movimiento mecánico como salida [4].

Un ejemplo de estos actuadores electromagnéticos es el motor a pasos, cuya definición, según la BSi (*British Standards Specifications*), es: “Un motor a pasos es un motor de corriente directa sin escobillas cuyo rotor gira en incrementos angulares discretos cuando las bobinas de su estator son energizadas de manera programada. El giro del rotor ocurre debido a la interacción magnética de los polos del rotor y los polos secuencialmente energizados en el estator” [5].

Una explicación más detallada acerca de los diferentes motores a pasos que han surgido como consecuencia del avance tecnológico en este campo se dará más adelante.

Las aplicaciones de este tipo de actuadores pueden presentarse también en ámbitos tales como: en el campo de la óptica y la microscopía, donde se pueden emplear como parte de sistemas de posicionamiento automático con resolución micrométrica para realizar movimientos lineales (XY, XYZ), movimientos angulares, etc. Otro ejemplo de aplicación de estos motores se encuentra dentro del campo de la robótica de baja escala donde se requiere el uso de este tipo de actuadores para la automatización de manipuladores, robots sonda, líneas de transporte, etcétera.

Breve historia de los motores a pasos

El desarrollo de este tipo de actuadores se remonta al siglo XIX; cuando se les conocía únicamente como motores electromagnéticos, más no aún como motores a pasos. Dos importantes invenciones de motores de reluctancia variable ocurrieron en el siglo XX. El primero que se inventó fue un motor cuya estructura fue de polos salientes tanto en el estator como en el rotor, con el cual Walkel obtuvo una patente Británica en 1919. El segundo fue inventado por Chicken y Thain, esta máquina tenía una estructura de *sandwich* para producir gran par con volúmenes pequeños. Con esto se tuvo una patente Americana en 1920. [5]

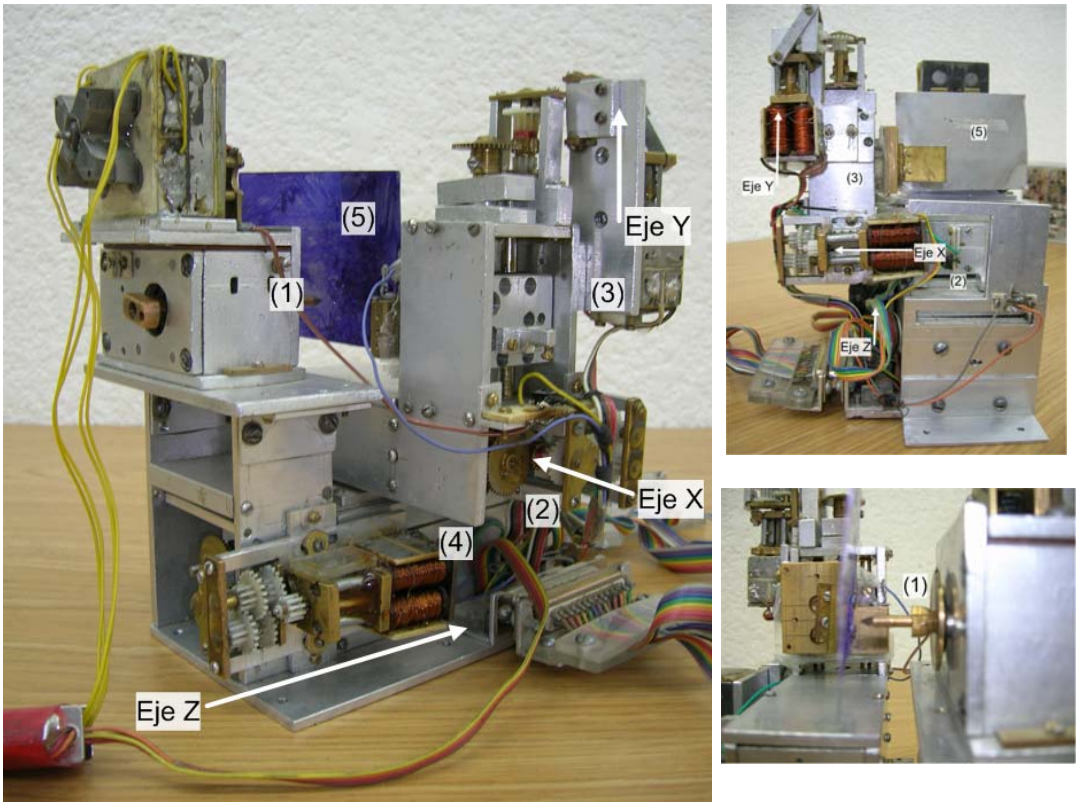
Sanyo Denki fue el primero en manufacturar motores a pasos en Japón en los inicios de los años 1970s. Los motores a pasos japoneses más finos fueron introducidos por Fujitsu Fanuc para aplicaciones en su famosa serie de sistemas de CNC (Control Numérico por Computadora) Fanuc. Estos motores fueron capaces de desarrollar velocidades más allá de 16,000 pasos/segundo, con par de hasta 100 kg-cm. Sin embargo, éstos fueron descontinuados en los años 80s cuando Fanuc los reemplazó por servomotores de CD de alto rendimiento en sus sistemas CNC. [4]

Motores a pasos en México

En este ámbito se puede destacar que el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en su afán por desarrollar tecnología mexicana, se ha adentrado en la investigación, diseño y construcción de este tipo de actuadores, pues una de sus principales líneas de investigación se dirige hacia el desarrollo de microequipo mecánico automatizado de bajo costo, enfocado a la producción de piezas y dispositivos con dimensiones que pueden ir de unos cuantos milímetros a dimensiones submilimétricas [1].

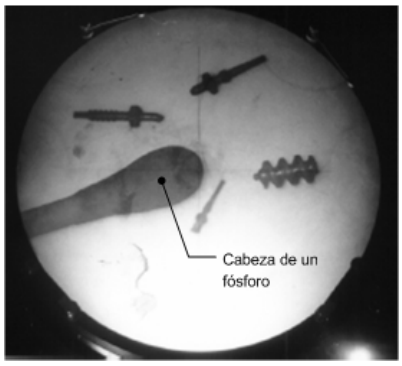
Para el diseño y desarrollo de dicho equipo, se propone emplear parte de los conocimientos existentes en el desarrollo de máquinas herramienta convencionales, lo cual permite, entre otras cosas, mantener el uso de

materiales empleados en el desarrollo de máquinas herramienta de tamaño convencional, sin necesidad de realizar investigaciones adicionales. El principio básico para el desarrollo de microequipo, enfocado a la manufactura de microdispositivos, se basa en la idea de desarrollar generaciones de microequipo donde cada generación tiene dimensiones menores que la generación anterior. La primera generación de microequipo es desarrollada con máquinas herramienta de tamaño convencional y el microequipo de cada siguiente generación es desarrollado con ayuda del microequipo de la generación que lo precede [1]. Uno de los resultados obtenidos dentro del GMM es un Micro Centro de Maquinado (MCM), cuya imagen se muestra en la figura 1.1.



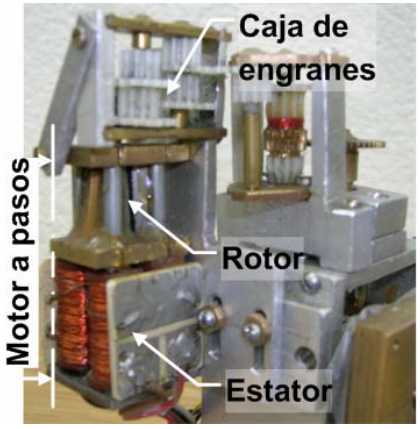
▲ **Figura 1.1.** Microcentro de maquinado de mesa del GMM. (1) Motor del husillo. (2), (3), (4) Motor del eje X, Y e Z respectivamente. (5) Materia prima a manufacturar.

Con este sistema es posible manufacturar micropiezas con detalles tridimensionales, tales como tornillos, engranes, detalles cónicos, etcétera; cuyas dimensiones van desde 15mm hasta 50µm. En la figura 1.2, se muestran algunos ejemplos de las piezas producidas con el MCM.



◄ **Figura 1.2.**
Micropiezas fabricadas en el GMM.

Un MCM consiste de diversas clases de dispositivos y mecanismos que en conjunto llevan a cabo tareas de máquinas herramienta (como taladrado, torneado, fresado, etcétera), pero a una escala de dimensiones menor a la que convencionalmente se utiliza, las dimensiones de este MCM son de 130x160x85mm; los ejes X y Z tienen un desplazamiento de 20mm y el eje Y de 35mm, y dada la necesidad de tener avances del orden de micrómetros, los actuadores pensados para desarrollar las funciones motrices de este MCM son motores a pasos, por ventajas que se presentarán más adelante. Gracias a ello y a una caja reductora de engranes (ver figura 1.3), la resolución de avance en los ejes que se logró fue de 1.88 μm por paso de motor [1].



▲ **Figura 1.3**
Motor de estator simple acoplado a una caja reductora de engranes. Este motor es el responsable del movimiento en el eje Y del MCM. (Ver figura 1 para mejor referencia del eje).

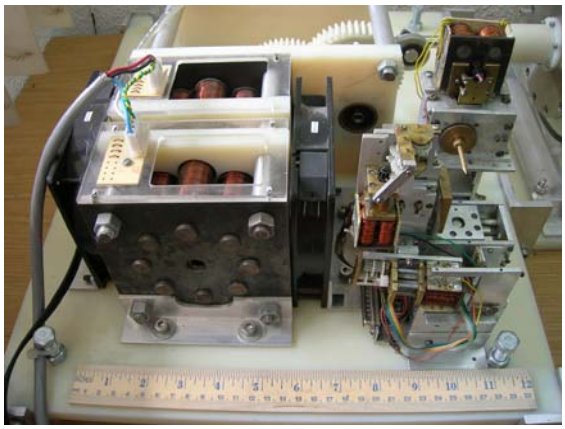
En este proyecto se incluyeron cuatro motores a pasos, tres para los ejes traslacionales y otro para el husillo. En la figura 1.4 se muestra éste último.

▲ **Figura 1.4.** Motor a pasos del husillo del MCM. Este motor tiene mayores dimensiones a las de los motores de los ejes. Así mismo tiene mayor par, consumo de corriente y de voltaje.

Comparando estos dos motores se puede apreciar que son de dimensiones diferentes y por ende de características diferentes de par, consumo de corriente, voltaje, impedancia por fase, etcétera. Sin embargo los cuatro son del mismo diseño, tienen un sólo estator y tienen el mismo tipo de rotor. Se detallará este diseño de motor más adelante (es el motor llamado de Estator Simple), junto con los otros dos tipos de motores a pasos que se diseñan en el GMM.

Otra línea de trabajo en la que se trabajó en el GMM se dirigió al campo de las ciencias médicas, al desarrollar un sistema duplicador de pulso cardiaco para evaluación de bioprótesis cardiacas [5], para el que se fabricó un motor de alta potencia, cuyas dimensiones son significativamente mayores a las de los motores del MCM, (del orden de 15 ó 20 veces mayor en tamaño). En la figura 1.5 se muestra una imagen de dicho motor junto al MCM.

Comparando las imágenes de las figuras 1.3 y 1.4 con la figura 1.5, se puede decir que los actuadores de ambos proyectos son diferentes en cuanto a su estructura y diseño, pues en la figura 1.3 y 1.4 se puede apreciar que los motores del MCM cuentan con un solo estator, en lugar de dos, como son para el motor del probador de válvulas (este segundo motor se llama de Doble Estator). Aunque el principio de funcionamiento es el mismo, las características electromagnéticas son diferentes.



▲ **Figura 1.5.** Motor de alta potencia. Diseño de doble estator para obtener mayor par.

El desarrollo de este tipo de actuadores de doble estator se propone también para aplicaciones donde se requiere un alto par. Por ejemplo, puede retomarse el prototipo de MCM anterior; si se buscara manufacturar materia prima dura como acero con este MCM, se requeriría de actuadores de alta potencia como el del probador de válvulas, de lo contrario el manejo de material se limitaría sólo a materiales blandos como el latón, acrílico, fenolica, etcétera. Y es en este tipo de avances en los que se sigue trabajando en el GMM, diseñando y creando nuevos prototipos de MCM.

Es en función a lo anterior que el GMM se ha visto en la necesidad de desarrollar actuadores con características de funcionamiento y dimensiones acordes con la aplicación requerida en cada uno de los proyectos desarrollados. Se busca conocer y aplicar el principio de funcionamiento de estos motores, teniendo como ventaja la libertad de diseño y construcción de los mismos. Al construirlos por propia cuenta se busca también, la reducción de costos. Si bien es cierto que el costo inicial de desarrollo puede ser alto debido a la curva de aprendizaje, aunado al *costo de la inexperiencia* (uso inadecuado o conocimiento nulo de herramientas, materiales, etcétera), también es cierto que el uso de una metodología puede mejorar el proceso de desarrollo de los motores a pasos, y con ello disminuir el costo de fabricación de los mismos. En el mayor número de casos, se prefiere esto a usar motores comerciales que no siempre cumplen con las especificaciones requeridas por el proyecto en el que se planea usar algún motor a pasos.

Para seguir adentrándose en el ámbito de los motores a pasos, será necesario considerar algunos conceptos básicos dentro del marco teórico, esto se hace a continuación.

Motores a Pasos: Como se ha mencionado anteriormente, los motores a pasos son motores eléctricos que rotan mediante pasos discretos. Este tipo de motores son comúnmente empleados en aplicaciones tales como, impresoras de inyección de tinta, máquinas de control numérico (CNC), etcétera. Sus características de funcionamiento los hacen ideales para este tipo de aplicaciones.

Dentro de las características que hacen al motor a pasos ideal para este tipo de aplicaciones se tienen las siguientes:

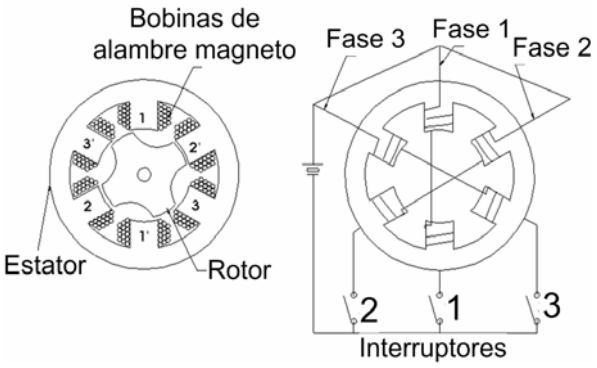
1) Los motores a pasos giran en incrementos cuantificados o pasos. Mientras que el motor funcione dentro del marco de las especificaciones de par dadas, la posición de la flecha es conocida todo el tiempo sin la necesidad de un mecanismo de realimentación.
2) Este tipo de motores no cuentan con escobillas, por lo que son más confiables.
3) Los motores a pasos giran a una velocidad fija a pesar de la carga, mientras que ésta no exceda el par nominal del motor.
4) Los motores a pasos tienen la capacidad de mantener la flecha fija en un estado por un tiempo determinado por el usuario [6].
Los motores a pasos pueden ser clasificados en varios tipos, de acuerdo a la estructura de los mismos y principio de operación. La clasificación por estructura da lugar a tres diferentes tipos de motores:

- Motor de Reluctancia Variable (motor RV)
- Motor de Magneto Permanente (Motor MP)
- Motor Híbrido (Motor H)

De acuerdo a la forma de excitación de las fases de los motores, se pueden formar dos grupos para su clasificación. Estos son: Motores unipolares y bipolares.

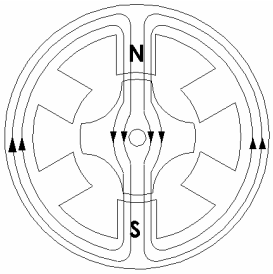
Motor de Reluctancia Variable (Motor RV)

En este tipo de motores, el rotor y el estator normalmente están hechos de acero de silicio laminado, aunque los rotores de acero de silicio sólido son usados extensamente. Tanto los materiales del rotor como los del estator deben ser de alta permeabilidad magnética, y ser capaces de permitir el paso de grandes cantidades de flujo magnético a través de ellos, incluso si la fuerza magnetomotriz aplicada es pequeña. En la figura 1.6 se muestra una ilustración del motor y la forma como se encuentran relacionas las bobinas del estator.



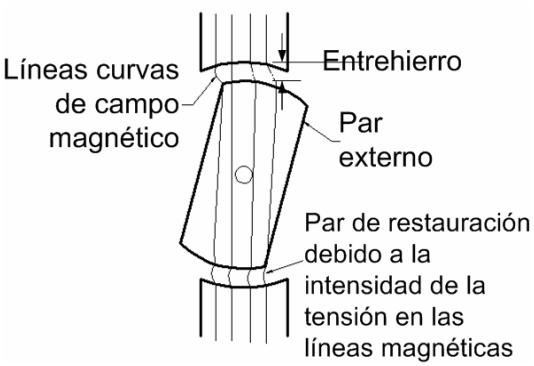
◄ **Figura 1.6**. Sección de corte de un motor a pasos de tres fases de reluctancia variable y el arreglo de bobinas.

Asumimos que los dos dientes del estator en una fase tienen polaridades opuestas. Por lo tanto los dientes 1, 2 y 3 forman el polo norte y los dientes 1', 2' y 3' el polo sur cuando las fases están excitadas. Si se aplica corriente a la fase 1 (F1), el flujo magnético ocurrirá como se ilustra en la figura 1.7. El rotor se posicionará de manera que, cualesquiera dos de sus cuatro dientes, y los dientes 1 y 1' del estator se alinearán. De esta manera cuando los polos del rotor y del estator están alineados, la reluctancia magnética se minimiza, y este estado mantiene una posición de equilibrio.



▲ **Figura 1.7**. Posición de equilibrio con una fase excitada.

Si el rotor tendiera a alejarse de la posición de equilibrio debido a la aplicación de un par externo aplicado a la flecha del rotor, un par de recuperación se generará como se muestra en la figura 1.8. En esta figura el par externo se aplica para girar al rotor en sentido de las manecillas del reloj o sentido horario (SH), y el rotor se desplaza en la misma dirección. Esto da como resultado el encorvamiento de las líneas de flujo magnético, tanto en las esquinas de los polos de rotor como del



▲ **Figura 1.8.** Las líneas curvas de flujo magnético crean un par.

estator. Como se sabe de las Leyes del Electromagnetismo de Maxwell, las líneas del flujo magnético tienden siempre a ser tan cortas y rectas como sea posible (como ligas elásticas). En la figura 1.8 se observa este efecto en las orillas de los dientes, creando un par en sentido antihorario (AH), que restaura la alineación de los dientes del rotor con los de estator.

Como se puede ver en la misma figura, cuando los polos del rotor y del estator no están alineados en la fase excitada, la reluctancia magnética es grande. El motor RV funciona de manera tal que la reluctancia magnética tiende a ser siempre mínima. Veamos que pasa cuando la fase 1 está apagada y la fase 2 está energizada. La reluctancia del motor vista desde la fuente de CD se ve incrementada justo después de que se lleva a cabo la operación de los interruptores. Y se puede observar (al mirar el punto de referencia en el rotor) de la figura 1.9 que el rotor girará un ángulo de 30° en sentido anti-horario (AH) para minimizar de esa manera la reluctancia.

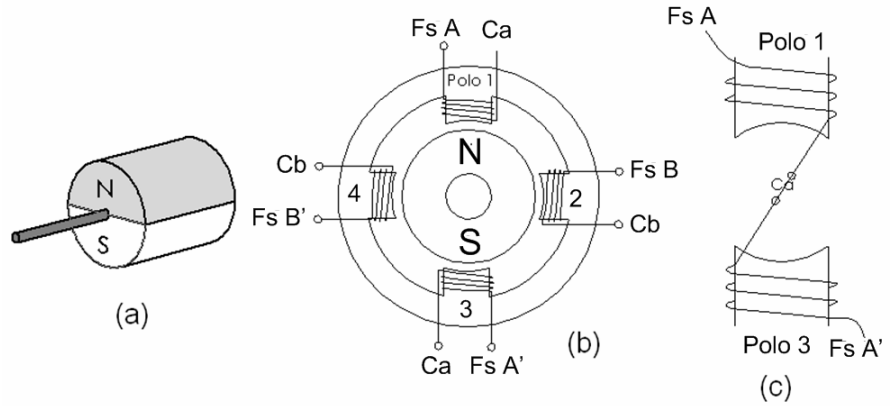
▲ **Figura 1.9.** Transición del rotor en función del flujo magnético generado en los polos.

Algunos de los parámetros que deben considerarse para los motores RV son:

a) El entrehierro debe ser lo más pequeño posible.
b) Para tener un ángulo de paso más pequeño, se debe incrementar el número de dientes del rotor y del estator.

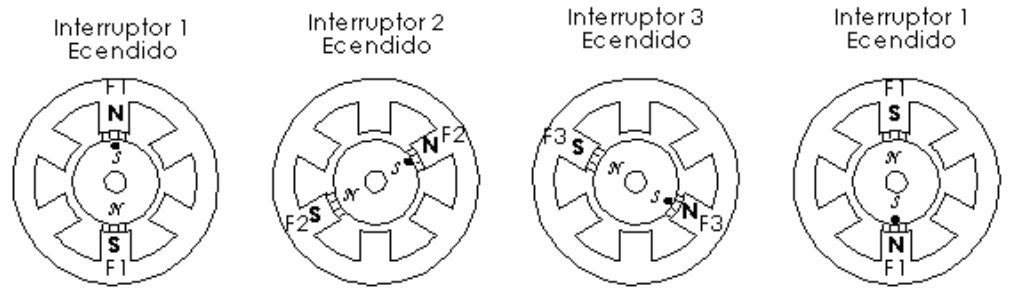
Motor de Magneto Permanente (Motor MP)

En este tipo de motores se emplea un rotor de imán permanente en forma cilíndrica (ver figura 1.10a) y un estator formado por cuatro polos (ver figura 1.10b). Los polos están relacionados mediante dos fases de igual manera que en los motores RV (ver figura 1.10c). Las terminales Ca y Cb denotan que existe conexión común entre ellas.



▲ **Figura 1.10.** Motor MP. (a) Rotor cilíndrico (b) Núcleo del estator y arreglo simbólico de las bobinas (c) Conexión de las bobinas para formar las fases.

Otra diferencia de gran importancia de los motores MP es la secuencia de la polaridad que deben tomar los polos de su estator, pues en este caso su principio de funcionamiento no es que las líneas de flujo magnético entre polo y polo busquen el camino de menor reluctancia a través del rotor; sino que en este caso, la fuerzas naturales de atracción y/o de repulsión de polos magnéticos tanto del rotor como del estator producen el movimiento en pasos del rotor. En realidad, sólo es cuestión de mantener un orden. Si consideramos nuevamente la forma como se polariza un motor RV (figura 1.9) es posible apreciar que en este tipo de motores la polaridad de sus fases no resulta importante, el norte puede estar intercambiado por el sur o viceversa, y su funcionamiento seguiría siendo el mismo. En la figura 1.11 se presenta parte de las secuencia de polarización de un motor MP.



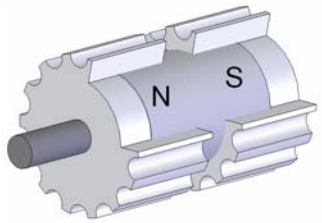
▲ **Figura 1.11.** Secuencia de pasos de un motor a pasos de magneto permanente. Observar punto de referencia en el rotor (•).

En el primer caso los dientes del rotor quedan sujetos con los del estator debido a las fuerzas de atracción que ejercen sus respectivos polos magnéticos, debido a esto, se puede deducir que el par producido por un motor MP es mayor que el producido por un motor RV.

Motor Híbrido (Motor H)

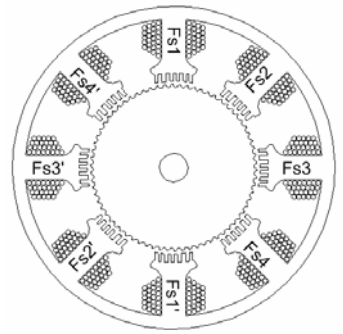
Este término se deriva del hecho de que este motor opera bajo los principios de operación del motor RV y de MP, para lograr un ángulo de paso pequeño y un par grande con dimensiones pequeñas. La estructura del núcleo del estator es la misma, o es muy parecida, a la del motor RV discutido anteriormente. La característica importante de este motor radica en la estructura de su rotor.

