



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Desarrollo de Motores de Pasos de Dimensiones Pequeñas

Alberto Caballero Ruiz, Leopoldo Ruiz Huerta, Angélica Zamora Vázquez, Raúl Armida Muñoz, Ely Edgardo Tejeda Núñez.

Octubre 2012

Informe Técnico

Proyecto CONACyT 60895

Título: Desarrollo de Motores de Pasos de Dimensiones Pequeñas

Autores: Alberto Caballero Ruiz, Leopoldo Ruiz Huerta, Angélica Zamora Vázquez, Raúl Armida Muñoz, Ely Edgardo Tejeda Núñez.

Afiliación: Grupo de Micromecánica y Mecatrónica, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 70-186, Distrito Federal 04510, México.

Resumen

Actualmente, el desarrollo de sistemas micromecánicos representa un importante soporte tecnológico para el sector científico e industrial. Dentro de las áreas de aplicación que se pueden visualizar para este campo de investigación destacan: El área médica con aplicaciones enfocadas al desarrollo de pequeños dispositivos para el desarrollo de cirugías no invasivas; la industria metal-mecánica con aplicaciones principales en la manufactura de micropiezas tales como tornillos, engranes, flechas, etc; entre otras. Con el crecimiento de este campo de investigación se ha tenido la necesidad de desarrollar actuadores para la automatización de los microsistemas. Dentro de las alternativas que existen se encuentran los actuadores basados en materiales piezoeléctricos, los basados en principios electromagnéticos, hidráulicos y neumáticos, y los basados en materiales de aleación con memoria de forma. El uso de motores de pasos representa una alternativa sencilla y económica para resolver problemas de automatización. El Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del CCADET-UNAM ha desarrollado algunos prototipos de motores de pasos con el fin de automatizar micromáquinas herramienta. En este informe técnico se presenta el diseño, fabricación y evaluación de motores a pasos de dimensiones pequeñas. Se consideran como motores de dimensiones pequeñas a aquellos con dimensiones inferiores a los 30x30x30mm. Se presenta el desarrollo de motores de pasos basados en dos principios de funcionamiento. Uno de ellos trabaja haciendo uso de la interacción entre el campo magnético de un imán y el campo magnético producido por una bobina; mientras que el otro hace uso de la fuerza que se genera al hacer interactuar el campo magnético de un imán sobre la corriente que circula por un alambre, a este principio se le conoce como fuerza de Lorentz. Para evaluar los motores, se consideraron tres medidas de par como parte de la caracterización: par de retención (Holding torque), par pull-in y par de pull-out.

Índice

Introducción	1
1 Antecedentes	2
1.1 Actuadores Hidráulicos.....	2
1.2 Actuadores Neumáticos	2
1.3 Actuadores basados en el efecto electrostrictivo y magnetostrictivo	2
1.4 Actuadores eléctricos	3
1.4.1 Motor de Corriente Continua	3
1.4.2 Motor de Corriente Alterna	3
1.5 Motores de Pasos.....	3
1.6 Clasificación de los motores de pasos	5
1.6.1 Motor de Reluctancia Variable (motor RV).....	5
1.6.2 Motor de Pasos de Magneto Permanente (Motor MP).....	6
1.6.3 Motor de pasos Híbrido (Motor H)	7
1.6.4 Motor Unipolar	9
1.6.5 Motor Bipolar	10
1.7 Evolución de los motores de pasos.....	10
1.8 Motores de pasos aplicados a micromecánica	12
2 Planteamiento del problema.	16
2.1 Objetivos.....	16
3 Propuesta de diseño	17
3.1 Motor de pasos basado en intensidad de campo magnético	17
3.2 Motor de pasos basado en el principio de Fuerza de Lorentz	23
4 Fabricación de los motores propuestos.	29
4.1 Motor de pasos de doble estator basado en intensidad de campo magnético.....	29
4.2 Motor de pasos basado en el principio de Fuerza de Lorentz	31
5 Ensamble de los motores de pasos	36
5.1 Motor de doble estator basado en intensidad de campo magnético.....	36
5.2 Motor basado en el principio de Fuerza de Lorentz	39
6 Motores de pasos fabricados	40
7 Caracterización de los motores a pasos	42
7.1 Pruebas de par de retención	42
7.2 Pruebas para el par de pull-in	43
7.3 Pruebas del par de pull-out	45