El rotor del motor H es multidentado, tal como lo es el motor RV y contiene un imán magnetizado axialmente concéntrico al eje de la flecha de motor. Los dientes en el rotor proveen un camino que auxilia el camino del flujo magnético en el entrehierro. El imán permanente concéntrico incrementa las características de par de detención, estático y dinámico del motor cuando se compara con el motor RV y el MP. En la figura 1.12 se presenta una ilustración del rotor de un motor H.



▲ **Figura 1.12.** Rotor de un motor a pasos híbrido.

En la actualidad existen comercialmente motores con ángulos de paso que son mucho menores de los que hasta el momento se han mencionado. Con la figura 1.13 se muestra un ejemplo:



◄ **Figura 1.13.** Estructura de un motor RV de cuatro fases: el número de dientes en el rotor es de 70, los pasos por revolución son 280, y el ángulo de paso es 1.28°.

Cálculo de pasos por revolución

Para calcular del número de pasos por revolución y el avance angular por paso, se tienen expresiones mostradas en las ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3:

$$S = mN_r \qquad \text{Para motor RV} \qquad (1.1)$$

$$S = 2mN_r \qquad \text{Para motor MP} \qquad (1.2)$$

$$\theta_s = 360 / S \qquad (1.3)$$

Donde:

S: número de pasos por revolución

m: número de fases

N_r: número de dientes del rotor

θ_s: ángulo de paso (en grados)

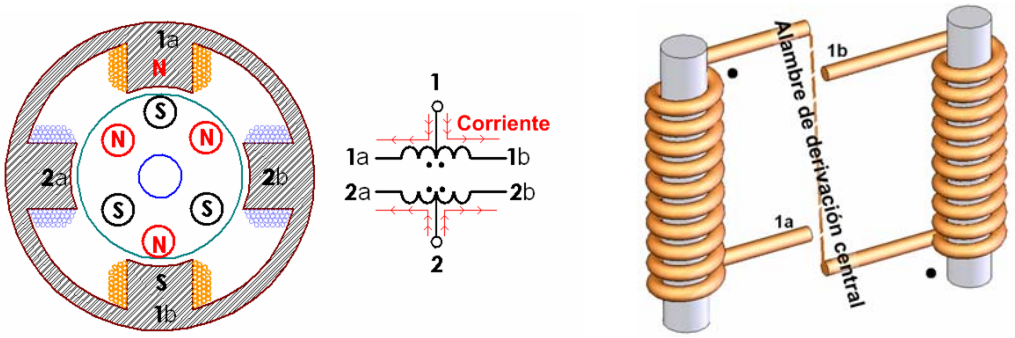
De acuerdo a la configuración de conexión entre las bobinas de las fases de los motores, se pueden formar dos grupos para su clasificación. Estos son: Motores unipolares y bipolares. Ello repercute en la forma en que se excitan las fases de cada tipo de motor. La información contenida en este trabajo de tesis, se limitará a explicar en qué difieren una configuración de la otra, y no profundizará en como deben ser las señales que corresponden a cada uno. En el GMM se desarrollan motores de tipo bipolar, y por ello, se explicará más adelante la forma de excitación este tipo de motores[1].

[1] En caso de que se busque mayor profundidad del tema, la referencia (7) es una fuente recomendable.

Motor Unipolar

Los motores a pasos unipolares (MPU) se componen de dos bobinas, cada una con derivación central. Las derivaciones centrales se pueden tomar fuera del motor como dos cables separados (como se muestra en la figura 1.14), o pueden ser conectados uno con el otro internamente y se llevan fuera del motor como un solo cable. Independientemente del número de cables, los MPU se manejan de la misma manera. Los cables de derivación central se conectan a la fuente de alimentación y las terminales de las bobinas se conectan mediante interruptores para generar las secuencias requeridas.

La figura 1.14a muestra un motor MP de tipo unipolar con resolución de 30° por paso. Las bobinas 1 y 2 se distribuyen entre los polos superior e inferior; y los polos izquierdo y derecho del motor respectivamente. El rotor es de seis polos de magneto permanente [8].



(a) (b)

▲ **Figura 1.14.** Motor a pasos unipolar.

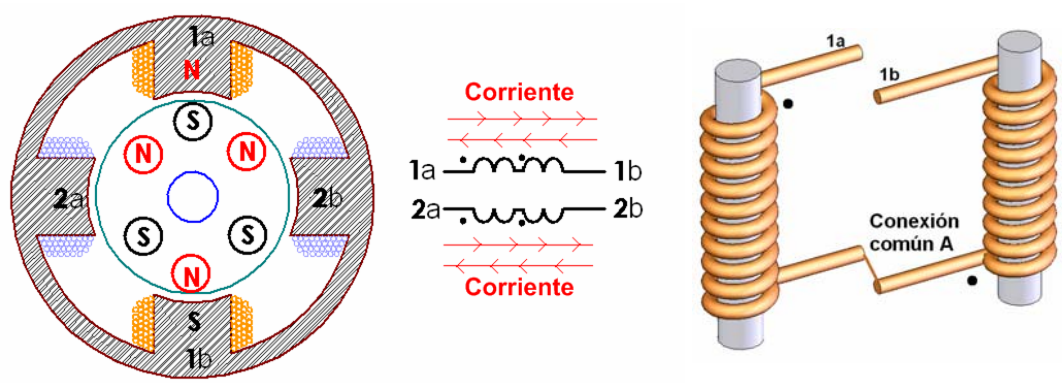
La línea entrecortada que une los extremos de las bobinas, mostrada en la figura anterior, representa la unión entre estos dos alambres. Los puntos en los extremos de las bobinas indican el extremo donde se inicia el embobinado.

Motor Bipolar

Los motores a pasos bipolares (MPB) están compuestos por dos fases y tienen cuatro cables. La ventaja de no tener derivaciones centrales en la fase es que la corriente fluye a través de toda la fase en lugar de sólo la mitad, tal como

sucede en los Motores MPU. Como resultado de esto, los motores bipolares producen un mayor par que los unipolares. El inconveniente de los MPB, comparados con los MPU, es que se requiere de un control más complejo.

La corriente eléctrica fluye de manera bidireccional en las bobinas de un motor bipolar. Esto requiere el cambio de polaridad de cada una de las bobinas. Como se muestra en la figura 1.15, la corriente fluye de izquierda a derecha en la fase 1 cuando 1a es positivo y 1b es negativo; mientras que, cuando la polaridad de la fase 1 se invierte, la corriente fluirá en dirección contraria.



▲ **Figura 1.15.** Motor a pasos bipolar.

Capítulo 2 Planteamiento del Problema

Los prototipos de motores creados en el GMM han sido desarrollados, probados y utilizados en diversos proyectos realizados por los académicos, estudiantes de servicio social, tesistas (de licenciatura, posgrado) y estudiantes asociados. Hasta ahora, el conocimiento concerniente al desarrollo de estos prototipos ha sido transmitido de forma individualizada, de persona a persona, de quien ya tiene experiencia a quien necesita adquirirla. No se tiene documentación formal respecto al proceso de desarrollo de ninguno de los tipos de motores que se fabrican en el GMM. Actualmente cuando un estudiante se incorpora al equipo de trabajo del GMM para desarrollar algún proyecto asignado, el proceso de enseñanza aprendizaje (del desarrollo de los actuadores específicos para su proyecto) puede llegar a ser lento, poco estructurado, además de que se tiene total dependencia de alguien con experiencia y conocimiento en el tema. Es por ello, que esta propuesta busca generar una herramienta capaz de transmitir dicho conocimiento en forma sencilla; sin ir más allá de los motores desarrollados en el GMM, y bien estructurada en sentido teórico y práctico. Plasmando la experiencia adquirida por el GMM, y la de la autora, durante el proceso de desarrollo de motores a pasos propuestos en el presente trabajo de tesis.

Necesidades encontradas

- ⇒ Plasmar el marco teórico de los motores a pasos, sus diversos tipos, principio de funcionamiento, modo de funcionamiento de acuerdo a la configuración de conexión, etcétera.

- ⇒ Describir el principio de funcionamiento de los tres diseños de motor a pasos desarrollados en el GMM (motor de estator simple, de doble estator y de fuerza de Lorentz).
- ⇒ Desarrollar una herramienta que guíe en los pasos para construir un actuador, desde la etapa de diseño, hasta la etapa de prueba de funcionamiento en marcha.
- ⇒ Plasmar los contratiempos que pueden surgir a lo largo del desarrollo total de cualquier actuador, y así mismo, proponer una solución. Pues técnicamente, la metodología para desarrollar un motor a pasos es “simple y plana”, pero en la práctica se presentan diversos problemas a resolver.
- ⇒ Proponer un método para probar el funcionamiento de estos actuadores, el cual sea sencillo y fácil de implementar, pues se busca que no sea necesario tener fuertes bases de conocimientos de electrónica para poner en marcha un actuador de este tipo. Esto es debido a que este trabajo va dirigido a todo aquel que busque desarrollar un actuador para un fin determinado.

Objetivo

Crear una herramienta que permita diseñar, manufacturar, ensamblar y probar los tres tipos diferentes de motores a pasos.

Alcances

- ⇒ Cubrir el desarrollo de tres motores a pasos: Motor de Estator Simple, Motor de Doble Estator y Motor de Fuerza de Lorentz.
- ⇒ Proponer una metodología para la manufactura y ensamble de los tres anteriores.
- ⇒ Proponer el sistema eléctrico de la etapa de potencia y de control para los mismos.

Capítulo 3
Los Motores del GMM

En este capítulo se describen las características particulares de operación de tres tipos de motores que se desarrollan en el GMM; por lo tanto dichas características corresponden a casos particulares de diseño.

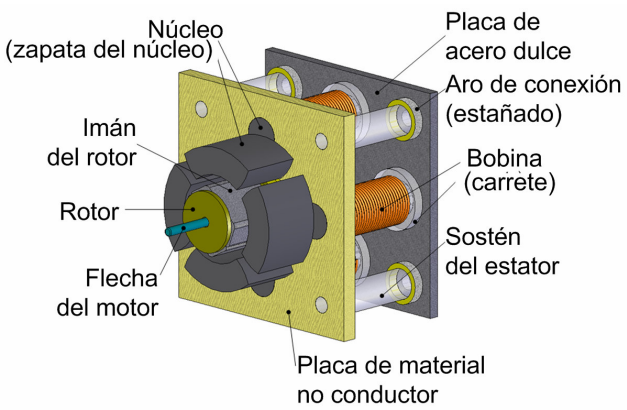
Principio de Operación

En el GMM se desarrollan motores a pasos basados en tres diseños diferentes: Motor de Estator Simple, Motor de Doble Estator y Motor de Fuerza de Lorentz, el nombre de éste último hace referencia al principio de funcionamiento con el que trabaja. Una característica particular de estos motores es que todos son de tipo bipolar. Esto es debido a que comparados con los motores unipolares, un motor bipolar puede lograr un mejor par [7]. Otra particularidad de estos motores es que todos ellos tienen magneto permanente en su rotor, lo que los convierte en motores de tipo MP.

Motor de Estator Simple (MES)

Este tipo de motor fue el empleado, entre otros proyectos, para la automatización del prototipo de MCM mostrado en el capítulo 1. Para una

explicación clara de la estructura total del motor partiremos de un modelo tridimensional presentado en la figura 3.1.



◄ **Figura 3.1.** Motor a pasos de estator simple.

Existen tres aspectos que se tienen que comprender para estar familiarizado con el funcionamiento de este motor, los cuales son: 1) la disposición de los componentes que lo conforman; 2) la configuración y funcionamiento de su circuito eléctrico; y por último, 3) el funcionamiento del circuito magnético.

Para encontrar el número de pasos por revolución del motor mostrado en la figura 3.1 se emplea la ecuación 1.2. Para este caso el rotor tiene dos imanes colocados a 180º uno del otro que pueden ser considerados como sus dientes y dos fases, por lo que:

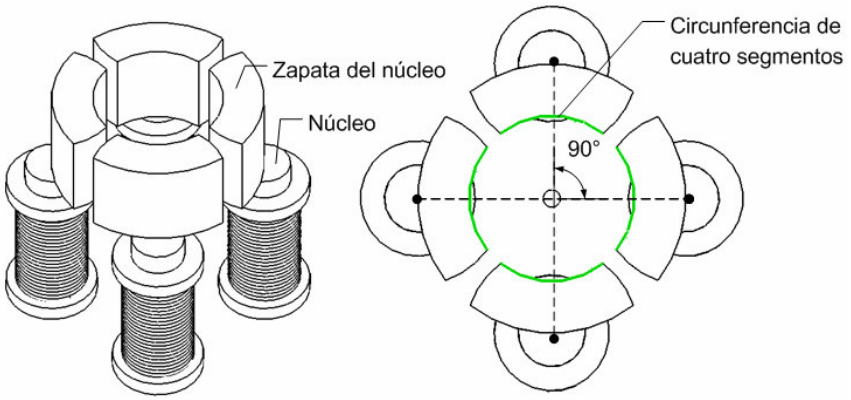
$$S = 2*2*2 = 8 \ \textit{medios pasos}$$

El motor presentado en este apartado tiene una resolución de ocho medios pasos por revolución, lo que permite un desplazamiento de 45º por paso. En caso de pasos completos se tienen cuatro pasos por revolución con un desplazamiento angular de 90º por paso.

Componentes que lo conforman

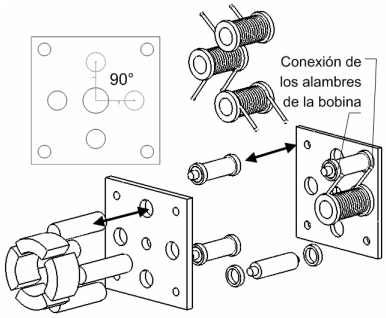
Las dos partes fundamentales en las que se divide el motor son el estator y el rotor. El estator está conformado principalmente por cuatro bobinas y sus

respectivos núcleos hechos con material ferromagnético. Estas bobinas están colocadas a una distancia equidistante del centro del motor, y a 90º una de la otra. La forma especial de las zapatas de los núcleos de las bobinas hace que éstas se coloquen de manera que formen una circunferencia no continua de cuatro segmentos, ver figura 3.2.



▲ **Figura 3.2.** Alineación de las zapatas del motor de estator simple.

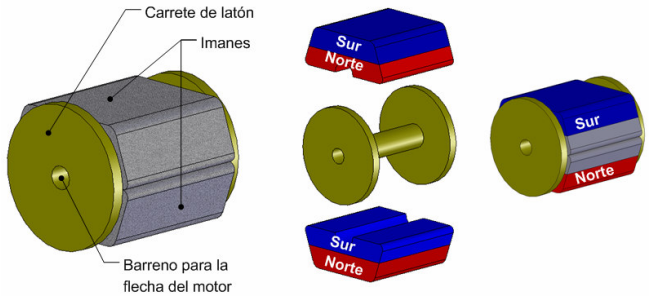
Para dar una armadura al motor, se usan dos placas que son geométricamente idénticas. Éstas sujetan a las bobinas, insertando sus núcleos en los barrenos de dichas placas, las cuales también tienen un barreno en el centro que es por donde pasa un buje que servirá como guía de la flecha del motor. Así mismo, este par de placas tienen barrenos en las esquinas donde van colocados cuatro soportes laterales, que además de dar firmeza a la armadura del motor, auxilian a la conexión de las bobinas para formar las fases del motor (ver figura 3.3). Las placas son, una de material no conductor (acrílico, fenolica, baquelita, etc.), y la otra de acero dulce.



▲ **Figura 3.3.** Placa del motor de estator simple.

Las bobinas están conformadas por un núcleo de acero *cold rolled*, un carrete y alambre magneto. Las dimensiones de estos componentes y el calibre del alambre están en función de las características de consumos de corriente y par que se busquen para el motor que se desee desarrollar.

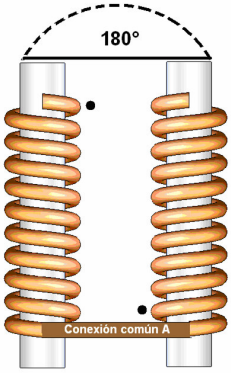
Por otro lado, el rotor del MES está conformado por un carrete de latón y un par de imanes de polaridad axial, con el fin de tener en el centro del rotor dos polos opuestos que se unen con el propósito de tener dos polos salientes de distinta polaridad que funcionarán como los dientes del rotor. Esto se aprecia en la figura 3.4.



▲ **Figura 3.4.** Rotor del motor de estator simple.

Circuito Eléctrico

El circuito eléctrico del MES está definido por la configuración de la conexión que se tiene entre las bobinas. Las bobinas de los motores desarrollados en el GMM son conectadas de acuerdo a una configuración de tipo bipolar y, en la mayoría de los casos, se forman dos fases. Cada fase está formada por las dos bobinas que se encuentran a 180º una de la otra. Para llevar a cabo el alambrado de las fases se considera que ambos núcleos deben generar campos complementarios. Ver figura 3.5.



▲ **Figura 3.5.** Conexión de las bobinas para formar el circuito eléctrico.

Circuito Magnético

Al polarizar cada fase, se manifiestan dos polos opuestos en el estator, lo que obliga al rotor a orientarse de acuerdo a la fuerza de atracción de sus respectivos polos, esto se aprecia en la figura 3.6. La secuencia de polarización se observa en la tabla 1.

	Paso	p1	p2	p3	p4	p5
Fase I	Terminal 1a	+	sp	—	sp	+
	Terminal 1b	—	sp	+	sp	—
Fase II	Terminal 2a	sp	—	sp	+	sp
	Terminal 2b	sp	+	sp	—	sp

▲ **Tabla 1.** Secuencia de polarización del motor a pasos de estator simple.

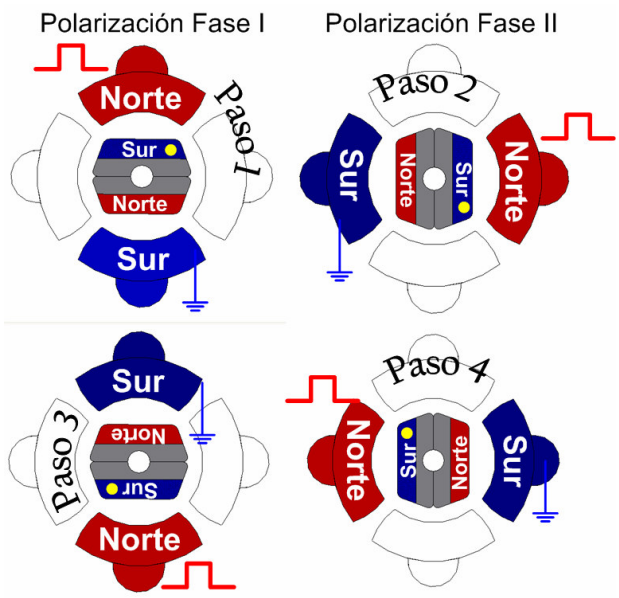
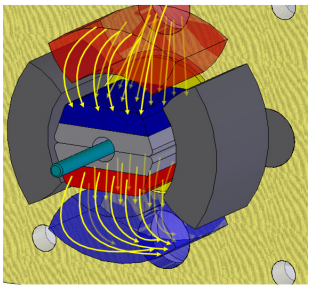


Figura 3.6. ►

Alineación de los polos magnéticos del estator con los del rotor. Ver punto de referencia en el rotor (●)

El circuito magnético se cierra con los imanes del rotor y los polos del estator como lo muestra la figura 3.7.

Ya explicado como se manifiesta el circuito magnético del MES, se realiza un análisis más detallado del mismo.

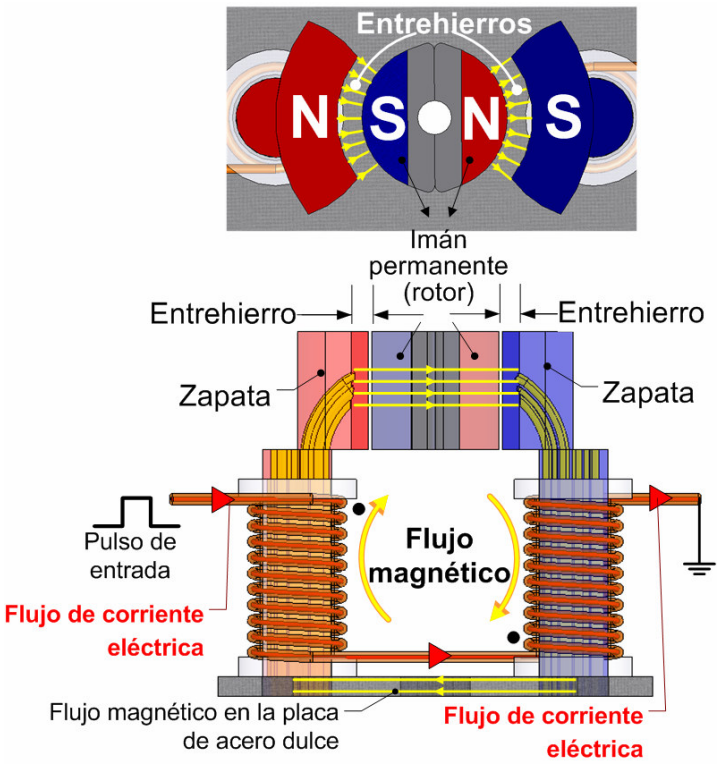


◄ **Figura 3.7.** Paso de flujo magnético a través del entrehierro formado por las zapatas del estator y los imanes del rotor.

Planteamiento de Análisis del Circuito Magnético del Motor de Estator Simple

Este análisis se hace para un motor de estator simple donde las dimensiones de cada elemento a analizar corresponden a un caso particular de estudio, el cual será propuesto más adelante como modelo para desarrolla la metodología propuesta en el presenta trabajo de tesis.

Al excitar una de las fases se tiene el circuito magnético que se muestra en la figura 3.8:



◄ **Figura 3.8.** Circuito magnético debido a la excitación de una fase del estator.

Entonces, al excitar una fase se crea un circuito magnético, y al excitar otra se crea otro circuito magnético, idealmente idéntico, que se encuentra a 90° del primero. Guiándose por la figura 3.6, se puede deducir que en el motor se manifiestan cuatro diferentes circuitos magnéticos para que éste de una revolución completa; dos en cada fase con flujo magnético en sentido contrario cada uno.

Para el análisis propuesto del circuito magnético (en este apartado), se tomará el circuito que se muestra en la figura 3.8.

Para hacer el análisis del circuito magnético del MES es necesario hacer el cálculo de las reluctancias magnéticas ($\Re$). Por definición, $\Re$ se calcula como:

$$\Re = \frac{\ell}{\mu \cdot A} \left[\frac{1}{H} \right] \qquad (3.1)$$

Donde:

ℓ: longitud del material	**[m]**
μ: permeabilidad magnética del material	**[H/m]**
A: área que atraviesa el flujo magnético	**[m^2]**

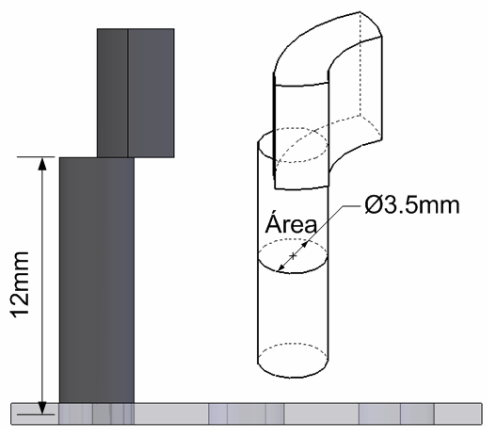
De la figura 3.8 se identifican cinco diferentes reluctancias en el circuito:

1) Dos de los núcleos de las bobinas
2) Dos de las zapatas de los núcleos
3) Dos de los entrehierros de aire
4) El imán permanente del rotor
5) La placa de acero dulce

Se tiene un total de ocho reluctancias (o bien resistencias magnéticas) en el circuito. Comenzando por calcular la de los núcleos se tiene:

- Reluctancia magnética de los núcleos de las bobinas $(\Re_{núcleo})$:

Tomando como referencia a la figura 3.9 para hacer dichos cálculos.



▲ **Figura 3.9.** Núcleo del MES.

De la ecuación 3.1 de reluctancia magnética:

$$\Re_{núcleo} = \frac{\ell}{\mu \cdot A} = \frac{\ell}{\mu \cdot \pi \cdot r^2}\left[\frac{1}{H}\right]$$

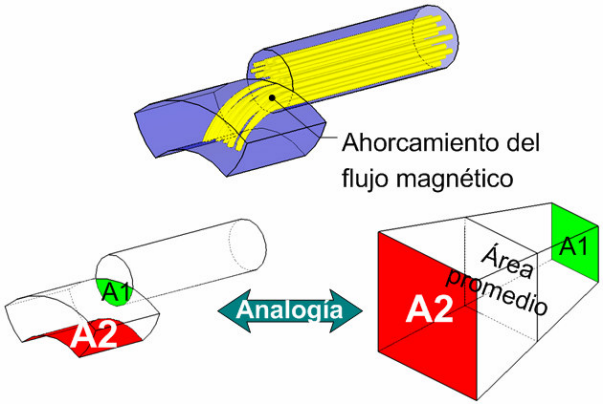
$$\Re_{núcleo} = \frac{12x10^{-3}}{\mu \cdot \pi \cdot (3.5x10^{-3}/2)^2}\left[\frac{1}{H}\right]$$

$$\Re_{núcleo} = \frac{1{,}247.255}{\mu}\left[\frac{1}{H}\right]$$

- Reluctancia magnética de la zapata del núcleo $(\Re_{zapata})$:

Para este caso, la forma especial de la zapata hace que el cálculo de su reluctancia magnética no sea de una forma tan directa como en el caso anterior. De hecho, para calcular el área que atraviesa el flujo magnético, se hizo una analogía; la zapata como un embudo, pues no todo el flujo magnético

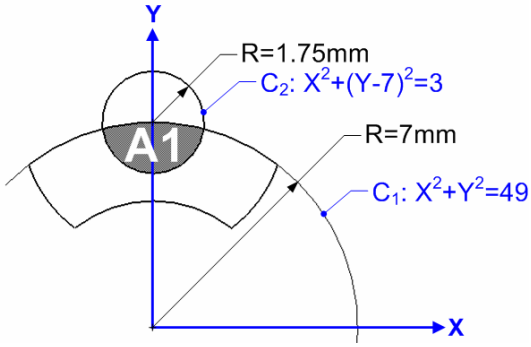
que se genera en el núcleo de la bobina pasa en forma directa hacia la zapata, ver figura 3.10:



◄ **Figura 3.10.**
Consideración de la zapata del núcleo como un embudo.

Debido al ahorcamiento que sufre el flujo magnético en su paso del núcleo a la zapata del mismo núcleo, no se puede considerar un área constante, es por ello que para el cálculo de la reluctancia magnética de la zapata, se considera el promedio geométrico de ambas áreas. Ahora pues, se calcularán éstas:

El área de contacto entre el núcleo y la zapata de la bobina (A1) se muestra en la figura 3.11, y se realizan los cálculos siguientes:



◄ **Figura 3.11.**
Área 1 puesta en el plano cartesiano.

Se plantean las siguientes ecuaciones:

$$x^2 + y^2 = 49 \ldots (1)$$

$$x^2 + (y-7)^2 = 3 \ldots (2)$$

Para encontrar los puntos de intersección

Sustituyendo (1) en (2)

$$x^2 + y^2 - 14y + 49 = 3$$

$$x^2 + y^2 - 14y = -46 \ldots (3)$$

Sustituyendo (4) en (1):

$$x = \pm\sqrt{49 - (6.7857)^2}$$

$$x_1 = 1.7187 \qquad x_2 = -1.7187$$

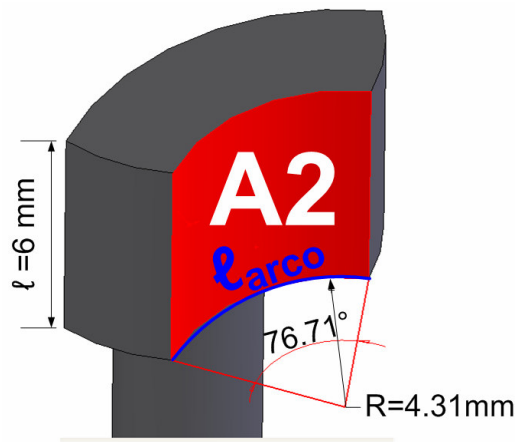
Sustituyendo (1) en (3):

$$49 - 14y = -46$$
$$14y = 95$$
$$y = \frac{95}{14}$$
$$y = 6.7857\ldots(4)$$

Para encontrar el área A1 se hace una integral doble:

$$A1 = \int_{-1.7187}^{1.7187} \int_{\sqrt{49-x^2}}^{\sqrt{3-x^2}+7} dy \cdot dx$$
$$A1 = \int_{-1.7187}^{1.7187} \left(\sqrt{3-x^2} + 7 - \sqrt{49-x^2}\right) \cdot dx$$
$$A1 = 4.7087 + 24.0618 - 23.8178$$
$$A1 = 4.9527[\mathrm{mm}^2] \qquad A1 = 4.9527\mathrm{x}10^{-6}[\mathrm{m}^2]$$

Ya obtenido el valor de A1, se calcula el área de la superficie de salida del flujo magnético (A2), tal como se muestra en la figura 3.12.



▲ **Figura 3.12.** Cálculo del A2.

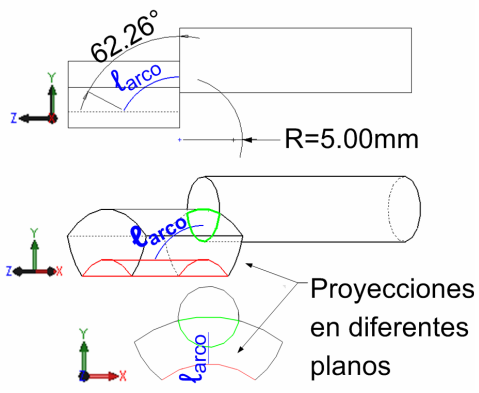
Para calcular A2 se tiene:

$$A2 = \ell \cdot \ell_{arco}[m^2]$$
$$\ell_{arco} = \theta \cdot r[m]$$
$$\theta = (76.71°) \cdot \frac{1\pi \text{ rad}}{180°} = \frac{2557}{6000}\pi[\text{rad}]$$
$$\ell_{arco} = \left(\frac{2557}{6000}\pi\right)(4.31x10^{-3})[m]$$
$$\ell_{arco} = 5.770x10^{-3}[m]$$
$$A2 = (6\mathrm{x}10^{-3}) \cdot (5.770x10^{-3})[m^2]$$
$$A2 = 34.622x10^{-6}[m^2]$$

Finalmente, se hace el promedio geométrico de A1 y A2 para obtener el área promedio por la que pasa el flujo magnético en la zapata:

$$A = \sqrt{A1 \cdot A2}$$
$$A = \sqrt{(4.952x10^{-6}) \cdot (34.622x10^{-6})}$$
$$A = 13.094x10^{-6}[m^2]$$

Otro elemento a calcular para llegar a la reluctancia magnética de la zapata es la longitud que recorre el flujo magnético a través de ésta. Para ello se ha considerado una longitud de arco media; la cual va del centro de A1 hasta el centro de A2. Esto se aprecia en la figura 3.13:



▲ **Figura 3.13.** Consideración de la longitud de arco media.

Cálculo de la longitud de arco:

Consideración: Se trata de una circunferenci

$$\ell_{arco} = \theta \cdot r$$

$$\theta = (62.26°) \cdot \frac{1\pi \text{ rad}}{180°}$$

$$\theta = \frac{3113}{9000}\pi [\text{rad}]$$

$$\ell_{arco} = \left(\frac{3113}{9000}\pi\right) \cdot (5x10^{-3})[m]$$

$$\ell_{arco} = 5.433x10^{-3}[m]$$

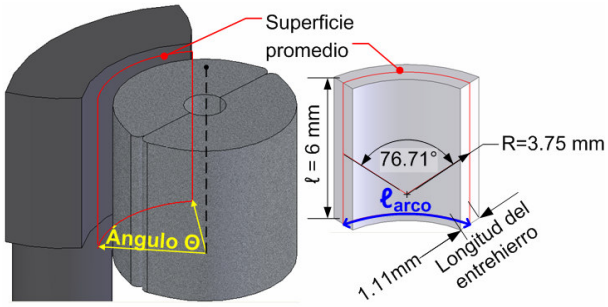
Finalmente se tienen los elementos necesarios para calcular la reluctancia magnética de la zapata:

$$\Re_{zapata} = \frac{\ell_{arco}}{\mu \cdot A} = \frac{5.433x10^{-3}}{\mu \cdot (13.094x10^{-6})}$$

$$\Re_{zapata} = \frac{414.923}{\mu}\left[\frac{1}{H}\right]$$

- Reluctancia magnética de los entrehierros de aire $(\Re_{entrehierro})$:

El área considerada para hacer este cálculo es una superficie promedio entre la cara de la zapata y la cara del imán permanente del rotor. Ver figura 3.14:



▲ **Figura 3.14.** Cálculo de la reluctancia del entrehierro.

Para calcular A se tiene:

$$A = \ell \cdot \ell_{arco}[m^2]$$

$$\ell_{arco} = \theta \cdot r[m]$$

$$\theta = (76.71°) \cdot \frac{1\pi \text{ rad}}{180°} = \frac{2557}{6000}\pi [\text{ra}$$

$$\ell_{arco} = \left(\frac{2557}{6000}\pi\right)(3.75x10^{-3})[m]$$

$$\ell_{arco} = 5.0206x10^{-3}[m]$$

$$A = (6x10^{-3}) \cdot (5.0206x10^{-3})[m^2]$$

$$A = 30.124x10^{-6}[m^2]$$

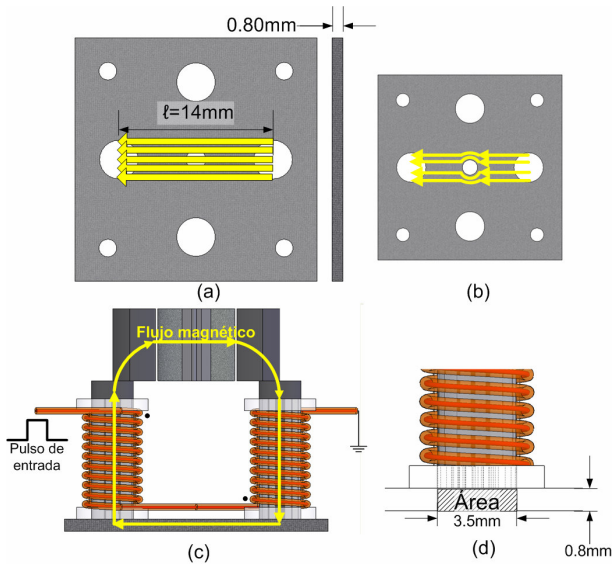
Por último queda aplicar la fórmula:

$$\Re_{entrehierro} = \frac{\ell}{\mu_0 \cdot A} = \frac{1.11x10^{-3}}{(4\pi x10^{-7}) \cdot (30.124x10^{-6})}$$

$$\Re_{entrehierro} = 29.3225x10^{6}\left[\frac{1}{H}\right]$$

- Reluctancia magnética de la placa de acero dulce ($\Re_{\text{placa acero}}$)

Para el cálculo de esta reluctancia, se considera, de que el flujo magnético sigue el camino más corto de núcleo a núcleo, tal como se muestra en la figura 3.15:



◄ Figura 3.15. Cálculo de la reluctancia magnética de la placa. (a) Paso del flujo magnético por el camino más corto. (b) Circuito magnético completo. (c) Vista del área por la que atraviesa el flujo.

En la figura 3.15 se muestra el paso del flujo magnético a través de la placa por el camino más corto (a), es decir, se considera que el flujo no se distribuye por toda la placa, éste no se va hacia donde están los otros núcleos o mucho menos hacia donde están los barrenos de los sostenes del estator (donde la reluctancia magnética es menor). Se hace la consideración de que el flujo magnético busca la trayectoria más directa de polo a polo magnético, formados en los respectivos núcleos de las bobinas excitadoras. Otra aproximación, es que el barreno en el centro de la placa (entrehierro circular para la flecha y buje de la misma) se desprecia en el cálculo de reluctancia, pues el flujo magnético busca siempre el camino de menor reluctancia magnética, lo que lleva a las líneas de flujo a “doblarse” y encontrar dicho camino (figura 3.15b). Puede considerarse entonces, que el área por donde pasan las líneas que se “doblan”

para evitar el entrehierro queda compensada al considerar dicho entrehierro como parte de la placa.

Ya expuestas las consideraciones hechas para el paso de flujo magnético por la placa de acero dulce, se procede con el cálculo de su reluctancia magnética.

Siendo el área como se muestra en la figura 3.15d :

$$\mathrm{A} = (0.80x10^{-3}) \cdot (3.5x10^{-3})[m^2]$$

$$\mathrm{A} = 2.8x10^{-6}[m^2]$$

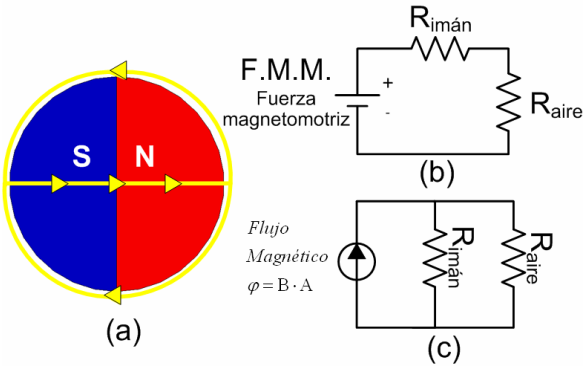
Siendo la longitud ℓ la que se ve en la figura 8a :

$$\Re_{placa} = \frac{\ell}{\mu \cdot \mathrm{A}} = \frac{14x10^{-3}}{\mu \cdot (2.8x10^{-6})}$$

$$\Re_{placa} = \frac{5000}{\mu}\left[\frac{1}{H}\right]$$

- Reluctancia magnética del imán permanente del rotor ($\Re_{imán}$)

Dada la naturaleza de auto inductancia de un imán permanente, éste se modela como se muestra en la figura 3.16:



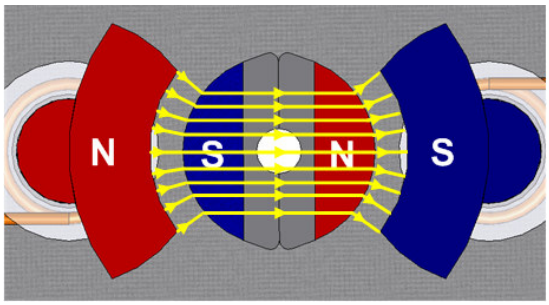
◄ **Figura 3.16.** (a) Imán permanente. (b) Modelo equivalente de Norton. (c) Modelo equivalente de Thèvenin.

De los modelos mostrados en la figura 3.16, se hacen las siguientes consideraciones para el cálculo de la reluctancia magnética del imán del rotor del MES:

a) La reluctancia magnética del aire es tan grande en comparación con la del material del imán, que la resistencia equivalente en el modelo de

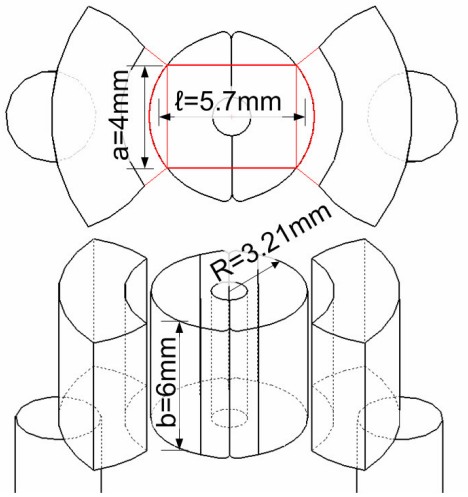
Thèvenin resultaría prácticamente igual a la del imán. Por lo tanto, se despreciará la reluctancia del aire.

b) Las líneas de flujo magnético llegan de forma radial a la superficie del imán permanente, y se distribuyen como se muestra en la figura 3.17:



◄ **Figura 3.17.** Líneas de flujo magnético entre las zapatas, los entrehierros y el imán permanente del rotor.

c) Dada la distribución uniforme de las líneas de flujo magnético en el imán permanente, el área (A) y longitud (ℓ) a considerar para el cálculo de su reluctancia son como se muestra en la figura 3.18:



◄ **Figura 3.18.** Dimensiones consideradas para el cálculo de la reluctancia del núcleo.

Haciendo estas consideraciones, se calcula la reluctancia magnética:

Área de sección por el cual pasa el flujo :

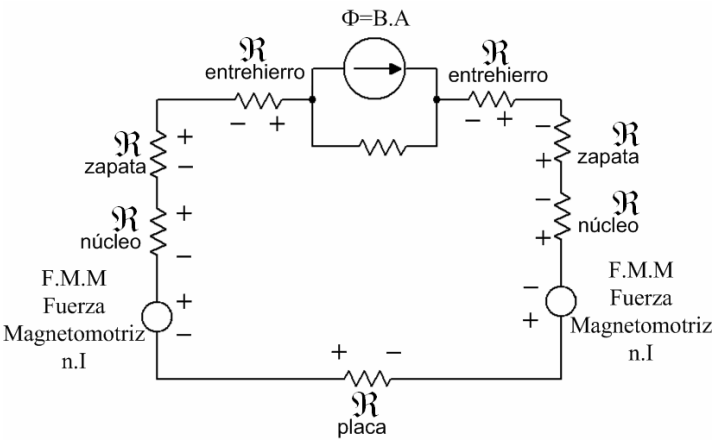
$$A = a \cdot b = (4x10^{-3}) \cdot (6x10^{-3})[m^2]$$

$$A = 24x10^{-6}[m^2]$$

$$\Re_{imán} = \frac{\ell}{\mu \cdot \mathrm{A}} = \frac{5.7x10^{-3}}{\mu \cdot (24x10^{-6})}$$

$$\Re_{imán} = \frac{237.5}{\mu}\left[\frac{1}{H}\right]$$

Finalmente, el circuito eléctrico equivalente del circuito magnético del MES (cuando una fase es excitada) queda como se muestra en la figura 3.19:



◄ **Figura 3.19.** Circuito eléctrico equivalente.

Motor de Doble Estator (MDE)

Las características del Motor de Doble Estator (MDE) son muy similares a las de motor de un estator. La diferencia es el diseño del rotor de este nuevo motor, el cual tiene forma de disco y no de un cilindro. Además de que este motor está construido con dos estatores y el rotor se encuentra entre ellos. Lo anterior incrementa la eficiencia al tener un circuito con menores pérdidas de flujo magnético y permite que este motor sea empleado en aplicaciones donde se requiere un alto par.

Para encontrar el número de pasos por revolución del motor, mostrado en la figura 3.20, se emplea la ecuación 1.2. Para este caso el rotor tiene seis imanes (que son considerados sus dientes) y dos fases, por lo que:

$$S = 2 * 2 * 6 = 24 \textit{ medios pasos}$$

El motor presentado en este apartado tiene una resolución de 24 posiciones por revolución, lo que permite un desplazamiento de 15º por medio paso. En caso de pasos enteros se tiene 12 pasos por revolución con un desplazamiento

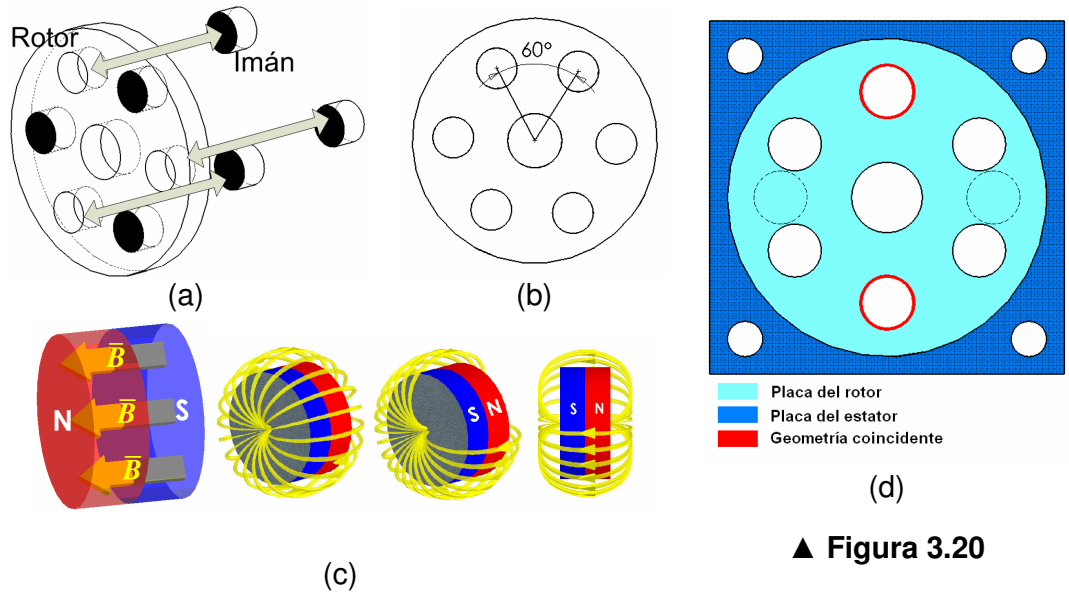
angular de 30º por paso, y es esta última la modalidad bajo la que normalmente trabaja.

Estructura

La estructura del estator de este motor es básicamente la misma que la del MES, la estructura y disposición de los elementos que conforman los dos estatores del MDE, son iguales que el estator del motor anterior. Sin embargo, cabe aclarar que esto no aplica para el funcionamiento del circuito eléctrico, y por lo tanto, tampoco para el circuito magnético. Más adelante se explicarán los detalles.

Por otro lado, el rotor está conformado por un disco de material no conductor (acrílico, fenólica, baquelita, etc.) el cual cuenta con varios orificios circulares (figura 3.20a): uno de ellos está en el centro y es en donde se fija el rotor a la flecha del motor; mientras que los otros se encuentran a una distancia uniforme del centro y separados entre sí un ángulo predefinido, en este caso 60° (figura 3.20b). Los orificios alojan imanes cilíndricos con imantación axial (figura 3.20c) y su tamaño dependerá del tamaño de los imanes utilizados, lo que repercute en el par del motor, así mismo, el número de orificios define el número de pasos que dará el rotor por revolución, tal como se hizo notar arriba.

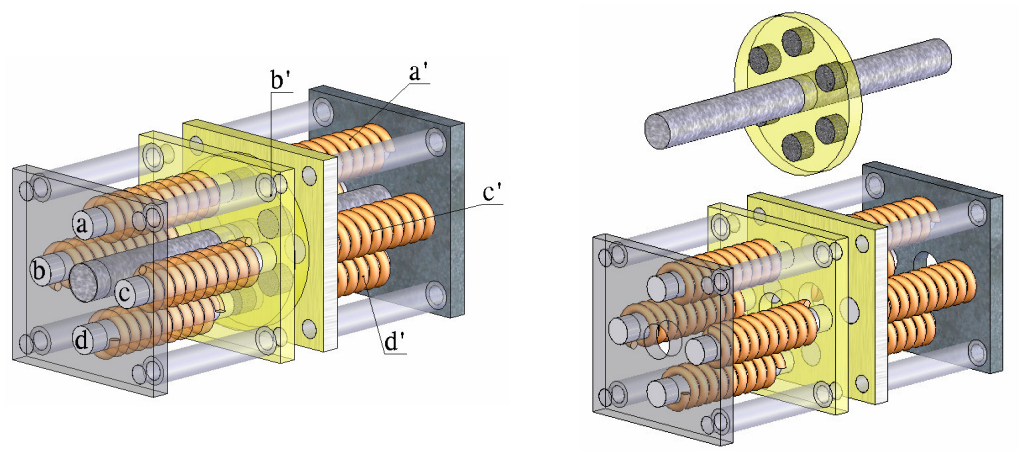
En la figura 3.20d se observa que, al tener esta configuración de bobinas en el estator y de imanes en el rotor, cuando dos imanes coinciden con dos núcleos de bobinas, los otros cuatro imanes no lo hacen. Se tiene que poner especial atención a esto último, dado que tiene un propósito específico y se hablará de ello cuando se explique el circuito magnético del motor.



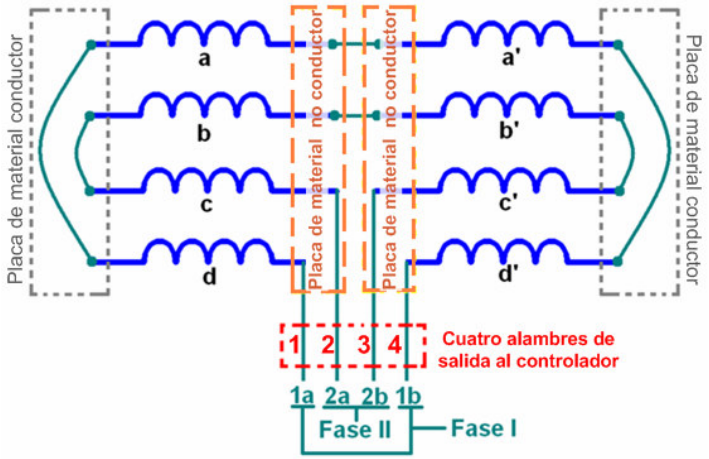
▲ **Figura 3.20**

Circuito Eléctrico

La figura 3.21a ilustra la estructura de un MDE. Como se mencionó anteriormente el rotor se encuentra entre los dos estatores. En lo que respecta al circuito eléctrico del motor, a partir de ocho bobinas se desarrollan dos fases (cuatro bobinas por fase) tal como lo ilustra la figura 3.21b. Al igual que para el motor de un estator, las bobinas deben ser conectadas entre sí considerando que se deben generar campos magnéticos complementarios.



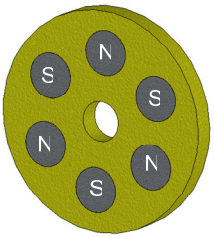
(a)



(b)

▲ **Figura 3.21.** (a) Estructura final de un MDE. (b) Circuito eléctrico del MDE. Conexión entre bobinas.

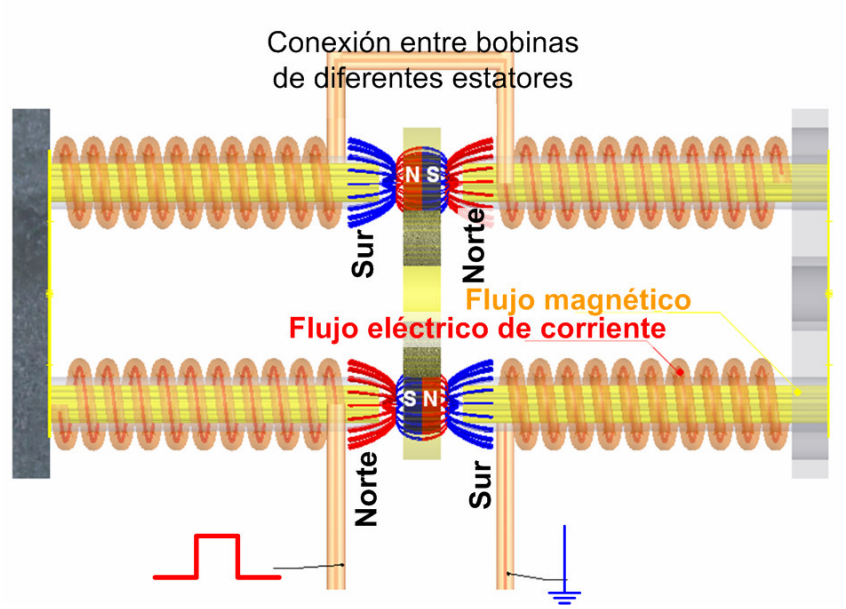
Circuito Magnético



▲ **Figura 3.22.** Imagen del rotor con los imanes orientados.

El circuito magnético de este tipo de motor se manifiesta al energizar sus fases. Al polarizarse cada una ellas, se genera un campo magnético tal que, uno de los extremos de la fase es Norte y el otro extremo de la fase es Sur. Para que el rotor se oriente de acuerdo a la polarización de las fases, los imanes son colocados con la orientación de sus polos en forma alternada (ver figura 3.22).

Con el fin de explicar como se lleva a cabo la polarización de las fases del motor para obtener un movimiento angular en el rotor, se comienza por energizar una de las fases del motor (F1), lo que en consecuencia hace que los polos generados por los dos estatores sean como se muestran en la figura 3.23.



◄ **Figura 3.23.** Polarización del MDE al excitar una fase.

La excitación de las cuatro bobinas de F1 genera un desplazamiento angular en el rotor, hasta un estado de equilibrio en el que dos de los imanes del rotor (Sur y Norte) estén orientados hacia cuatro de los núcleos de la F1 respectivamente.

Al tener dos estatores el circuito magnético es más eficiente. En el caso del estator simple sólo se trabaja con uno de los extremos de los imanes mientras que en este caso trabajan los dos polos.

La secuencia de polarización es idéntica a la que se tuvo en el MES, la diferencia es que para dar una revolución completa al rotor, dicha secuencia tiene que repetirse un mayor número de veces. De acuerdo con el cálculo anterior, la secuencia de pasos del primero al cuarto se tiene que repetir tres veces, tal como lo indica la tabla 2.

	Paso	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12
Fase I	Terminal 1ª	+	sp	—	sp	+	sp	—	sp	+	sp	—	sp
	Terminal 1b	—	sp	+	Sp	—	sp	+	sp	—	sp	+	sp
Fase II	Terminal 2ª	sp	+	sp	—	sp	+	sp	—	sp	+	sp	—
	Terminal 2b	sp	—	sp	+	sp	—	sp	+	sp	—	sp	+

sp indica "sin polaridad"

▲ **Tabla 2.** Secuencia de polarización de un motor a pasos de doble estator.

Motor de Fuerza de Lorentz

Marco Teórico

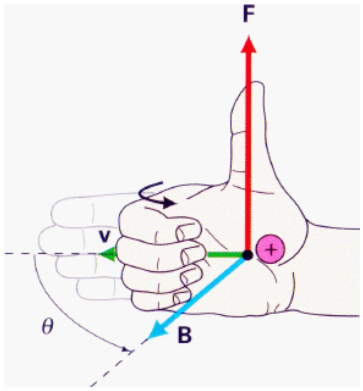
El motor de Fuerza de Lorentz, como su nombre lo indica, hace uso de este principio para producir movimiento. La Fuerza de Lorentz es la fuerza que experimenta una carga cuando atraviesa por una región en la que existen un campo eléctrico y un campo magnético en forma simultanea. Esta fuerza es determinada mediante las siguientes ecuaciones:

$$F_{em} = F_e + F_m \qquad (3.2)$$

$$F_{em} = q(E + v \times B) \qquad (3.3)$$

donde F_e representa la fuerza debido al campo eléctrico, F_m es la fuerza debido al campo magnético, q es la carga, E es la energía, v es la velocidad de la carga y B es la intensidad de flujo magnético [9].

El producto cruz entre los vectores “velocidad de la carga” y “campo magnético” hace que la dirección de la fuerza que se genera de este producto sea normal al plano donde se encuentran estos dos primeros vectores. Para determinar la dirección y sentido en la que se ejerce dicha fuerza también se puede hacer uso de la regla de la mano derecha (ver figura 3.24).



◄ **Figura 3.24.** Regla de la mano derecha.

Para determinar la fuerza que genera un campo magnético sobre un alambre por el que circula una corriente, la ecuación que se emplea es la siguiente:

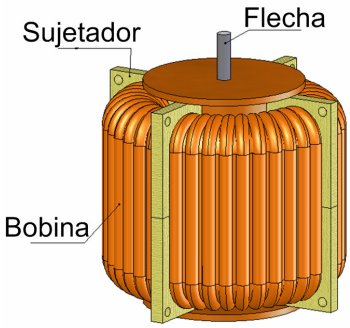
$$F_{em} = LI \times B \qquad (3.4)$$

donde L es la longitud del alambre, I es la corriente que circula por el alambre y B es la intensidad de flujo magnético.

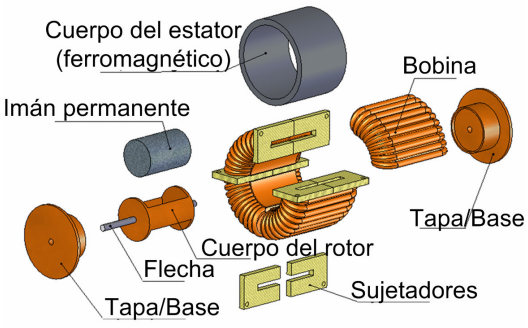
Componentes que lo conforman

En la figura 3.25 se muestra el diseño de un motor de pasos basado en Fuerza de Lorentz y la vista en explosivo de las partes que lo componen, a partir de esta imagen se explicará la configuración de elementos y la forma de su funcionamiento.

Figura 3.25 ► (a) Motor de Fuerza de Lorentz; (b) Vista en explosión del Motor de Fuerza de Lorentz.



(a)



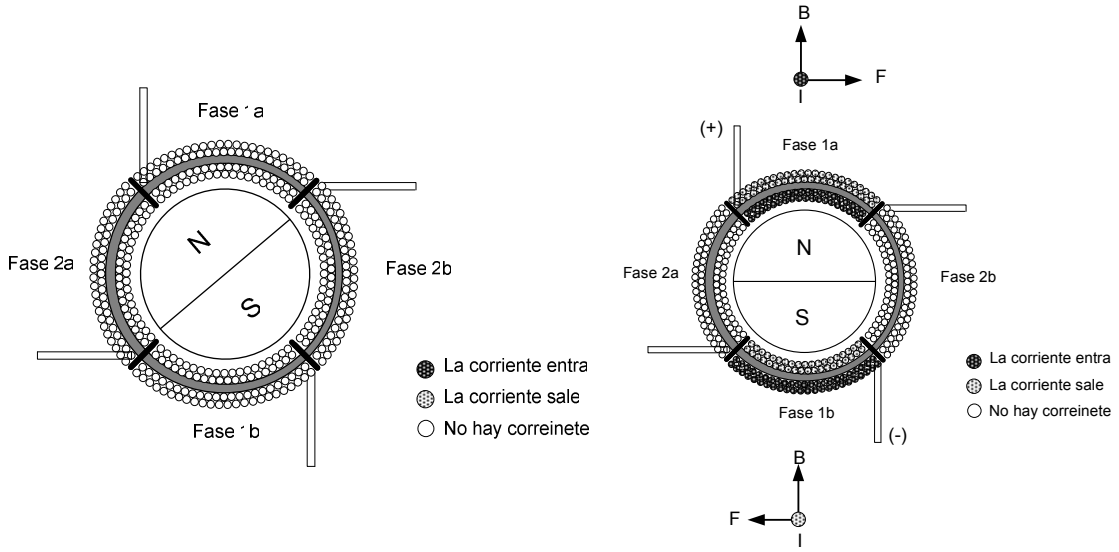
(b)

En este tipo de motor, las bobinas se desarrollan sobre un tubo de material ferromagnético (hierro dulce, por ejemplo), en total son cuatro bobinas que generan dos fases y se encuentran distribuidas en forma uniforme. Cada una de las bobinas está delimitada por medio de unos separadores que, además de cumplir la función de separar, sirven para brindar soporte a las tapas del motor, éstas últimas cuentan con un orificio al centro por donde pasa la flecha del motor. Así mismo, los separadores sirven para alojar las terminales de cada bobina y así facilitar las conexiones eléctricas del motor. El rotor está compuesto por un cilindro de imán permanente con imantación diametral, el cual se encuentra unido a la flecha por medio de un soporte hecho de latón.

La conexión eléctrica de las bobinas del motor es igual que para el caso de los motores de un estator y los motores de doble estator. Teniendo como resultado un motor de tipo bipolar.

Principio de funcionamiento

Cuando el motor se encuentra sin energizar, el rotor puede estar posicionado en cualquier dirección, tal como muestra la figura 3.26a. Al excitar fase 1 del motor (la terminal de la fase 1a (+) y la terminal de la fase 1b (-)), el campo magnético generado por ésta queda encerrado casi en su totalidad dentro del tubo de hierro dulce. Por lo anterior, el flujo magnético generado por el imán del rotor generará un movimiento angular que lo desplaza a una posición tal que, se completa el circuito electromagnético entre corriente, flujo magnético y fuerza. Un esquema de cómo se genera el movimiento es presentado el la figura 3.26b.



(a) **(b)**

▲ **Figura 3.26**. (a) Motor de fuerza de Lorentz sin energizar; (b) Motor de fuerza de Lorentz con la fase 1 energizada.

Una forma aproximada de determinar la fuerza con la que el motor se desplaza angularmente es empleando la ecuación para encontrar fuerza que genera un campo magnético sobre un alambre por el que circula una corriente, quedando,

$$F_{em} = NLIB \qquad (3.5)$$

donde N es el número de vueltas de la bobina.

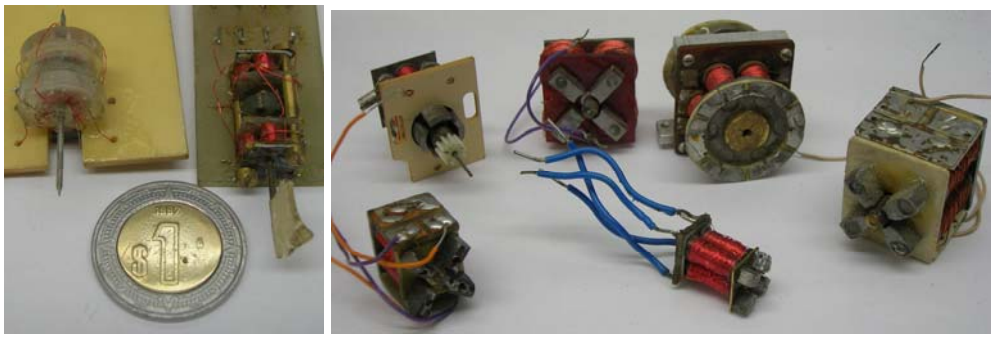
Al excitarse la fase 2 del motor con la terminal de la fase 2a (-) y la terminal de la fase 2b (+), el rotor se mueve 90º para llegar a su nueva posición con el polo norte apuntando a la derecha. Al excitarse la fase 1 nuevamente, pero ahora en forma inversa, el rotor sufre otra rotación de 90º y ahora el polo norte apunta hacia abajo. Si ahora se polariza la fase 2 tal que, la terminal de la fase 2b (+) y la terminal de la fase 2b (-), el rotor se posiciona con el norte en apuntando al lado izquierdo. Esto para el caso de un motor de pasos de cuatro pasos por revolución.

Hablando de los tres motores a pasos que se han presentado hasta este punto en este capítulo, se ha descrito el funcionamiento de un MES de dos fases y dos polos en su rotor, de un MES de dos fases y seis polos en su rotor, y por último se ha descrito el motor de Fuerza de Lorentz con dos fases y dos polos en su rotor. Para cada uno de los tres casos se explicó la disposición de cada

uno de sus componentes para justificar su desempeño en el motor, la configuración de su circuito magnético. Así mismo, se habló muy brevemente del marco teórico del motor de Fuerza de Lorentz con el fin de explicar el principio de funcionamiento bajo el que trabaja. Extrapolando el principio de funcionamiento de cada uno de los componentes, de cada uno de los tres casos, se puede diseñar un motor con diferentes características. En el siguiente capítulo se hablará de algunos parámetros que se tienen que tomar en cuenta para el diseño de los motores a pasos desarrollados en el GMM.

Capítulo 4
Metodología de Desarrollo de Motores a Pasos

El grupo de trabajo del GMM ha desarrollado hasta la fecha diversos motores a pasos de diferentes diseños (figura 4.1); variando los parámetros de construcción de las piezas que conforman dichos dispositivos en función de los requerimientos del proyecto en los que dichos motores se utilizan. De esa forma, se ha adquirido de forma empírica, experiencia para fabricar estos motores, dando resultados funcionales. Como resultado de esta experiencia, se ha adoptado una metodología para desarrollar motores a pasos funcionales. Es por ello que, como caso de estudio, se considerarán tres motores a pasos con dimensiones conocidas, cuyas características se encuentran concentradas en la tabla 3. Primero se describirá la metodología que implica el desarrollo de cada uno de los tres casos a desarrollar, para después describir el caso particular de cada motor.



▲ **Figura 4.1.** Muestra de algunos de los motores a pasos desarrollados por el GMM.

	Motor estator simple	Motor doble estator	Motor de Fuerza de Lorentz
Dimensiones aproximadas	18.5 *x* 22 *x* 22 mm^3	28.5 x 22 x 22 mm^3	32 x 32 x 27 mm^3
Número de bobinas (estator)	4	4 en cada estator, 8 totales	4
Número de fases	2	2	2
Rotor	Todos los rotores tienen imán permanente		
Polos en el rotor	2	6	2
Imantación de los polos del rotor	Diametral	Axial	Diametral
Número de pasos por revolución	4 pasos completos 8 medios pasos	12 pasos completos 24 medios pasos	4 pasos
Circuito eléctrico	Todos tienen configuración bipolar		
Esquema de conexión del circuito eléctrico			
MES	**MDE**	**MFL**	
Al control Al control	Al control	Al control Al control	

▲ **Tabla 3.** Casos particulares de estudio de motores a pasos desarrollados en el GMM.

Esta metodología tiene cuatro principales pasos:

La metodología propuesta contempla cinco aspectos principales:

1) Diseño de los componentes del motor.
2) Manufactura de los componentes del motor.
3) Ensamblaje del motor
4) Prueba de funcionamiento
    - 4.1 Prueba de funcionamiento del circuito eléctrico.
    - 4.2 Prueba de funcionamiento del circuito magnético.
5) Puesta en marcha del motor.

Para el primer paso, el diseño de los componentes del motor, se emplea un paquete modelador de sólidos tipo CAD (cuyo acrónimo en inglés es *Computer Aided Desing*). Con ayuda de esta herramienta computacional se proponen las medidas de cada una de las piezas y luego se ensamblan, dentro del mismo paquete para corroborar que el acoplamiento mecánico de cada motor sea correcto. Con esta misma herramienta se obtienen los planos de cada pieza para comenzar a manufacturarlas, con certeza de que éstas acoplan todas entre sí, sin problemas. Cabe mencionar que el diseño geométrico de dichas piezas es no tema concerniente de esta tesis. Los parámetros de diseño de cada motor se discutirán en su debido apartado. Este primer paso se desarrolla así para los tres casos de motores a pasos que se tratan en este trabajo.

Para el segundo paso, cuando se hable de la manufactura de los componentes de cada uno de los motores, no se hablará del proceso de manufactura en sí, y mucho menos del uso de las máquinas herramienta implícitas en su realización. En lugar de eso, se hablará de las características generales de desempeño, así como, su finalidad dentro del sistema del motor. Conforme se avance en el desarrollo de la metodología propuesta en el presente trabajo se tesis, paralelamente se desarrollarán los casos particulares de cada componente del motor. Se mostrará un plano de las dimensiones particulares que se proponen para dicho caso de estudio. Dichos planos se obtuvieron, como se dijo en el párrafo anterior, a partir del primer paso de esta metodología, al diseñar los componentes a través de *software* CAD.

Los cuatro primeros, de los cinco pasos mencionados arriba se desarrollarán para cada uno de los tres motores a pasos diseñados en el GMM. Para el quinto paso se propondrá un sistema electrónico que sea capaz de controlar y dar potencia necesaria para que los motores funcionen.

4.1 Motor de Estator Simple

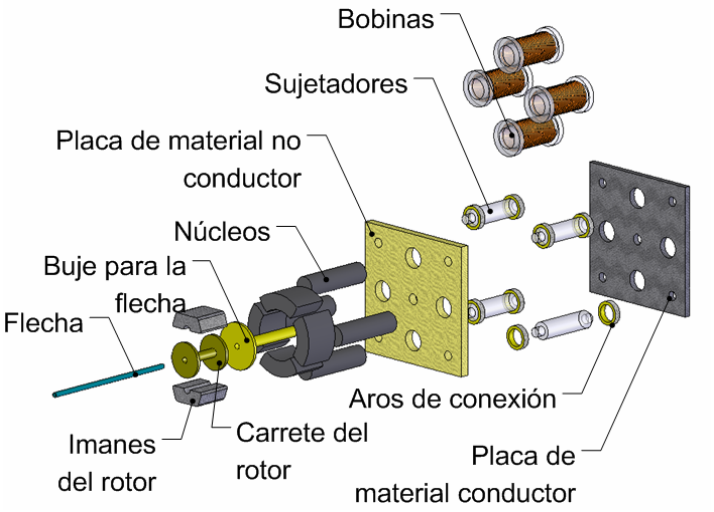
4.1.1 Diseño de los componentes del motor

Los parámetros importantes de diseño de las piezas del MES son los que a continuación se consideran:

- Para elegir el tamaño de todos los barrenos se consideran tamaños estándares de brocas.
- Al elegir el diámetro del rotor no se debe dejar un entrehierro muy grande, esto evita que el rotor no gire debido a grandes pérdidas de flujo magnético ocasionadas por la gran reluctancia magnética del entrehierro. Así mismo, una distancia muy corta entre los imanes del rotor y las zapatas de los núcleos del estator tampoco es deseable.
- Sea de las dimensiones que sea el motor a desarrollar, todos sus componentes deben ser proporcionales entre sí.
- Si las dimensiones del motor a desarrollar lo permiten, podrá evitarse la manufactura de algunas piezas, si se establece que éstas sean de diámetro, ancho o longitud (según sea el caso) estándar. El caso de los sujetadores es un buen ejemplo.

4.1.2 Manufactura de los componentes del motor

En la tabla 4 se encuentran concentrados los elementos necesarios para desarrollar un MES. En ella se encuentra el número de piezas requeridas de cada componente, así como la(s) máquina(s) herramienta necesaria(s) para manufacturarlas. Las figuras de referencia en la última columna son los planos geométricos de cada uno de estos componentes, las medidas mostradas en dichos planos corresponden al caso particular del caso de estudio de este motor. En la figura 4.2 se muestra un diagrama explosivo del motor de estator simple:



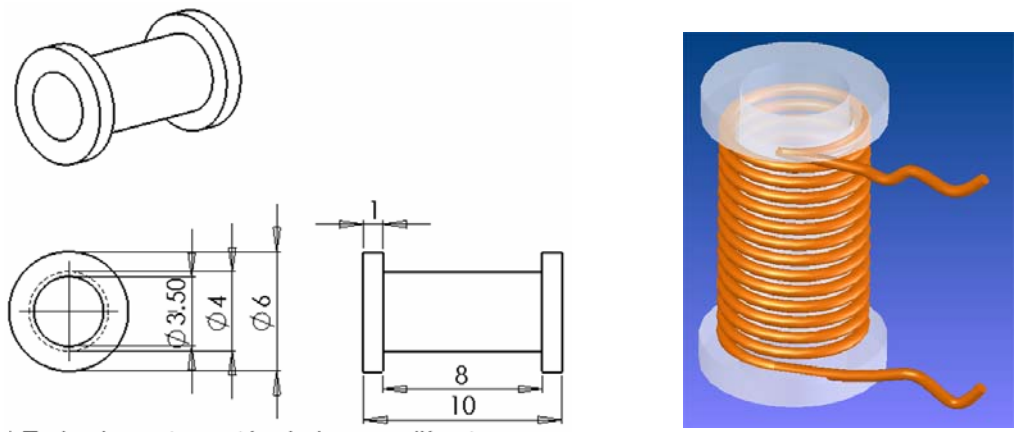
◄ **Figura 4.2.** Diagrama explosivo del motor de estator simple.

Motor de Estator Simple			
Componente	**Número de piezas empleadas**	**Máquinas necesarias para la manufactura**	**Figura de referencia**
Bobina	4	Torno	4.3
Soporte ferromagnético	1	Fresa, taladro, limas	4.6
Soporte no conductor	1	Fresa, taladro, limas	4.6
Separadores laterales	4	Torno	4.7
Núcleo de la bobina	4	Torno	4.9
Rotor	1	Torno y esmeril	4.10
Buje para la flecha	1	Torno	4.13
Flecha	1	SIN MANUFACTURA	4.10
Aros de conexión	8	Torno y cautín	4.14

▲ **Tabla 4**. Piezas que conforman al motor de estator simple.

- **Bobina**

La bobina está compuesta por un carrete manufacturado con algún material no conductor, puede ser manufacturado a partir de una barra de acrílico, PVC, plástico, etcétera. Sobre el cual es bobinado alambre magneto de un calibre determinado. En la figura 4.3 se muestra una imagen de la bobina y las características geométricas propuestas para el caso particular del carrete empleado para su desarrollo.

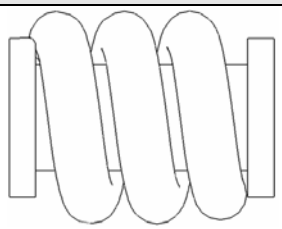
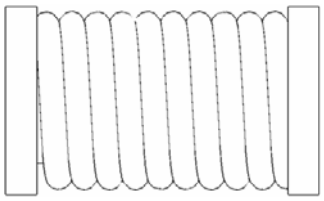
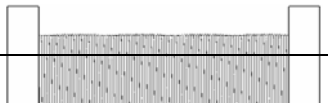


* Todas las cotas están dadas en milímetros

▲ **Figura 4.3**. Bobina empleada en el motor de pasos de estator simple.

Eléctricamente, lo importante es que el material del carrete no sea conductor.

Al elegir el calibre de alambre magneto para estas bobinas, éste debe ser delgado para que el número de vueltas sobre el carrete sea el mayor posible, logrando con ello que la resistencia la bobina sea grande también, con el fin de que la bobina soporte mayor diferencia de potencial entre sus terminales. Esto se justifica en la tabla 5, en la cual se concentran las características de tres alambres magneto de calibre diferente.

Calibre AWG	Diámetro en mm	Metros por Ohm	Carga máx en A
10	**2.50**	**299.4**	**25**
	$\text{Longitud Total Aprox}: 61.26\text{mm}$ $\pi \cdot D \cdot \text{No. de Vueltas} = (3.1416)(4+2.5)(3)$		
	$\text{Resistencia Aprox}:$ $\frac{61.26x10^{-3}[m]}{299.4[\frac{m}{\Omega}]} = 204.61x10^{-6}\Omega$		
20	**0.81**	**27.42**	**2**
	$\text{Longitud Total Aprox}: 151.11\text{mm}$ $\pi \cdot D \cdot \text{No. de Vueltas} = (3.1416)(4+0.81)(10)$		
	$\text{Resistencia Aprox}:$ $\frac{151.11x10^{-3}[m]}{27.42[\frac{m}{\Omega}]} = 5.51x10^{-3}\Omega$		
40	**0.080**	**0.285**	**0.015**
	$\text{Longitud Total Aprox}: 100.53\text{mm}$ $\pi \cdot D \cdot \text{No. de Vueltas} = (3.1416)(4+0.08)(100)$		

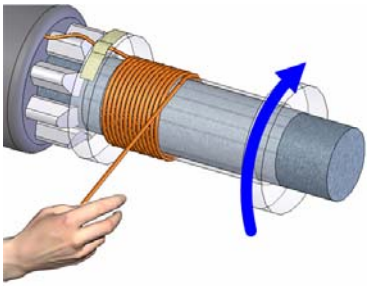
	Resistencia Aprox : $\frac{100.53x10^{-3}[m]}{0.285[\frac{m}{\Omega}]} = 0.35\Omega$

▲ **Tabla 5.** Datos de distintos alambres magneto.

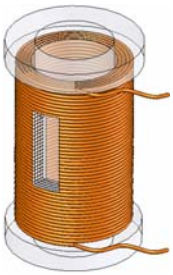
De la tabla 5 se observa que con el alambre magneto de calibre AWG40 es el que ofrece mayor resistencia y es por ello que se justifica su elección. Empleando este alambre de este calibre, experimentalmente, se han obtenido resistencias de 42[Ω] y hasta 51[Ω] en estos carretes.

En la figura 4.4 se muestra como se hace el embobinado sobre el carrete.

Figura 4.4 ►
(a) Embobinado de los devanados del motor con ayuda del torno. (b) Bobina terminada.



(a)



(b)

Al terminar de bobinar los cuatro carretes, deben verificarse tres cosas:

a) **Verificar la continuidad eléctrica de las bobinas**: Pues de no cerciorarse de que el alambre magneto no sufrió algún daño mientras éste se embobinaba, se corre el riesgo de perder por completo una de las fases del motor, lo que genera que el rotor no gire. Se tiene que eliminar el esmalte de las dos puntas del alambre de la bobina para hacer cualquier medición. Dependiendo del calibre del alambre esto se puede hacer con una navaja o *cutter* si el alambre es grueso, o con ayuda de un cautín si el alambre es muy delgado.
b) **Verificar que las cuatro bobinas tengan aproximadamente el mismo valor de resistencia óhmica:** Si el circuito eléctrico del estator del motor (conformado por las cuatro bobinas) se encuentra desbalanceado, por ende lo estarán el circuito magnético y, lo más importante, el par producido por el motor. El par producido por una fase no será el mismo

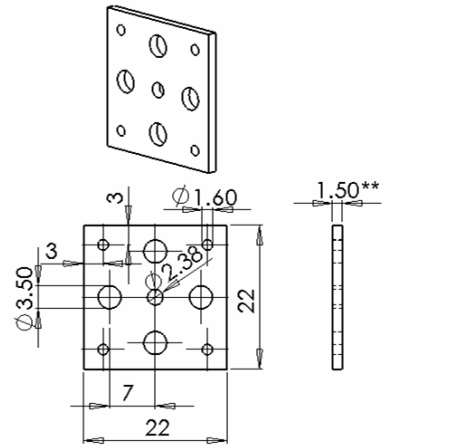
que en la otra, puede que el par producido por una de las fases no sea el suficiente para siquiera llegar a dar el paso siguiente del rotor.

c) **Verificar que el campo magnético producido por las cuatro bobinas sea similar entre ellas.** Al polarizar cada una de las bobinas, se crea un campo magnético que puede ser medido en los extremos del núcleo con un teslametro. Si la diferencia entre el campo generado de una bobina y otra es significativa, la solución es reducir el número de vueltas de alambre magneto de alguna bobina, hasta que los campos magnéticos producidos por todas las bobinas sean similares. Esto se hace de forma aproximada.

Por último, se sella a la bobina con barniz para bobinas.

- **Soporte ferromagnético y soporte no conductor**

Estos soportes sirven como armadura para el motor; una de ellas, hecha de material no conductor, da soporte al estator. El otro soporte, hecho de material ferromagnético (lo que implica que tenga baja reluctancia magnética); es útil para hacer más eficiente la conversión de energía electro-magnética a movimiento rotacional. En la figura 4.5 se muestra una imagen de los soportes laterales. Las dimensiones dadas en este plano son propuestas para el caso de estudio particular.



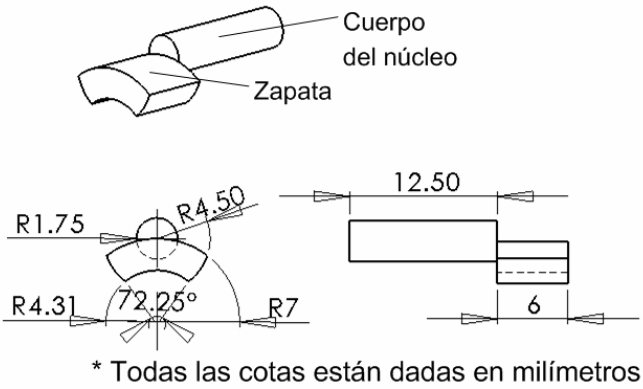
*Todas las cotas están dadas en milímetros
**Este valor depende del material empleado

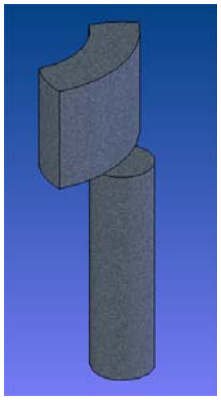
◄ **Figura 4.5**. Soportes empleados en el motor de pasos de estator simple.

- **Núcleos**

El material con que está hecho este componente debe ser ferromagnético, lo que resulta de vital importancia para el desempeño del motor. Pues la

reluctancia magnética de este material resulta ser baja ($\mu \rightarrow \infty$), lo que provoca que las pérdidas de flujo magnético por su paso en el circuito magnético sean menores. El calentamiento excesivo (temperatura de Curie) en la pieza, provocado por un corte rápido al manufacturar, puede provocar pérdidas de cualidades magnéticas, afectando el funcionamiento del motor. En la figura 4.6 se muestra una imagen del núcleo del MES, las características geométricas mostradas corresponden al caso de estudio particular del motor.

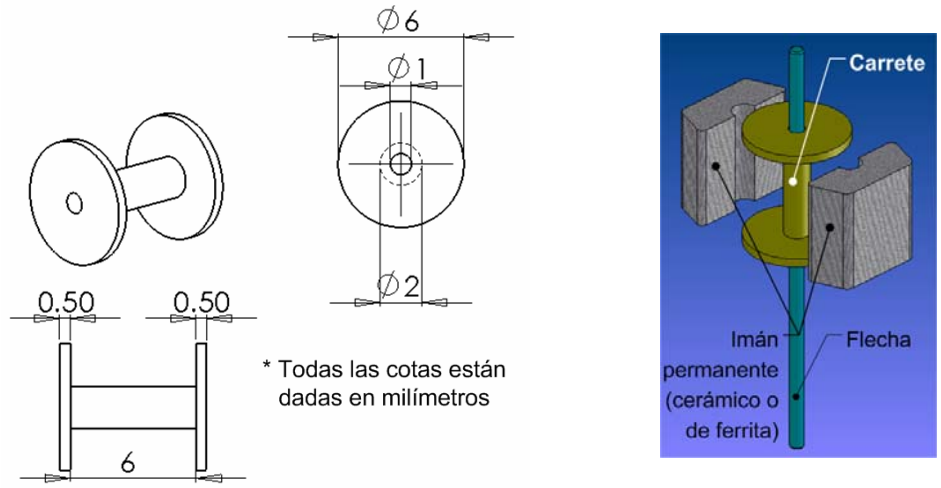




◄ **Figura 4.6**. Núcleo de la bobina empleada en el motor de pasos de estator simple.

- **Rotor**

El rotor del motor está compuesto por un cuerpo tipo carrete, una flecha y dos trozos de imán permanente. El rotor se acopla al motor únicamente mediante una flecha. La materia prima empleada para el cuerpo del rotor debe cumplir la condición de ser magnéticamente neutro, es decir, no se polariza por el efecto de los imanes permanentes que lo rodean. Así mismo, debe procurarse que sea un material resistente a quebraduras y de fácil manejo al manufacturar. La figura 4.7 muestra el dibujo del rotor semi-armado y el plano del cuerpo del rotor diseñado para el MES de condiciones particulares tomadas como caso de estudio.



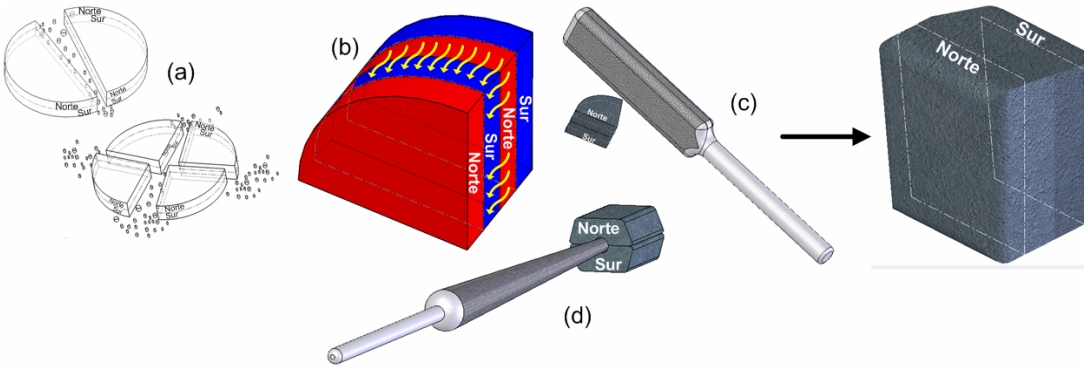
▲ **Figura 4.7.** Rotor del MES. Plano del cuerpo del rotor e imagen del rotor completo.

- **Imanes (dientes del rotor)**

La manufactura de estas piezas es completamente artesanal. El mayor problema para realizar esta pieza es encontrar los imanes adecuados. La imantación de éstos debe ser de forma axial. El objetivo es que, teniendo los elementos magnéticos que se tengan (pastillas de bocinas, imanes de forma redonda, cuadrada, cilindros, etcétera), se busque que los dos polos salientes del rotor sean contrarios. El caso ideal es que los dos polos del rotor formen en conjunto un cilindro, tal como se muestra en la figura 4.8.

▲ **Figura 4.8.** Rotor del motor de estator simple.

En la figura se puede apreciar que la manufactura de los dientes del rotor, o bien, de los imanes del rotor, se logra partiendo una pastilla magnética hasta tener trozos que son de tamaño equiparable con el tamaño mismo de dichos dientes (figura 4.9a). Después dos trozos de la pastilla son unidos por la fuerza magnética natural entre ellos (figura 4.9b). Finalmente se le da una forma deseada a estos dos trozos de imán con ayuda de limas de distintas formas (figura 4.9c,d).



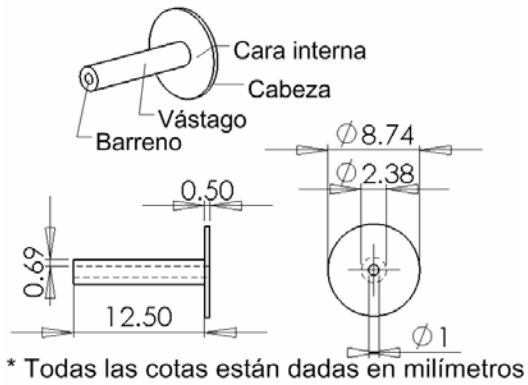
▲ **Figura 4.9.** Construcción de los dientes del rotor de estator simple.

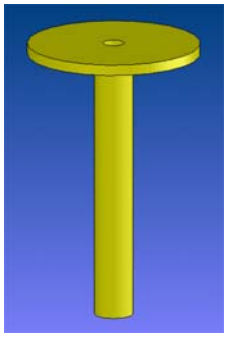
- **Buje para la flecha**

El objetivo de esta pieza es permitir una mejor alineación entre el estator y el rotor, lográndolo mediante una mejor alineación de ambos soportes del estator (el de material conductor y el no conductor), y en consecuencia, un mejor alineamiento de la flecha del rotor con el estator. Lo que da como resultado mejor estabilidad del rotor. Al igual que para el carrete del rotor, la elección de la materia prima tiene que ver con su neutralidad magnética.

La figura 4.10 muestra el dibujo y plano donde se muestran las características geométricas del buje para la flecha del motor en proporción al las particularidades del caso de estudio.

Figura 4.10 ► Buje de la flecha del motor de estator simple, dibujo y plano de características geométricas



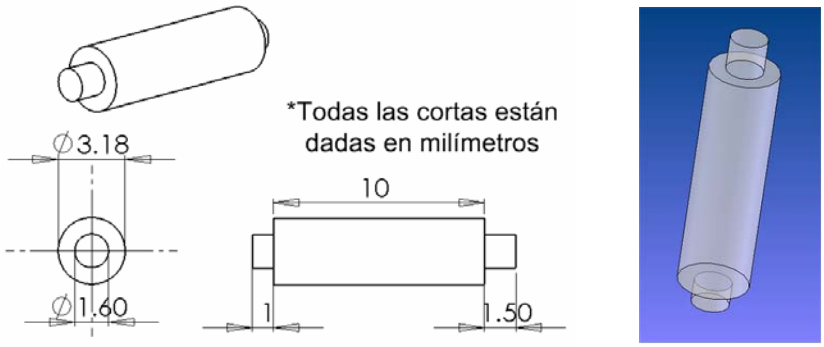


- **Separadores**

Además de dar soporte al estator, los separadores cumplen una doble función, ya que a través de ellos se colocan unos aros que facilitan la conexión de las bobinas del estator entre ellas. Dado que su función en el motor es de acoplamiento, y no de funcionamiento, estos separadores pueden ser hechos a

partir de casi cualquier material, siempre y cuando éste sea macizo. Se recomienda el uso de materiales como el acrílico, PVC, plástico, etcétera. Cuando se realiza el diseño de esta pieza, y si las dimensiones del motor lo permiten, se recomienda que el cuerpo de esta pieza sea de diámetro estándar, lo que evitaría un paso más en su manufactura. Que es el caso del separador de la figura 4.11.

Figura 4.11
► Imagen y plano de los separadores.

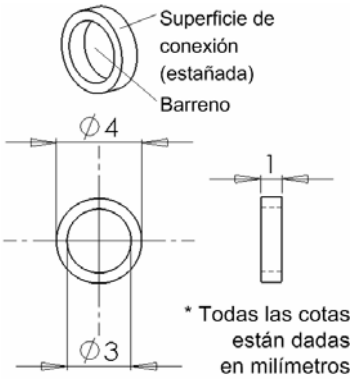


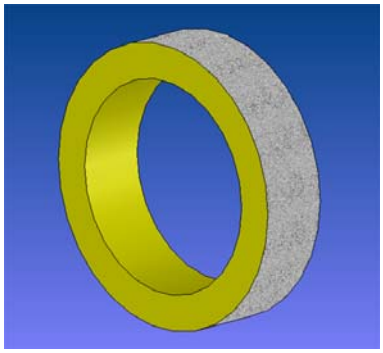
Tanto el cuerpo, como las cabezas del separador son de diámetro estándar, lo que facilita su fabricación y armado de las cabezas en barrenos perforados previamente con brocas estándar.

- **Aros de conexión**

Se recomienda que el material usado para su manufactura sea metálico, ya que se estaña sobre la superficie de estos elementos, con el fin de que la tarea de soldar las bobinas entre sí sea mucho más fácil. Se recomienda el uso de latón como materia prima.

La figura 4.12 muestra el dibujo y características geométricas de los aros de conexión apropiados para las dimensiones del motor que se desarrolla como caso de estudio.



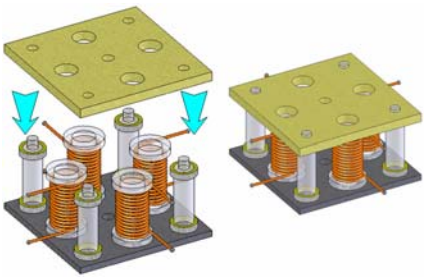


◄ Figura 4.12.
Dibujo y plano de un aro de conexión para el motor a pasos de estator simple.

4.1.3 Ensamble del motor

Un primer paso es fijar, con pegamento de contacto, dos aros de conexión a ambas orillas, de cada un de los cuatro separadores (en la figura 4.13 se muestra un ejemplo).

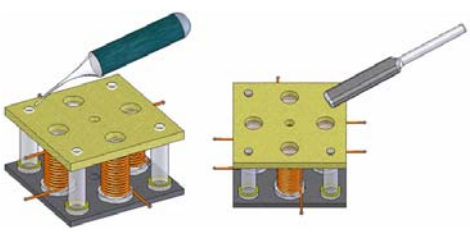
Figura 4.13 ►
Pegado de los aros de conexión en los separadores.



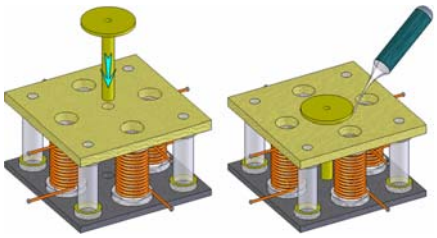
▲ **Figura 4.14**. Ensamble del estator del MES.

Después se colocan las cuatro bobinas del motor sobre el sujetador acero dulce, como se muestra en la figura. Se colocan también los separadores laterales y el sujetador de fenolica (figura 4.14).

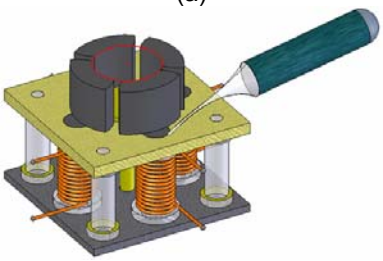
Teniendo esta estructura de emparedado, se pegan las cabezas de los separadores a las placas (o sujetadores), y de ser necesario se liman los sobrantes de las cabezas que sobresalgan de las placas, esto se aprecia en la figura 4.15a. Después se coloca el buje de la guía del motor y también se pega (figura 4.15b). La cabeza redonda de éste último sirve como guía para colocar los núcleos de las bobinas (ver figura 4.15c). Por último, se coloca el rotor como se muestra en la figura 4.15d.



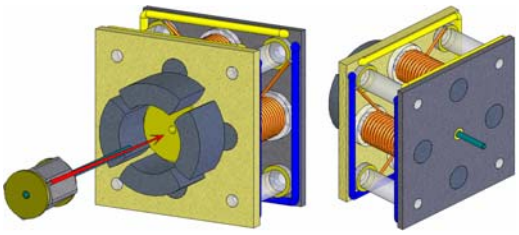
(a)



(b)



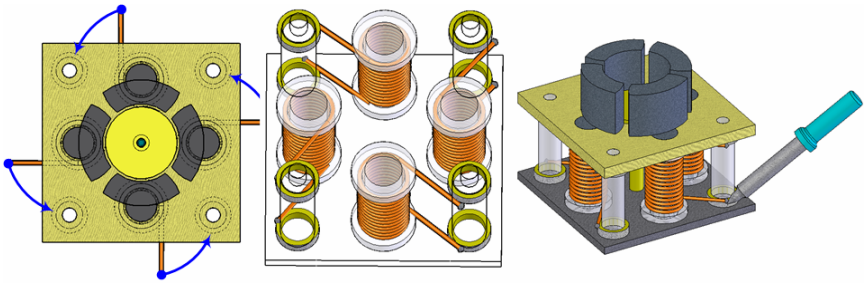
(c)



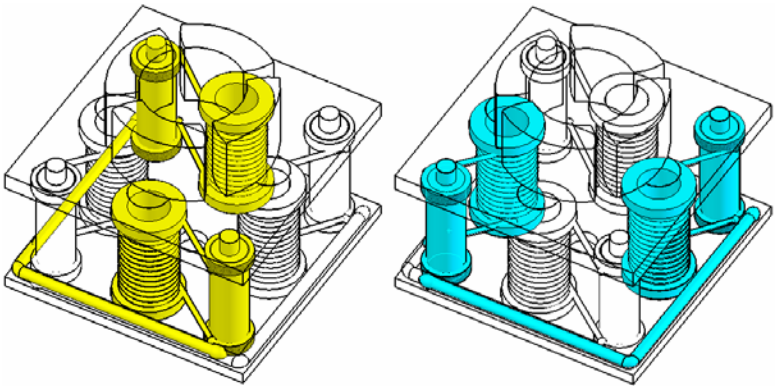
(d)

▲ **Figura 4.15.** Proceso final de ensamble del estator.

Los detalles del circuito eléctrico del MES ya se han comentado en el capítulo anterior. La conexión de las bobinas del estator a los aros estañados que se propone es como la que se muestra en la figura 4.16a. Para formar las fases, la conexión entre aros se muestra en la figura 4.16b, en la que se aprecia que cada bobina queda conectada en serie con la que se encuentra a 180° de ella.



(a)



(b)

▲ **Figura 4.16.** (a) Conexión de las bobinas a los aros de conexión del motor de estator simple. (b) Conexión de las dos fases del motor.

4.1.4 Prueba de funcionamiento

a) Circuito eléctrico.

Con un multímetro se verifica que exista continuidad entre las bobinas de cada fase del estator y no entre bobinas de fases distintas, ni entre alguno de los extremos de las bobinas con su respectivo núcleo, ni con el sujetador de acero dulce.

b) Circuito magnético

Con una fuente de CD se puede hacer la siguiente. En función de los parámetros del alambre magneto que se emplee para embobinar los inductores del motor, es como se calcula el rango de voltaje adecuado que puede ser aplicado a las mismas. Para el caso particular del motor a pasos que se

desarrolla como parte del trabajo de esta tesis, los cálculos requeridos se presentan a continuación:

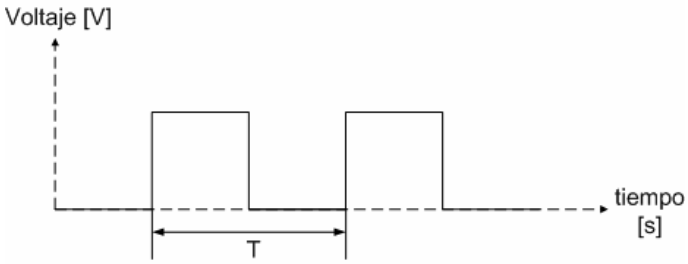
En la tabla 6 se muestran las características del alambre magneto AWG40 con el que se embobinaron los inductores del motor:

Características de las bobinas del MES	
Carga máxima en Amperes para alambre de calibre 40AWG **($I_{MÁX}$)**:	15 [mA]
Resistencia óhmica por fase **(R)**:	54*x*2 = 108 [Ω]

▲ **Tabla 6.** Parámetros establecidos para el alambre magneto AWG40 y las bobinas del MES.

La forma de onda de la señal de voltaje aplicado es rectangular, como se ve en la figura 4.17:

Figura 4.17 ►
Forma de onda de la señal de voltaje recibida por las fases del motor a pasos.



El voltaje promedio se calcula como:

$$V_{PROM} = \frac{1}{T}\int_0^T V(t)dt \qquad (4.1)$$

donde T es el periodo de la señal.

Si se supone una señal con 50% de ciclo de trabajo, a una frecuencia de 100 [Hz] y un voltaje pico de 5 [V], se tiene:

$$V_{PROM} = \frac{1}{0.01}\int_0^{0.01*0.5} 5\cdot dt = 100\int_0^{0.005} 5\cdot dt = 2.5[V]$$

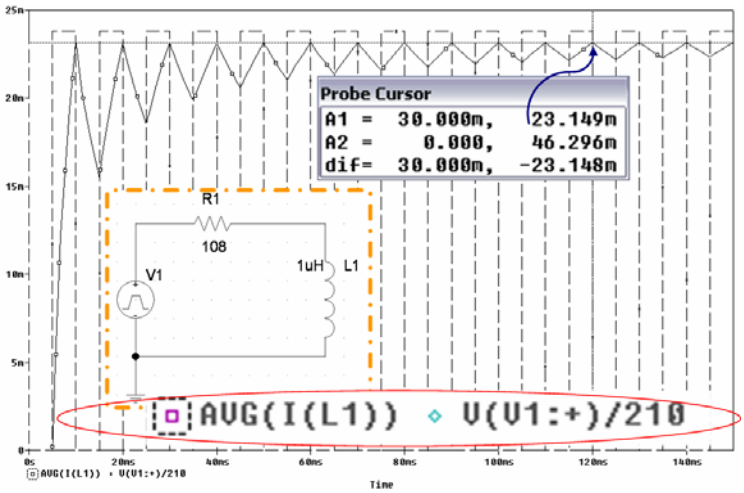
Por tanto la corriente promedio es:

$$I_{PROM} = \frac{V_{PROM}}{R} \qquad (4.2)$$

$$= \frac{2.5[V]}{108[\Omega]} = 23.15[mA]$$

En una simulación de este circuito con PSpice, la gráfica de corriente obtenida es como las que se muestra en la figura 4.18:

Figura 4.18 ►
Simulación en PSpice de la corriente promedio que atraviesa una fase del motor.



En la figura 4.18 se muestra que los cálculos de las ecuaciones 4.1 y 4.2 coinciden con la simulación hecha por computadora. Cabe aclarar que el voltaje representado en la gráfica de la figura 4.18 (con la línea no continua) está escalado en un factor de 1/210, con el fin de que pudiera compararse el comportamiento de la señal de voltaje de entrada contra la señal de corriente promedio en una misma imagen.

De lo anterior se puede observar que la corriente promedio y la carga máxima en Amperes para alambre de calibre 40AWG mostrado en la tabla 5 no difieren de manera abrupta, y por ello se justifica la consideración de que el voltaje aplicado para las bobinas de los motores puede ser del orden de 3 veces mayor al calculado por la Ley de Ohm:

$$V_{APLICADO} = 3 \cdot R\, I_{MÁX} \qquad (4.3)$$

$$V = 3(R \cdot I) = 3(108 \cdot 15x10^{-3})[\Omega][\mathrm{A}] = 4.86[\mathrm{V}]$$

$$\mathbf{4.86[V] \leq V_{aplicado}}$$

Teniendo en consideración este voltaje (aunque el motor puede funcionar desde antes de alcanzar una polarización de 4.86 [V] CD por fase), se puede hacer la prueba de funcionamiento del circuito magnético. Se polariza una de las fases del motor y se mide el campo magnético generado en cada una de las dos zapatas, verificando que sean campos complementarios y de magnitud semejante. Se procede después a hacer lo mismo con la otra fase, y se verifica

que la magnitud de los cuatro campos magnéticos medidos sea similar. Por último, lo que se tiene que hacer, es ir polarizando en orden las fases del estator y verificar que el rotor gire un paso por cada aplicación de voltaje hasta completar una revolución completa del rotor, es decir cuando éste haya girado 4 pasos de 90° cada uno, completando así 360°. El proceso de desarrollo de este motor se verá en el siguiente capítulo, así como, la prueba de avance por pasos, cuando se muestren las pruebas y resultados de este trabajo de tesis.

Experimentalmente se ha aplicado un voltaje de hasta 7 [V], sin que se hayan destruido las bobinas del motor por exceso de temperatura (pero este voltaje no fue aplicado por un tiempo mayor de 5 segundos). Esto no quiere decir que 7 [V] sea el voltaje más óptimo de funcionamiento, un voltaje de así o mayor pueden acortar el tiempo de vida útil del motor.

4.2 Motor de Doble Estator

4.2.1 Diseño de los componentes del motor

Algunas de las consideraciones que se hacen al diseñar los componentes del MES, se hacen también para el motor de doble estator. Las consideraciones que deben hacerse para el diseño de los componentes del motor de doble estator son:

- La forma geométrica de los núcleos de las bobinas de los estatores es, por lo general, redonda (por practicidad en el proceso de manufactura); sin embargo esto no siempre es así para la forma de los imanes del rotor, éstos pueden tener formas irregulares. El requerimiento de diseño para determinar la ubicación de los polos salientes del estator y del rotor, es que exista coincidencia en alguna posición determinada entre, al menos, dos polos del estator con dos polos del rotor.
- En número de polos salientes del estator debe ser par, al igual que el número de imanes permanentes del rotor. Sin embargo el número de polos del rotor no debe, necesariamente, coincidir con el número de imanes permanentes del rotor.

- La distancia angular entre los polos del rotor, al igual que los del estator, debe ser igual entre todos ellos.
- La elección del número de bobinas, y en consecuencia del número de fases, va de la mano con la elección del circuito integrado para el control de los motores.
- La longitud de los entrehierros se obtiene experimentalmente.
- El diámetro de la barra de la flecha está en función del diámetro interior de los rodamientos utilizados, con el fin de que la flecha ensamble con ambos rodamientos.
- Sea de las dimensiones que sea el motor a desarrollar, todos sus componentes deben ser proporcionales entre sí.
- Si las dimensiones del motor a desarrollar lo permiten, podrá evitarse la manufactura de algunas piezas, si se establece que éstas sean de diámetro, ancho o longitud (según sea el caso) estándar. El caso de los sujetadores es un buen ejemplo.

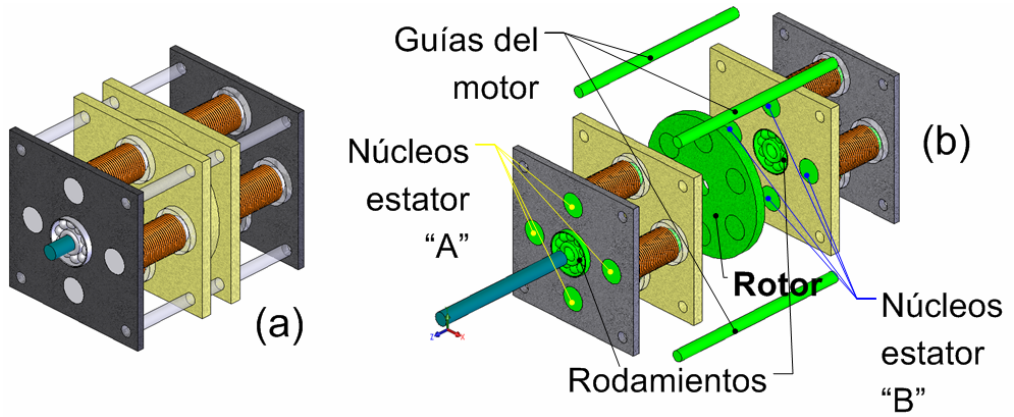
4.2.2 Manufactura de los componentes del motor

El capítulo anterior (específicamente páginas 35 a 39) hizo una descripción de un caso particular de MDE, donde se explicó la estructura de sus componentes, la configuración de su circuito eléctrico y el funcionamiento de su circuito magnético. Aunque dicha descripción fue hecha para un caso particular, el principio de funcionamiento en cualquier otro caso sigue siendo el mismo.
La tabla 7 contiene un resumen de los componentes que se necesitan para desarrollar un MDE. La figura 4.19a y 4.19b muestran respectivamente un diagrama del motor ensamblado y un diagrama en explosivo del mismo.

Motor de Doble Estator			
Componente	**Número de piezas empleadas**	**Máquinas necesarias para la manufactura**	**Figura de referencia**
Bobina	8	Torno	4.3
Soporte ferromagnético	2	Fresa, taladro, limas	4.6
Soporte no conductor	2	Fresa, taladro, limas	4.6
Núcleo de la bobina	8	Torno	4.25

Rotor	1	Torno, taladro y esmeril	4.26
Flecha	1	SIN MANUFACTURA	4.29
Guías del motor	4	SIN MANUFACTURA	4.23
Rodamientos	2	-----	4.23
Imanes del rotor (imantación axial)	6	-----	4.29

▲ **Tabla 7**. Piezas que conforman al motor de doble estator.



▲ **Figura 4.19.** (a)Motor de Doble Estator totalmente ensamblado. (b)Vista en explosión.

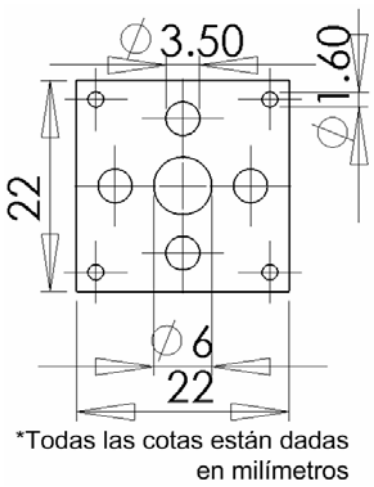
De la figura 4.19, y haciendo una comparación de la tabla 4 con la tabla 6, se aprecia que la mayoría de los componentes del MES coinciden con los del MDE. Y por ello se omitirá la redundante explicación de los componentes que son comunes entre estos dos motores.

- **Soporte ferromagnético y no conductor**

Como se mencionó, en la sección de diseño de los componentes, los polos del rotor deben coincidir con los imanes del rotor. Y bajo este principio se diseña este componente. Con ayuda de un paquete modelador de sólidos se ubica la posición de los barrenos de los sujetadores (o placas), y al mismo tiempo los del rotor.

En la figura 4.6 se mostró un plano de un motor tomado como caso particular para el MES. Para el caso del MDE se tiene que dos placas alojan un rodamiento, de ahí que el barreno central sea la única diferencia (ver figura 4.20).

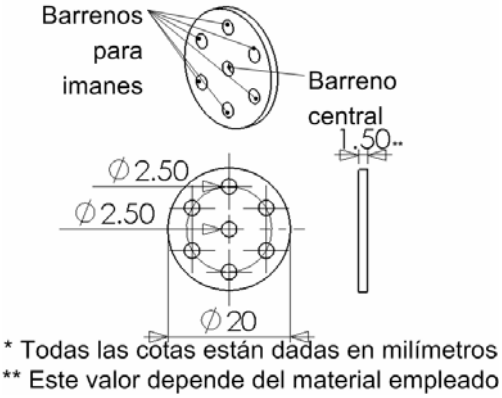
De la figura 4.20 se puede apreciar que el diámetro de los barrenos de las esquinas, por donde pasan las guías del motor, es estándar (1/16") y por lo tanto dichas guías no necesitan algún proceso de manufactura.

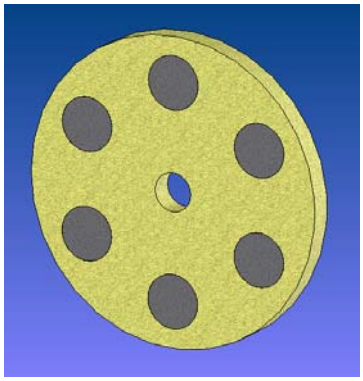


▲ Figura 4.20
Barreno central de los sujetadores donde se alojan los rodamientos.

- **Rotor**

Como se acaba de mencionar arriba, la ubicación de los orificios para los imanes de este componente está relacionada con la ubicación de las bobinas en el estator. El número de imanes está en función del número de pasos que se requieran. Para el caso particular tratado en esta tesis se trata de seis imanes permanentes de forma redonda, tal como se muestra en la figura 4.21.





◄ Figura 4.21. Dibujo y plano de las características geométricas del rotor del motor de doble estator.

Debe procurarse que el material con el que se realice esta pieza sea ligero, por ejemplo, acrílico o fenolica son buenas opciones. Pues si el material del mismo rotor resulta ser pesado, el motor se vería más forzado a romper el momento de inercia del mismo cuerpo del rotor.

- **Núcleos**

Comparando el núcleo de este motor con el del motor de estator simple, se puede observar que la única diferencia, en cuanto a geometría, es que este núcleo no tiene zapata; se trata sólo del vástago. La materia prima elegida para desarrollar estas piezas debe estar directamente relacionada con sus propiedades ferromagnéticas (mencionadas antes cuando se habló de los núcleos del MES), por ello se recomienda usar acero.

Para el caso particular de desarrollo de este motor, se tienen el plano con las dimensiones mostradas en la figura 4.22.

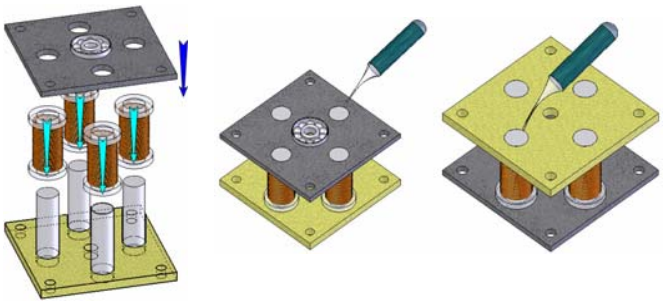
◄ **Figura 4.22.** Dibujo y plano del núcleo para el motor a pasos de doble estator

4.2.3 Ensamble del motor

Antes de hacer este ensamble se tienen que hacer las pruebas de funcionamiento del circuito magnético del motor, estator por estator. Esto se verá más adelante.

El ensamble de este motor es muy similar al del MES, a diferencia de que un par de placas alojan en sus barrenos centrales un rodamiento. Se forma una estructura de emparedado con los sujetadores de material no conductor y ferromagnético (figura 4.23a), entre las que se colocan los núcleos de los motores y sus respectivas bobinas. Se debe poner atención a la colocación de las bobinas, sus campos generados deben ser complementarios. Ya ordenados los elementos de esta forma, se pegan como se muestra en la figura 4.23b.

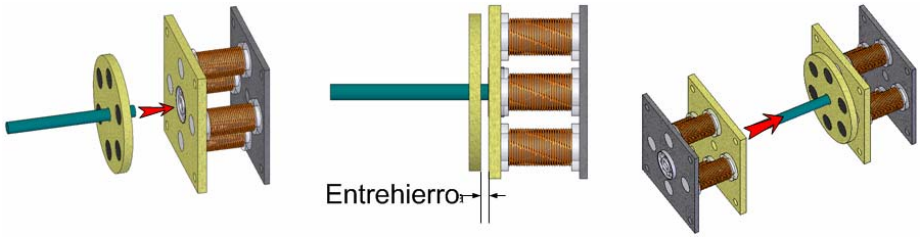
Figura 4.23 ►
(a) Ensamble de un estator.
(b) Pegado de las piezas.



(a) (b)

Esto último se hace también para el otro estator, el que aloja el rodamiento en el sujetador de material no conductor. Si se tienen excesos de material de los núcleos de las bobinas, cuando seca el pegamento, éstos se pueden rebajar con ayuda de un esmeril o un *dremel*, dejando libres los núcleos de pegamento para no intervenir el paso de flujo magnético y que no se vea afectada la reluctancia del entrehierro.

Para determinar la longitud de los entrehierros se usa la flecha del motor. La cual se introduce por el orificio central del rodamiento alojado en el sujetador de material no conductor (ver figura 4.24). La flecha debe entrar a presión. Así mismo, se coloca el otro estator, teniendo cuidado de que las bobinas quedan enfrentadas de forma que sus campos generados sean complementarios.



▲ **Figura 4.24.** Colocación del rotor en ambos estatores.

El entrehierro tendrá que ajustarse experimentalmente, cambiando la longitud de éste hasta encontrar la mejor posición de ambos estatores respecto al rotor.

4.2.4 Prueba de funcionamiento

a) Circuito eléctrico

Al igual que se hace para el MES, la verificación de continuidad de la conexión de las bobinas de cada fase del estator debe hacerse. Se verifica que no haya continuidad entre bobinas de fases diferentes y que tampoco exista continuidad entre alguno de los alambres de las bobinas con sus respectivos núcleos o con los sujetadores de material ferromagnético.

b) Circuito magnético

El análisis para este circuito se hace de forma similar a la que se hizo anteriormente para el circuito del MES. En función de los parámetros del alambre magneto que se emplee para embobinar los inductores del motor, es como se calcula el rango de voltaje adecuado que puede ser aplicado a las mismas. Para el caso particular del motor a pasos que se desarrolla como parte del trabajo de esta tesis, los cálculos requeridos se presentan a continuación:

En la tabla 8 se muestran las características del alambre magnético AWG40 con el que se embobinaron las bobinas del motor:

Características de las bobinas del MDE	
Carga máxima en Amperes para alambre de calibre 40AWG **($I_{MÁX}$)**:	15 [mA]
Resistencia óhmica por fase **(R)**:	42*x*4 = 168 [Ω]

▲ **Tabla 8.** Parámetros establecidos para el alambre magneto AWG40 y las bobinas del MDE.

La forma de onda de la señal de voltaje aplicado es la misma que se consideró en el caso del MES (figura 4.17). Los cálculos de voltaje y corriente promedio son los mismos que se hicieron con las ecuaciones 4.1 y 4.2, y por ende:

$$I_{PROM} = \frac{V_{PROM}}{R} = \frac{2.5[V]}{168[\Omega]} = 14.88\,[mA]$$

Comparando este valor de corriente promedio y la carga máxima en Amperes para alambre de calibre 40AWG mostrado en la tabla 8, la corriente promedio resulta ser un poco menor; es por ello que se considera de que el voltaje aplicado para las bobinas de los motores puede ser del orden de 3 veces mayor al calculado por la Ley de Ohm:

$$V_{APLICADO} = 3 \cdot R\, I_{MÁX}$$

$$V = 3(R \cdot I) = 3(168 \cdot 15x10^{-3})[\Omega][\mathrm{A}] = 7.56[\mathrm{V}]$$

$$\mathbf{7.56\ [V]\ \leq\ V_{aplicado}}$$

Teniendo en consideración este voltaje, se puede iniciar la prueba de funcionamiento del circuito magnético. Teniendo solamente los estatores armados, no el motor ensamblado por completo se polariza una fase (llámese F1) de alguno de los dos estatores (E), y con ayuda de un teslámetro colocado en el extremo del núcleo de la bobina (del lado del sujetador de material no conductor), se mide el campo magnético producido en cada uno de los dos núcleos de las bobinas de esa fase. Debe verificarse que éstos sean campos magnéticos complementarios y que su magnitud en Teslas [T] sea similar. Después se polariza la otra fase del mismo estator (llámese F2), y se hace la misma verificación con el teslámetro. La magnitud en Teslas [T] de los campos magnéticos producidos en los núcleos de ambas fases (F1 y F2) debe ser similar en los cuatro núcleos. Por último se hace el procedimiento anterior para el otro estator (E'), con el fin de verificar que los campos magnéticos sean complementarios en cada fase (F1' y F2'), y a su vez, que éstos cuatro tengan una magnitud similar a los del primer estator (E) probado.

Una vez que se hayan realizado estas pruebas, se puede ensamblar por completo el motor. La longitud de los entrehierros es determinada experimentalmente, así que una vez que se conozcan dichas distancias se pueden colocar y pegar las cuatro guías del motor con el fin de que éste quede fijo definitivamente. Para el caso particular de estudio que se tomó para este trabajo de tesis, estas guías son de diámetro estándar, así que sólo se cortan de la longitud necesaria, y se pegan a los orificios de las placas del motor (como se mostró en la figura 4.19b). Por último, para este motor de dos fases y seis imanes en su rotor, queda verificar que el motor gire 12 pasos por revolución, polarizando en orden ambas fases.

4.3 Motor de Fuerza de Lorentz

Como se ha venido desarrollando en este trabajo de tesis, se llevará de forma paralela la metodología de desarrollo del motor de Fuerza de Lorentz, junto con

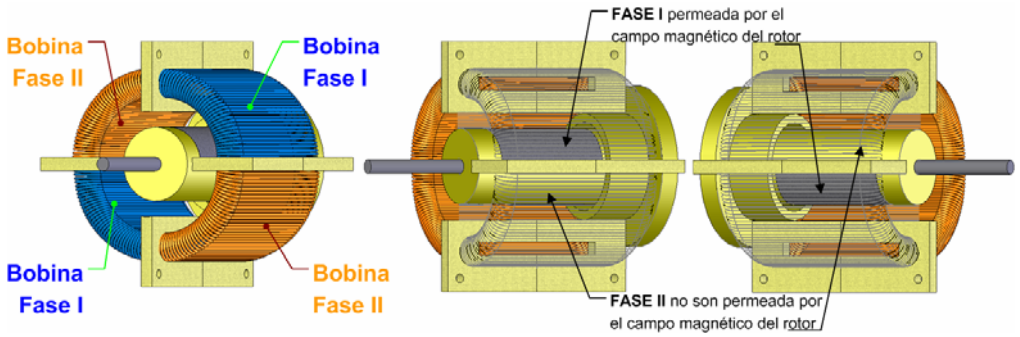
el desarrollo del caso de estudio particular de este motor. Se espera que con ello la aplicación de dicha metodología de desarrollo quede más clara. Al igual que para el caso del MES, el MFL a desarrollar en esta sección será se dos fases y dos polos en su rotor.

Como ya se había mencionado en capítulos anteriores, este motor lleva el nombre del principio de operación bajo el que funciona. Este motor no tiene alguna similitud a los otros dos motores de los que se ha tratado hasta ahora.

4.3.1 Diseño de los componentes del motor

Las dimensiones de los componentes de este motor (como las de los dos motores anteriores) se diseñan con ayuda de *software* tipo CAD, por medio de este *software* que se ensambla y se compara si las piezas son adecuadas, de no serlo, simplemente se vuelven a modificar hasta llegar a un punto en que todas ellas tengan las condiciones adecuadas. Algunos de los aspectos a considerar al diseñar este motor son los siguientes:

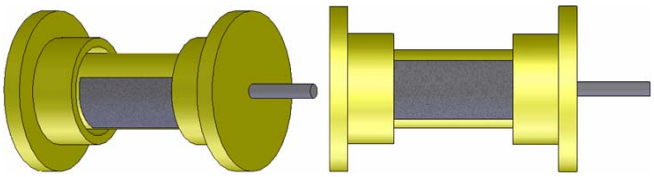
- En el rotor: Se debe buscar que la superficie de imán que da frente a las bobinas coincida con una sola fase a la vez (la que se energiza en un momento determinado). Así mismo, que la superficie del cuerpo del rotor aísle la parte magnética del rotor de la otra fase (la que no se energiza cuando la otra sí lo hace). Esto con el fin de evitar que las dos fases sean atravesadas por el campo magnético del imán permanente del rotor al mismo tiempo, ver figura 4.25.



▲ **Figura 4.25.** Parámetro de diseño del rotor del motor de Fuerza de Lorentz.

- La altura del cilindro de las bases del motor están en función de los extremos de latón del rotor, como se muestra en la figura 4.26.

Figura 4.26 ►
Parámetro de diseño de las bases.



Esta altura es considerable con respecto a la altura total del rotor ya que es en esta región donde se espera que el embobinado del alambre magneto sea más uniforme (requisito importante para el funcionamiento del motor).

- Para que el rotor gire libremente, su diámetro es tal que éste no embone apretadamente en las bases del motor. Estos se aprecia también en la figura 4.26.
- En simulación de ensamble del motor, se debe buscar que el espacio destinado al embobinado de los inductores sea suficientemente amplio, igualmente que el espacio entre las bobinas y el rotor no sea muy grande.
- Debe procurarse que el diámetro de la flecha del motor sea de diámetro estándar, bajo esta condición no necesitará manufactura.
- Recomendación: En función del ancho de los imanes con los que se cuente para hacer el rotor, debe cortarse la “ventana” del cuerpo del rotor, donde van incrustados éstos.

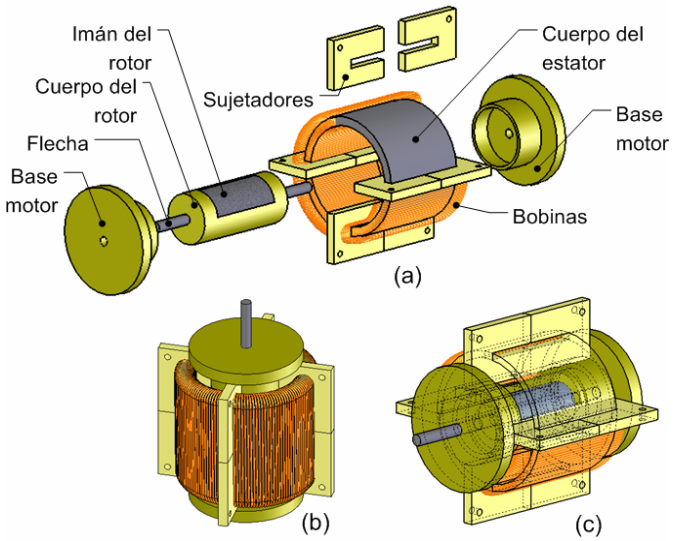
4.3.2 Manufactura de los componentes del motor

En la tabla 9 se presenta una lista de las piezas que conforman al motor de Fuerza de Lorentz. Los términos empleados para denominar a cada una de las piezas son los mismos que se usaron en la figura 4.27.

Motor de Estator de Fuerza de Lorentz			
Componente	**Número de piezas empleadas**	**Máquinas necesarias para la manufactura**	**Figura de referencia**
Base del motor	2	Torno	4.31
Rotor	1	Torno y taladro y/o limas.	4.31
Sujetadores	8	Segueta, fresa y limas	4.34
Cuerpo del estator	1	Segueta	4.38

Embobinado	4	-----	4.34
Flecha	1	Sin manufactura	4.34

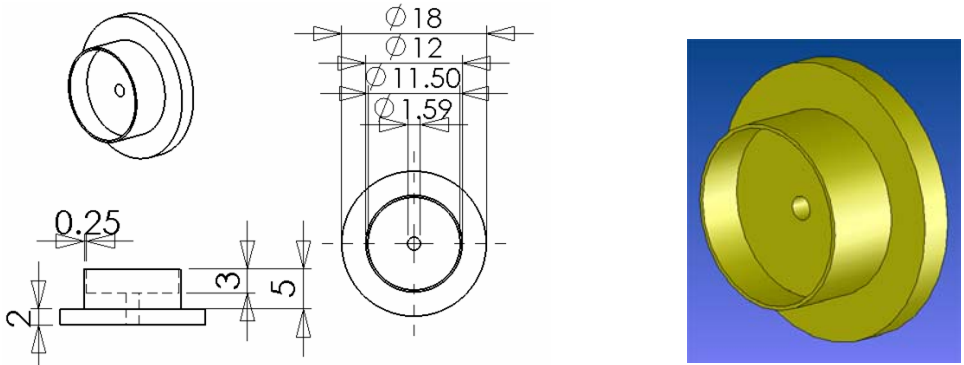
▲ **Tabla 9**. Piezas que conforman al motor de Fuerza de Lorentz.



◄ **Figura 4.27.** Motor de Fuerza de Lorentz. (a)Dibujo explosivo. (b)Motor completamente ensamblado. (c)Dibujo del motor completamente ensamblado con vista al interior.

- **Base del motor**

El material que se emplea para fabricar este componente debe ser diamagnético, su influencia magnética debe ser nula, así su interacción con un campo magnético manifestará una repulsión casi nula, o bien, ningún efecto. La forma geométrica de la base del motor es como la que se muestra en la figura 4.28, en esta misma imagen se hace la descripción de las dimensiones particulares que se proponen como caso de estudio para desarrollar. Como materia prima se propone latón.



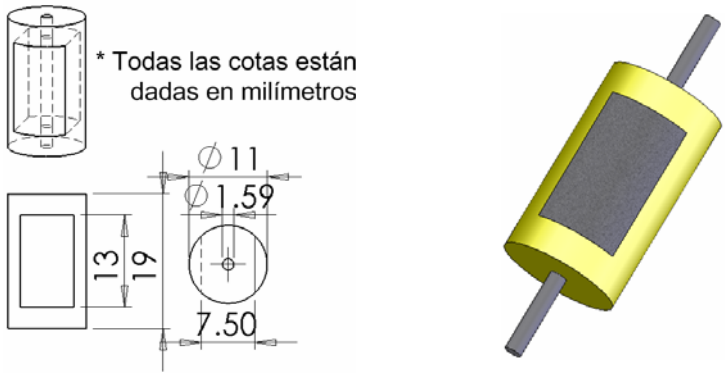
* Todas la cotas están dadas en milímetros

▲ **Figura 4.28.** Dibujo y plano de la características geométricas de una de las bases de motor de Fuerza de Lorentz.

- **Rotor**

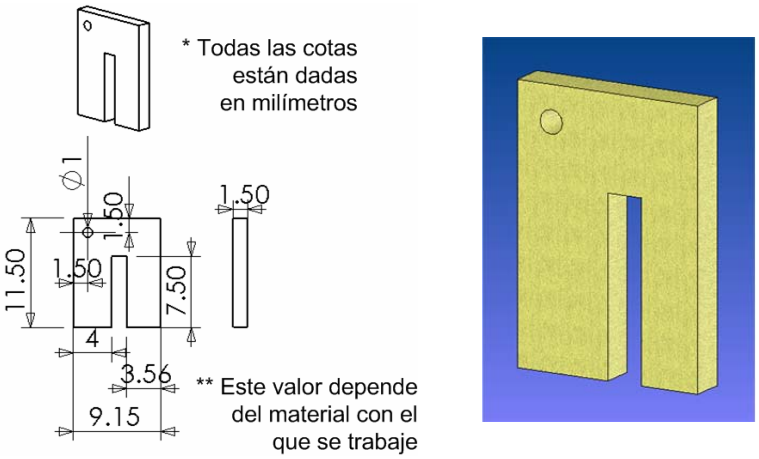
El rotor se compone de un cuerpo que aloja a los imanes permanentes y es travesado por una flecha. El material con el que se realiza el cuerpo del rotor debe cumplir las mismas características que el componente anterior. La figura 4.29 muestra las dimensiones del cuerpo del rotor, así como las dimensiones propuestas para el caso de estudio de desarrollo de este motor.

Figura 4.29 ► Cuerpo del rotor del motor de Fuerza de Lorentz.



- **Sujetadores**

La placa de material a partir de la cual se corten estos sujetadores debe ser no conductora, ni ferromagnética. Su función es dar soporte al motor y marcar la separación entre las bobinas del motor. Se recomienda buscar un material delgado. En la figura 4.30 se muestra la imagen de uno de los sujetadores, así como las dimensiones requeridas para este caso particular de diseño. Se emplea placa fenolica en dicho caso.

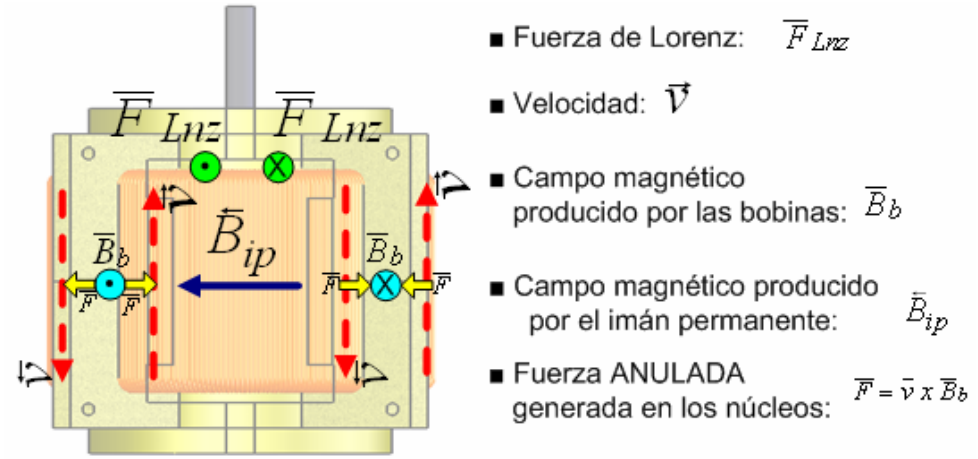


◄ Figura 4.30. Sujetador del motor de Fuerza de Lorentz.

- **Cuerpo del estator**

Si es que las dimensiones del motor a diseñar lo permiten, se recomienda usar directamente tubo de algún material ferromagnético (como se explicó en la página 41), ahorrando la manufactura de esta pieza, limitándose a realizar el corte del tubo de acuerdo al largo requerido. El hecho de que este cuerpo sea

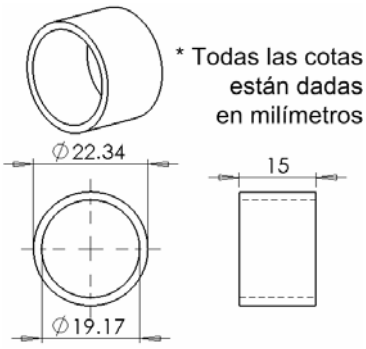
de material ferromagnético significa que, desde el punto de vista electromagnético, concatenará fácilmente dentro de sí la mayor parte del flujo magnético producido por las bobinas. Logrando que las fuerzas ($\overline{F}$) producidas por el producto cruz de los vectores velocidad de la partícula en el embobinado ($\overline{v}$) y campo magnético producido por las bobinas ($\overline{B}_b$), se anulen entre sí en todo el trayecto que implica la interacción de estos dos vectores. Así mismo, se busca que el campo magnético producido por las bobinas dentro del núcleo ferromagnético sufra la menor cantidad de pérdidas de fuga posible para que no influya sobre el vector campo magnético del imán permanente ($\overline{B}_{ip}$). Esto se muestra en el diagrama vectorial de la figura 4.31:

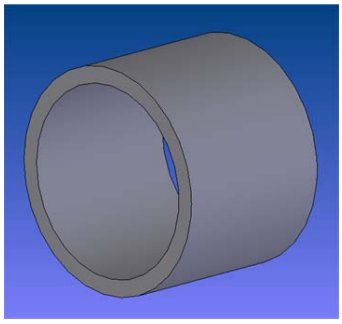


▲ **Figura 4.31.** Diagrama vectorial del MFL al polarizar una fase.

Para el caso particular del caso de estudio de desarrollo de este motor se emplea tubo de acero *cold rolled* de una pulgada. Su plano se muestra en la figura 4.32.

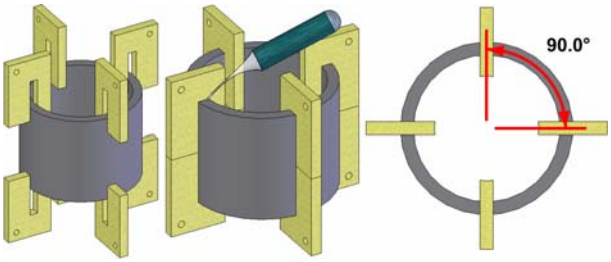
Figura 4.32
► Cilindro del cuerpo de estator del motor del Fuerza de Lorentz.





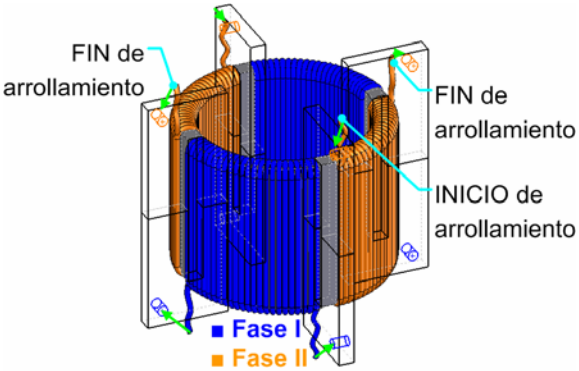
4.3.3 Ensamble del motor

Se colocan los ocho separadores en el cuerpo del rotor en cuatro pares, todos en cuadratura y dejando la orilla barrenada fuera del cilindro. Y se pegan como se muestra en la figura 4.33.



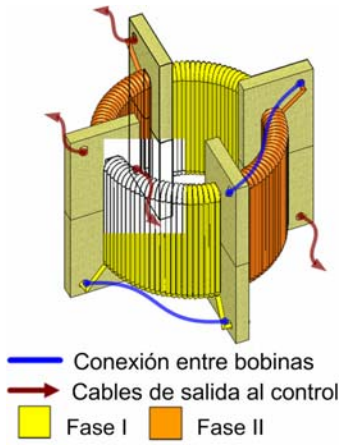
▲ **Figura 4.33.** Ensamble de los separadores en el cilindro.

Después de secado el pegamento, se embobina el alambre magneto sobre el cilindro de acero. A través de los barrenos hechos en los separadores se amarran los alambres del inicio y fin de embobinado de cada devanado. Se propone que los alambres de una fase se amarren todos del un mismo lado, y los de la otra fase del lado contrario (figura 4.34).



▲ **Figura 4.34**
Alambrado de las bobinas del motor de fuerza de Lorentz.

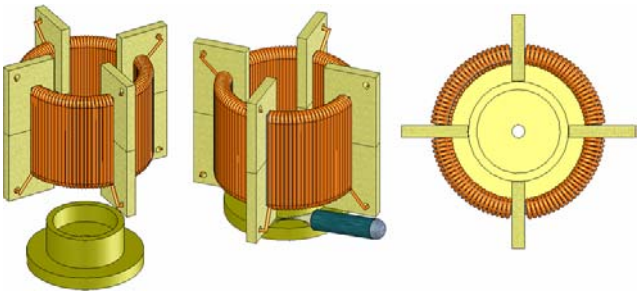
En esta imagen se muestra en color más oscuro la fase I, la que según la orientación del dibujo, es a través de los barrenos de los separadores de abajo (indicado por flechas) en donde se amarran los alambres de las bobinas de dicha fase. De igual forma, los alambres de la fase II (de color más claro) se amarran a través de los barrenos de arriba. Se debe procurar el alineamiento homogéneo del alambre en forma vertical (según la orientación de dibujo) a lo largo de toda la bobina, pues el movimiento del rotor depende de la dirección de flujo eléctrico en la lámina de corriente formada por cada vuelta del devanado. Se embobinan varias capas de alambre sobre el cilindro.



▲ **Figura 4.35.**
Propuesta de conexión del circuito eléctrico del motor de Fuerza de Lorentz.

Una vez embobinados los cuatro devanados del motor se retira la cubierta magnética del alambre de cada uno de los extremos de las bobinas, y se verifica

que exista continuidad en cada una de ellas. Si todas las bobinas son continuas, se procede a conectarlas entre sí para formar las dos fases del motor. En la figura 4.35 se muestra la conexión de las fases del motor. Al igual que para los motores

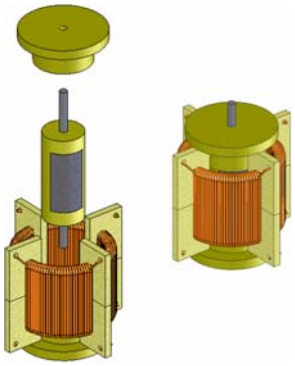


▲ **Figura 4.36**
Ensamble de una de las bases del motor.

de estator simple y de doble estator, el motor de fuerza de Lorentz tiene cuatro alambres de salida para el control de movimiento angular del rotor.

Después se pega una de las bases del estator a los sujetadores, embonándola con los sujetadores. Ver figura 4.36. Por último, se mete el rotor concréntricamente a la base previamente colocada. Y después se pega la otra base para cerrar el motor (ver figura 4.37). De acuerdo a las medidas dadas en los planos de las piezas manufacturadas, el cuerpo del rotor queda

justamente embonado entre las dos bases, sin que éstas lo presionen demasiado entre ellas. De tener algún problema de acoplamiento, se rebaja cualquiera de las piezas a modo de que el rotor pueda girar libremente sin presión por las bases del motor.



▲ **Figura 4.37.** Ensamble completo del motor a pasos de Fuerza de Lorentz.

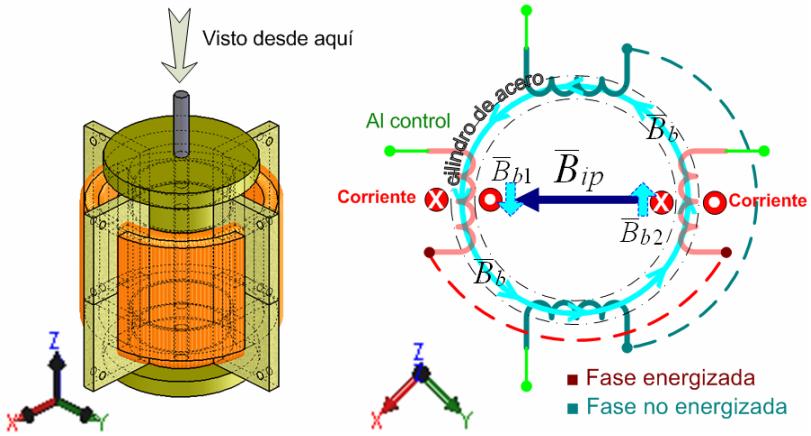
4.3.4 Prueba de funcionamiento

a) Circuito eléctrico

Como se ha hecho para los otros dos motores, se verifica (con un multímetro) que las bobinas sean continuas, así mismo se verifica la continuidad de cada fase y, no entre ellas.

A diferencia de los dos motores anteriores, el principio de funcionamiento del motor de fuerza de Lorentz no se basa en la fuerza de atracción de polos magnéticos opuestos manifestados en estator y rotor respectivamente, y por ende, tampoco se basa en el cierre del un circuito magnético como tal. Sí, existe un campo magnético concatenado en el único núcleo de las cuatro bobinas, pero la existencia de éste no influye en el comportamiento del motor. La figura 4.38 ilustra un diagrama vectorial de la situación que se manifiesta en el motor una vez que una de sus fases es energizada. Se han omitido algunos vectores para simplificar la explicación. En dicha figura se observa el campo magnético $\overline{B}_b$ generado por el paso de corriente eléctrica en la fase compuesta por las bobinas izquierda y derecha del dibujo, dicho campo magnético se encuentra dentro del cilindro de acero. Vectorialmente, si se sumara el campo magnético del imán permanente $\overline{B}_{ip}$ con el vector $\overline{B}_b$, se tendría que obtener primero el vector resultante de $\overline{B}_b$. En la misma figura se observa que cualquiera sea la orientación del vector $\overline{B}_{ip}$, éste siempre se topa con dos vectores $\overline{B}_{b1}$ y $\overline{B}_{b2}$ cuya resultante, en el caso ideal, siempre va a ser cero ($\overline{B}_b = \overline{B}_{b1} + \overline{B}_{b2} = 0$). Es por eso que $\overline{B}_{ip}$ no se ve afectado por $\overline{B}_b$, y en consecuencia tampoco se ve afectado el funcionamiento del motor.

Figura 4.38 ►
Diagrama vectorial del funcionamiento de una fase del motor de fuerza de Lorentz.



Las pruebas de funcionamiento de este motor son idénticas a las hechas en los otros dos motores, la única variante ha sido el voltaje de polarización para cada uno. En función de los parámetros del alambre magneto que se emplee para embobinar los inductores del motor, es como se calcula el rango de voltaje adecuado que puede ser aplicado a las mismas. Para el caso particular del motor a pasos que se desarrolla como parte del trabajo de esta tesis se embobinó con alambre magneto AWG30. Así que los cálculos se hacen en función de esta condición:

Características de las bobinas del Motor de Fuerza de Lorentz	
Carga máxima en Amperes para alambre de calibre 30 AWG (**$I_{MÁX}$**):	0.20 [A]
Resistencia óhmica por fase (**R**):	9 [Ω]

▲ **Tabla 10.** Parámetros establecidos para el alambre magneto AWG30 y las bobinas del MFL.

En la tabla 10 se muestran las características del alambre magnético AWG30 con el que se embobinaron las bobinas del motor:

La forma de onda de la señal de voltaje aplicado es igual a las de los dos motores anteriores. Por tanto la corriente promedio, de acuerdo con la ecuación 4.2, es:

$$I_{AVG} = \frac{V_{AVG}}{R} = \frac{2.5[V]}{9[\Omega]} = 0.278\,[A]$$

De esto se puede observar que la corriente promedio y la carga máxima en Amperes para alambre de calibre 30AWG mostrado en la tabla 9 no difieren de manera abrupta, y por ello se justifica la consideración de que el voltaje aplicado para las bobinas de los motores puede ser del orden de 3 veces mayor al calculado por la Ley de Ohm:

$$V_{APLICADO} = 3 \cdot R\, I_{MÁX}$$

$$V = 3(R \cdot I) = 3(9x0.2)[\Omega][\mathrm{A}] = 5.4[\mathrm{V}]$$

$$\mathbf{5.4\ [V]\ \leq\ V_{aplicado}}$$

Teniendo en consideración este voltaje, se puede hacer la prueba de funcionamiento del motor. Se polarizan en orden las fases del estator y se

verifica que el rotor gire un paso por cada aplicación de voltaje hasta completar una revolución completa, es decir cuando éste haya girado 4 pasos de 90° cada uno, completando así 360°.

Propuesta del Sistema Electrónico: Etapa de control y de potencia

El propósito de este capítulo es proponer un circuito de control y una etapa de potencia para los motores a pasos bipolares de los que se ha hablado hasta ahora. Existen diferentes maneras de controlar motores a pasos. Dado que el control de estos motores se lleva a cabo básicamente generando trenes de pulsos sincronizados, a los cuales se les pueda cambiar parámetros tales como frecuencia (para control de velocidad), ciclo de trabajo (para control de la potencia consumida), desfase entre ellos (dependiendo del número de fases del motor, para control de tipo de paso; medio paso, paso completo), secuencia de salida (para controlar el sentido de giro), etcétera; esta tarea es apta para microcontroladores programables. También existen circuitos integrados diseñados especialmente para esta tarea, con ellos se logra una implementación sencilla, ya que no es necesario desarrollar un código para programar el microcontrolador, ni una interfaz para que el usuario dé los parámetros requeridos, y tampoco una PC en donde se visualice y corra dicha interfaz. Con lo anterior no se dice que un camino sea mejor que otro, sino que dada la necesidad de sencillez de implementación, el empleo de circuitos integrados especializados es una buena opción.

Etapa de Control y Potencia

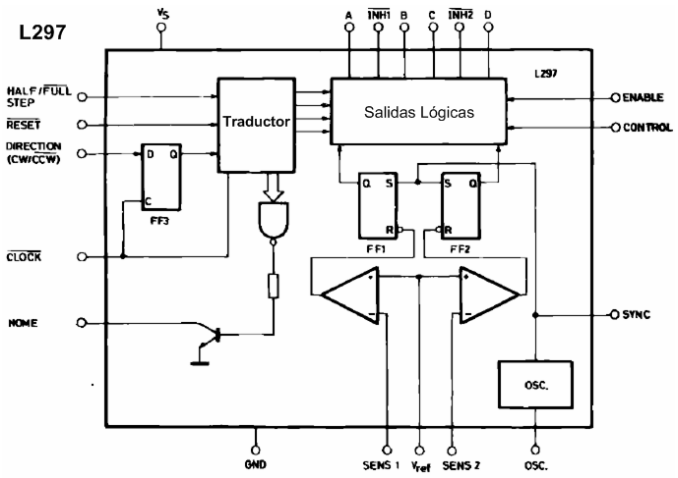
Como se mencionó en el capítulo 1, existen diferentes opciones para generar las señales de control que permiten controlar los motores de pasos sin necesidad de tener interruptores manuales. Tal es el caso de los dispositivos de estado sólido, los cuales se emplean como controladores para los motores a pasos generando las secuencias de señales necesarias para hacer girar al

motor con la frecuencia y sentido requeridos. Como ejemplo de estos dispositivos se puede mencionar a los microcontroladores PIC (*Peripheral Interface Controller*), GAL (*Generic Array Logic*), tarjetas de desarrollo para microntroladores, memorias lógicas, etcétera. Pero gracias al gran desarrollo de la electrónica digital y específicamente en tecnología para motores a pasos, existen dispositivos que han sido creados exclusivamente para el control de de este tipo de motores, tales como los C.I.s L297 y L298, los que comparados con otros dispositivos reducen considerablemente el costo del sistema de control. Además de que lo hacen menos robusto y, por lo tanto, más fácil de implementar. La elección de este par de C.I.s es por las siguientes razones [11]:

- Se trata de circuitos de gran versatilidad, fácil manejo y que requieren de muy pocos componentes externos.
- El fabricante deja solucionado el problema de buscar o diseñar un circuito para la etapa de potencia a la salida del L297 con el L298.
- Ambos integrados fueron diseñados para trabajar juntos [12].
- El L297 integra todos los elementos necesarios del circuito para controlar un motor a pasos bipolar o unipolar.
- El L297 sólo necesita un tren de pulsos para generar las cuatro fases que alimentarán el circuito puente H (del L298).
- Manejo sencillo de los parámetros de control del motor a pasos, tales como: sentido de giro, control de corriente, tipo de paso, etcétera.
- El L297 puede trabajar con motores de tipo unipolar y bipolar, siendo éste último el modo de funcionamiento que se busca para los motores desarrollados en el presente trabajo de tesis.

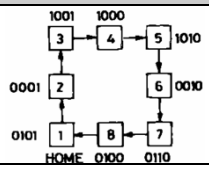
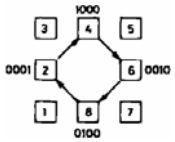
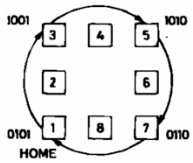
Las principales funciones del L297 son generar las señales en secuencia para las dos fases del motor, cualquiera del que se esté hablando; motor de estator simple, de doble estator o de fuerza de Lorentz. Así mismo se encarga de regular con un control PWM (*Pulse Wide Modulation*) la corriente que pasa por las bobinas de cada fase.

El L297 tiene un funcionamiento muy sencillo, pues requiere una entrada de reloj que utiliza para dar cada paso de la secuencia del motor en cada flanco de subida. Así queda determinada la velocidad del motor, que es directamente proporcional a la frecuencia de la señal de reloj de entrada [13]. En la figura 4.56 se muestra un diagrama de bloques de este CI, cuyo bloque más importante es el llamado “Traductor”, el cual se encarga de generar tres diferentes tipos de secuencias de señales, generando así tres modalidades diferentes de movimiento. Estas son: 1) Medio paso, alternando una fase energizada/dos fases energizadas, 2) Paso completo, con una fase energizada, y 3) Paso completo, con dos fases energizadas.



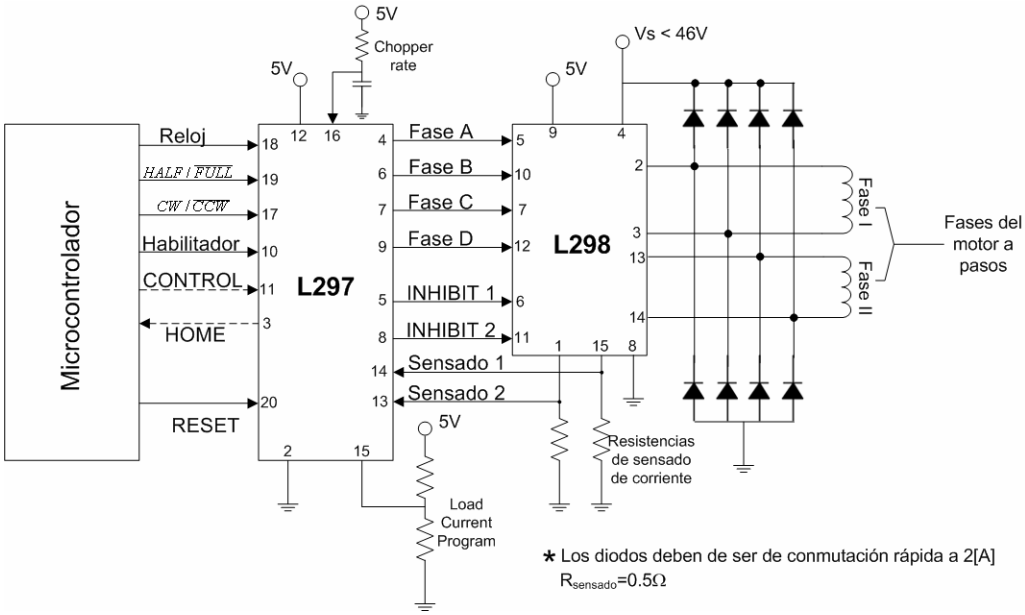
◄ **Figura 4.39.** Diagrama de bloques del L297. Contiene un traductor (generador de las secuencias de las fases), un *chopper* doble y una salida de control lógico.

Este bloque “Traductor” va tomando ocho estados lógicos sucesivamente conforme recibe los pulsos de subida del reloj. Y es en función de estos estados lógicos y del nivel lógico alto o bajo del pin $HALF/\overline{FULL}$ que se generan las formas de onda de salida a las fases del motor. Dichos estados lógicos no son controlables por el usuario, lo que controla el usuario para determinar el tipo de paso es el nivel lógico de los pines $HALF/\overline{FULL}$ y CONTROL. La tabla 11 resume las características en las que se encuentra el CI para cada modalidad de pasos:

	Estado Lógico del "Traductor"		Nivel lógico del pin			
			$HALF$ / $\overline{FULL}$	CONTROL	CW / $\overline{CCW}$	
					Horario	Anti-horario
Medio Paso		**Todos los estados**	ALTO	BAJO	BAJO	ALTO
Paso completo con una fase energizada		**Estados pares**	BAJO	BAJO		
Paso completo con dos fases energizadas		**Estados impares**	BAJO	ALTO		

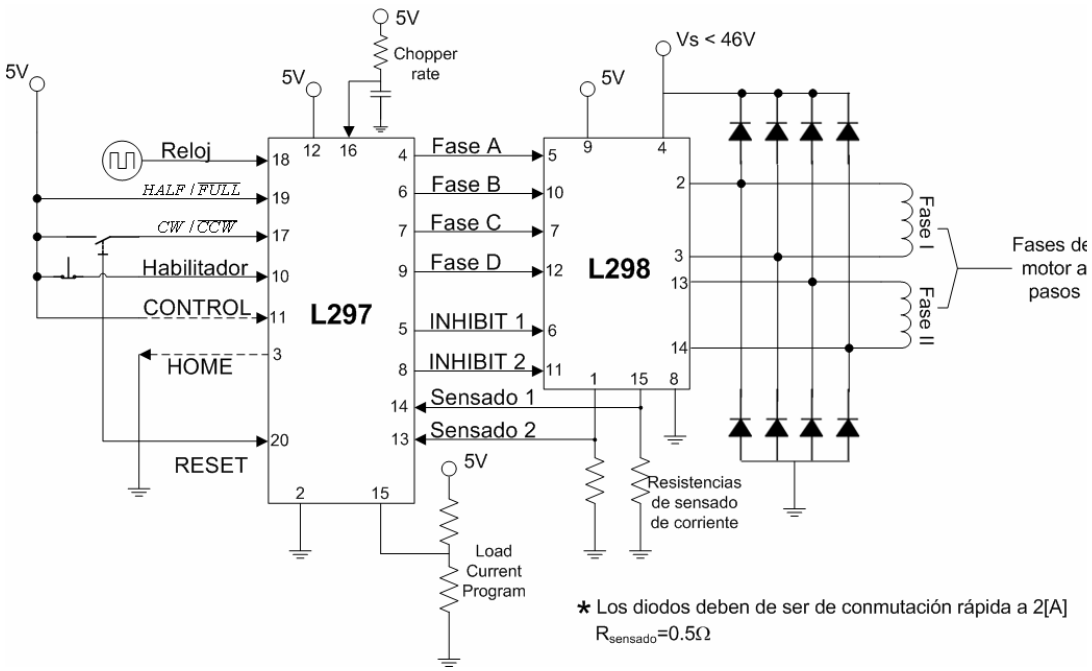
▲ **Tabla 11.** Configuración para los tres diferentes modos de giro del motor a pasos.

La señal de reloj suministrada al L297 puede ser proporcionada directamente de un generador de señales o un oscilador astable, ahorrando la tarea de programar un microcontrolador. La figura 4.57 muestra el diagrama esquemático de la propuesta dada en las mismas hojas de datos del L297.



▲ **Figura 4.40.** Diagrama esquemático de la etapa de control y potencia unidas.

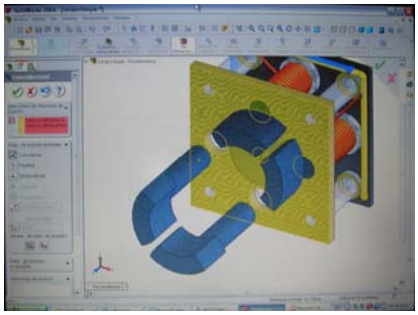
Como se acaba de mencionar, se puede no usar el microcontrolador, quedando el circuito de la figura 4.58:



▲ **Figura 4.41.** Diagrama esquemático de la etapa de control y potencia unidas independientes de un microcontrolador.

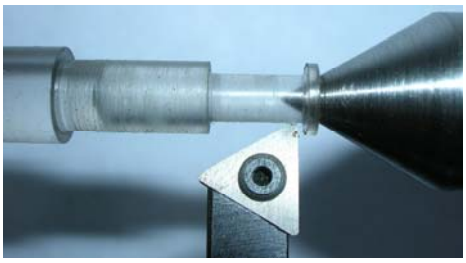
Capítulo 5 Pruebas y Resultados

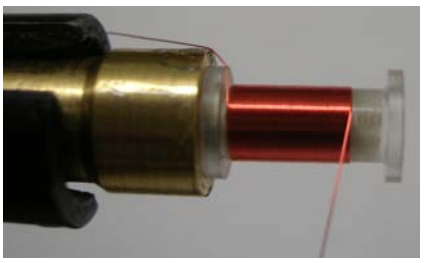
En este apartado se muestra una secuencia fotográfica del proceso completo para desarrollo de uno de los actuadores de los que se han tratado: el motor de estator simple.

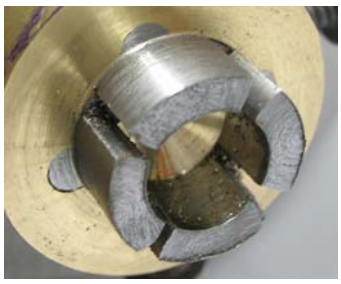


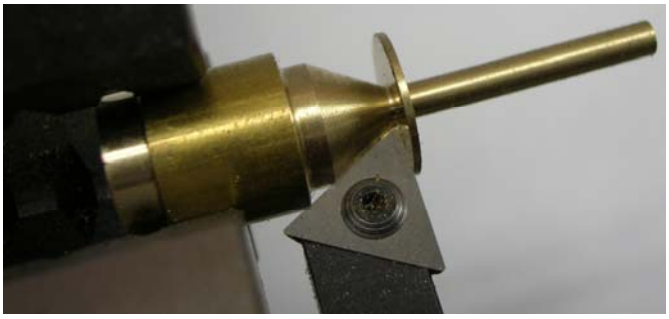
◄ Etapa de diseño en software CAD:

<u>Manufactura de algunas piezas</u>:

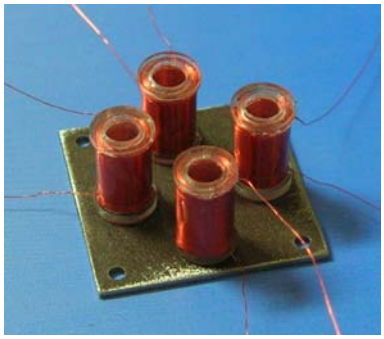
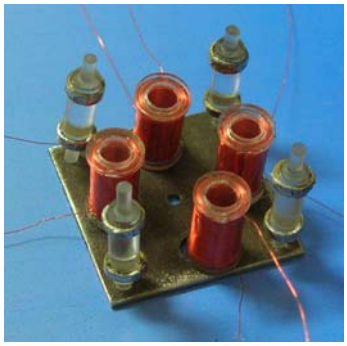
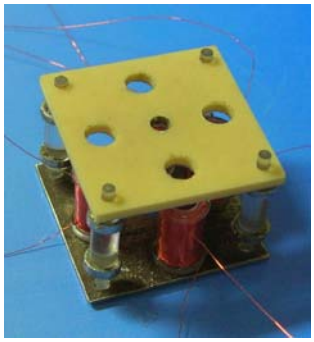
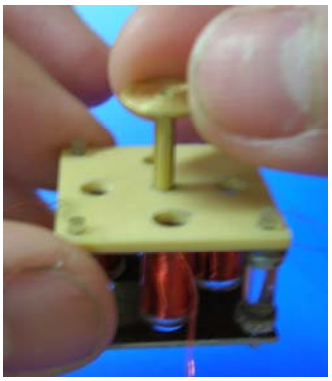
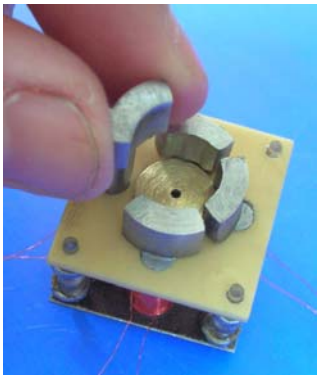
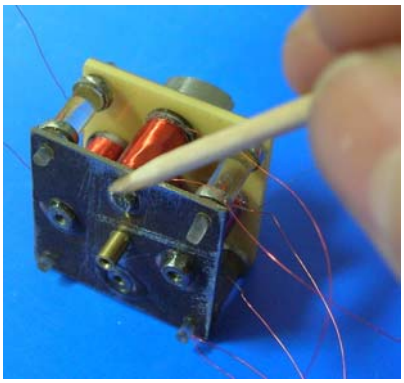
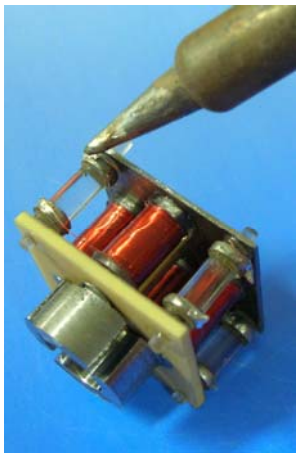
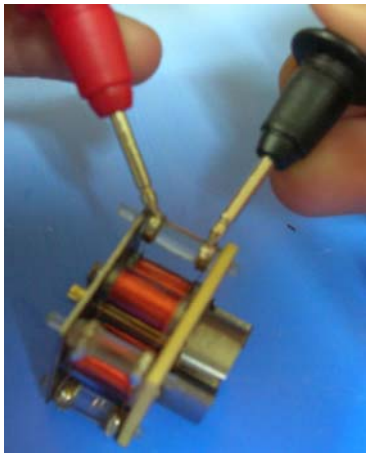
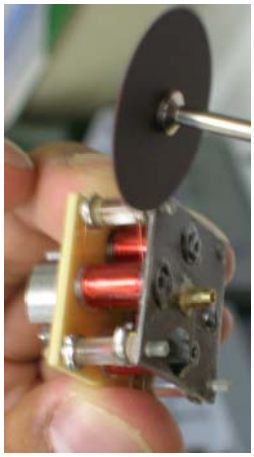


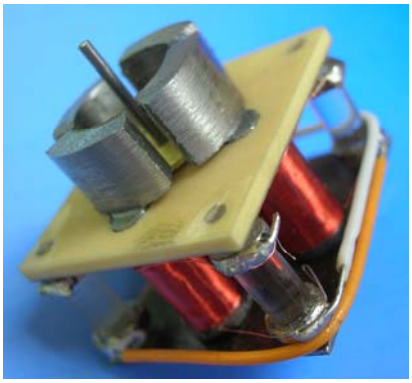




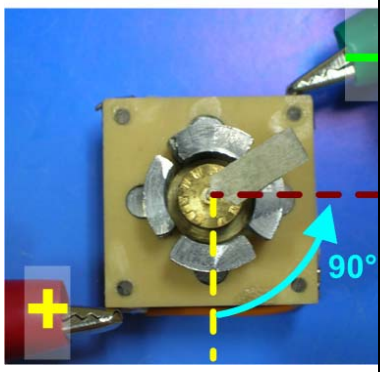
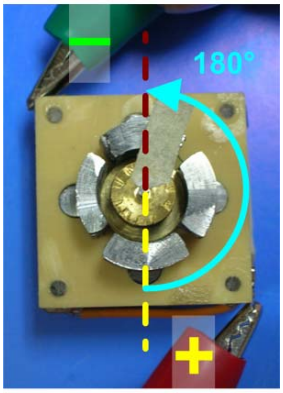
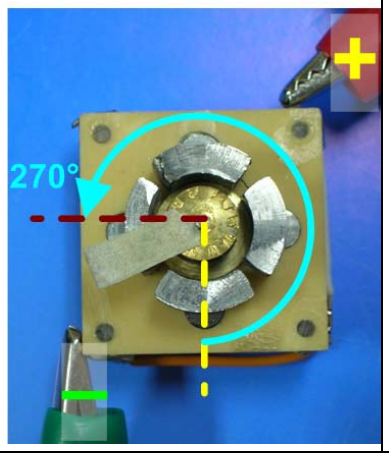
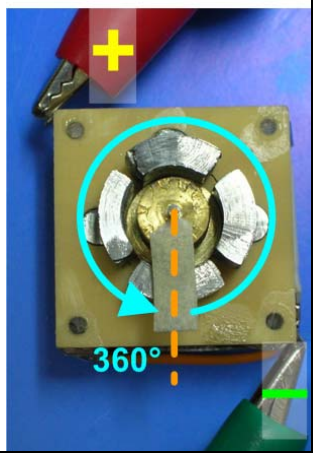


Ensamble del motor:



<u>Prueba de funcionamiento</u>: Ya ensamblado el motor, se puede verificar que de cuatro pasos de 90° cada uno. Esto se muestra en la tabla 12.

ESTADO INICIAL	PASO 1	PASO 2
		
	PASO 3	**PASO 4**
		

▲ **Tabla 12.** Prueba de funcionamiento del MES.

Conclusiones

En este trabajo se ha recabado la información necesaria para conocer con detalle tres de los diferentes tipos de motores a pasos que existen, desde un enfoque al material del que están hechos sus rotores (de reluctancia variable, de magneto permanente e híbridos), hasta la configuración de su conexión eléctrica (unipolar y bipolar). Así mismo, se generó información detallada de cada uno de los tres motores que se desarrollan en el GMM, aspectos como la disposición de sus componentes y justificación de la misma, estructura del circuito eléctrico y magnético, y secuencia de polarización para generar movimiento se han puesto en claro en este trabajo. Para el motor de estator simple se realizó un análisis detallado de su circuito magnético (para un caso particular). En el caso del motor de fuerza de Lorentz además fue necesario hacer un planteamiento teórico con el fin de explicar mejor su principio de funcionamiento. Así mismo, se planteó un análisis vectorial de su funcionamiento para justificar el uso de materia prima en su manufactura. Con base en lo anterior se explicó el funcionamiento del caso de estudio particular de los tres motores a pasos desarrollados en este trabajo de tesis (motor de estator simple, de doble estator y de fuerza de Lorentz), teniendo la oportunidad de extrapolar las características particulares al caso general de cualquiera que sean las necesidades del motor a desarrollar como trabajo a futuro.

Como parte de la metodología se hizo una simulación por computadora del ensamble de las piezas de los motores, y gracias a ella, no se presentaron problemas de falla de dimensión de alguna de las piezas propuestas en ninguno de los motores. Un detalle importante también fue la estandarización de las dimensiones de las piezas que se fabricaron, pues facilitó la manufactura y ensamble de las mismas.

Una vez desarrollados los tres motores, se analizó un caso particular de la forma de onda de la señal de voltaje aplicado a cada uno de ellos, obteniendo

el voltaje y la corriente promedio que atraviesa por las fases de cada motor. De acuerdo a los cálculos desarrollados, para cada caso, el consumo de corriente por fase del motor de estator simple fue de 60[mA], y giró 4 pasos por revolución como era esperado; teniendo menor exactitud del paso 2 al tres 3, según la tabla 12, pero al final llegó al punto de inicio. Para el motor de doble estator, el consumo de corriente fue de 47[mA], y giró 12 pasos por revolución. Los avances angulares de uno a otro paso, en este caso, sí fueron similares. Por último, para el motor de fuerza de Lorentz, la carga de corriente por fase del motor fue de 0.6[mA]. Este motor giró 4 pasos por revolución, aproximadamente a 90° cada paso.

El presente trabajo de tesis ofrece una herramienta apta para desarrollar tres motores a pasos de distinto tipo. Permitiendo que éstos sean de características diferentes a las que se plantearon como caso de estudio, ya que también se mencionaron los requerimientos funcionales que debe de cumplir cada pieza, así que cuando se busque desarrollar un motor a pasos con características distintas, se sabrá cuales con las características que deben de cumplir los materiales empleados para desarrollar sus piezas, el principio de funcionamiento del motor, como se ensamblan sus piezas, y como probar que funciona.

Trabajo a Futuro

En el presente trabajo de tesis se ha propuesto una metodología para desarrollar tres tipos de motores a pasos, la cual se basa en la experiencia adquirida durante el proceso que implica cada etapa de desarrollo de los mismos. Es debido a esta experiencia, que se cuenta con diversos prototipos de motores, cuyos resultados de estudios y pruebas de funcionamiento, ayudan a deducir el comportamiento de otros motores. Es con base a esto que se siguen desarrollando motores a pasos de diferentes características, de acuerdo a las necesidades a cubrir en el proyecto en que dicho motor sea aplicado. Hasta el momento, la extrapolación de las características de un motor ya funcional, a uno nuevo por desarrollar ha funcionado, pero no se sabe que tan

bueno es el funcionamiento del mismo. Por ello se propone, como trabajo futuro de este trabajo de tesis, la generación de un modelo matemático que describa el comportamiento del motor en función de sus características, tales como dimensión, del tipo de imán utilizado, distancia del entrehierro, campo y voltaje generado en las bobinas, etcétera. Otro modo de conocer el comportamiento de estos motores es de forma empírica, al fabricar varios de ellos, pero con variantes que influyan en su desempeño. Por ejemplo, se puede variar el calibre del alambre magneto con los que se embobinan los devanados, o escalar el tamaño de todo el motor, entre otros parámetros; para después hacer pruebas de funcionamiento y mediciones correspondientes. De esta forma se obtendría una aproximación empírica-experimental del funcionamiento que podría tener otro motor.

Otro trabajo que puede surgir a partir de éste, son unas series de animaciones gráficas que sirvan como material didáctico en apoyo a la práctica de este tipo de desarrollo.

REFERENCIAS

[1] E Kusul, T Badyk, A Caballero Ruiz, L Ruiz Huerta. Develpment of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories. Journal of Micromechanics and Microengineering. Institute of Physics Publishing. 2002.

[1] Acedo Sánchez, José. Control avanzado de procesos: (teoría y práctica). Ediciones Díaz de Santos, S.A. España, 2006.

[2] Tabib-Azar, Massood. Microactuators: Electrical, Magnetic, Thermal, Optical, Mechanical, Chemical, & Smart Structures. Kluwer Academic Publishers. Boston, 1998.

[3] Brauer, John R. Magnetic Actuators and Sensors. IEEE Press, Wiley Interscience. 2006.

[4] Athani, V.V. Stepper Motors: Fundamentals Applications & Design. New Age International Publishers. Nueva Delhi,1997.

[5] Saavedra Roman, José Guillermo. Desarrollo de un sistema duplicador de pulso cardiaco para evaluacion de bioprotesis cardiacas elaboradas en el Instituto Nacional de Cardiología. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, 2006.

[6] Acarnley, Paul P. Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice. IEE Control Engineeering Series 63. Londres, 2002.

[7] Reston Condit. Stepping Motors Fundamentals. Microchip Technology Inc. AN907

[8] Kenjo, Takashi. Sugawarw, Akira. Stepping Motors and their Microprocessor Controls. Oxford Science Publications. Gran Bretaña, 1994.

[9] Jaramillo Morales, Gabriel A. Electricidad Y Magnetismo. UNAM 2da pre-edición. Ed. Trillas. México, 1990.

[10] Silva López Héctor. Automatización de una Máquina Herramienta de Primera Generación. Tesis de Licenciatura. UNAM. Septiembre 2005.

[11] Navarro Ruiz, Bartolomé. Diseño y Construcción de un Robot Autónomo. Control de Motores y Movimiento. Universidad Pontificia Comillas. Junio 2001.

[12] SGS-Thomson Microelectronics. Application Note. The L297 Stepper Motor Controller.