Índice de tablas y figuras

Figura 1. Principio de funcionamiento de un motor a pasos de reluctancia variable.....	4
Figura 2. Sistema de control para un motor de pasos.	5
Figura 3. Líneas del campo magnético provocando el par de reluctancia.	6
Figura 4. Circuito magnético en un motor de pasos de reluctancia variable.	6
Figura 5. Generación de un paso en un motor de pasos de reluctancia.	6
Figura 6. Motor MP. (a) Rotor cilíndrico; (b) Núcleo del estator y arreglo simbólico de las bobinas; (c) Conexión de los arrollamientos para formar las fases.	7
Figura 7. Generación de los pasos en un motor de imán permanente.	7
Figura 8. Circuito magnético en un motor de pasos híbrido.	8
Figura 9: Diagrama de la configuración de un motor de pasos híbrido.	8
Figura 10. Generación de pasos en un motor híbrido.	8
Figura 11. Motor de pasos unipolar.	9
Figura 12. Motor de pasos bipolar.	10
Figura 13. Fotografía de un motor a pasos microscópico.	11
Figura 14. Lentes para microcirugía que utilizan motores a pasos.	11
Figura 15. Pipeta de alta precisión activada por un motor a pasos.	11
Figura 16. Bomba peristáltica activada por un motor a pasos.	12
Figura 17. Micromáquina herramienta de primera generación (prototipo 2000).	13
Figura 18. Piezas producidas en la micromáquina herramienta.	13
Figura 19. Versión 2008 de prototipo de MCM desarrollado en México.	13
Figura 20. Manufactura de piezas en el prototipo 2008.	14
Tabla 1. Tipos de actuadores empleados en micromáquinas herramienta.	15
Figura 21. Motor a pasos de un estator.	17
Figura 22. Vita en explosión del motor de un estator.	17
Figura 23. Estator y rotor. (a) Armado del estator. (b) Vista frontal de la placa del estator. (c) Armado del rotor. (d) Vista frontal del rotor. (e) Coincidencia geométrica ambas partes.	18
Figura 24. Conexión de las bobinas para formar el circuito eléctrico.	18
Figura 25. Líneas de flujo magnético de un imán permanente imantado de forma axial.	19
Figura 26. Condición uno para la colocación de los imanes en el rotor.	19
Figura 27. Condición uno y dos para la colocación de los imanes en el rotor.	19
Figura 28. Diagrama de tiempos para la polarización de las fases del motor.	20
Figura 29. Flujo magnético a través de la placa de acero.	20
Figura 30. Circuito magnético cuando se excita una fase del motor.	21
Figura 31. (a) Estructura de un motor de doble estator; (b) Circuito eléctrico del motor.	22
Figura 32. Circuito magnético del motor de doble estator con la fase a excitada.	22
Figura 33. Excitación de la fase b.	23
Figura 34. Representación vectorial de la fuerza Lorentz.	23
Figura 35. Rotor de un motor de pasos de fuerza de Lorentz.	24
Figura 36. Estator de un motor a pasos de fuerza de Lorentz.	24
Figura 37: Posición del rotor respecto al estator.	25
Figura 38: Producción de la fuerza de Lorentz en el motor.	25
Figura 39: Colocación de los imanes en el rotor.	25
Figura 40. Generación de pasos etapa 1.	26
Figura 41. Generación de pasos etapa 2.	26
Figura 42. Generación de pasos etapa 3.	27
Figura 43. Generación de pasos etapa 4.	27
Figura 44. Explosivo del motor a pasos de fuerza de Lorentz.	28
Figura 45. Partes que conforman al motor de doble estator.	29
Figura 46. Carrete para la fabricación de las bobinas del motor.	29

Figura 47. Esquema de los soportes de los estatores del motor.	30
Figura 48. Núcleos de bobinas.	30
Figura 49. Guías del motor.	31
Figura 50. Disco del Rotor.	31
Figura 51. Partes que conforman al motor basado en el principio de fuerza de Lorentz.	32
Figura 52. Estator de un motor a pasos de fuerza de Lorentz.	32
Figura 53. Núcleo del estator del motor a pasos	32
Figura 54. Carcasa del motor a pasos basado en fuerza de Lorentz.	33
Figura 55. Densidad de Flujo vs. Distancia para un imán de 3mm de diámetro con imantación axial.	33
Figura 56. Tapa del motor a pasos basado en fuerza de Lorentz.	34
Figura 57. Rotor del motor de pasos basado en fuerza de Lorentz.	34
Figura 58. PCB externo del motor a pasos.	35
Figura 59. Estatores del motor basado en intensidad de campo magnético.	36
Figura 60. Colocación del rodamiento sobre la placa lateral del estator.	36
Figura 61. Armado del estator "A".	37
Figura 62. Pegado de los estator "A".	37
Figura 63. Ensamble del rotor en el estator "B".	37
Figura 64. Ensamble del estator "A" en el motor.	38
Figura 65. Ensamble de las guías en el motor.	38
Figura 66: Ensamble general de los motores a pasos.	39
Figura 67. Esquema de las conexiones de los motores a pasos.	39
Figura 68. Motores de pasos de imán permanente de doble estator. (a) El motor de 25x25x43mm comparado con el de 20x20x41mm; (b) El motor de 25x25x43mm comparado con el de 9x9x11mm	40
Figura 69. Motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.	40
Tabla 3. Características de los motores de pasos basados en intensidad de campo magnético.	40
Tabla 4. Características de los motores de pasos basados fuerza de Lorentz.	41
Figura 70. Diagrama de la prueba para obtener el par de retención (Kenjo y Sugawara 1994).	42
Figura 71. Par de retención de los motores de pasos de imán permanente de doble estator.	43
Figura 72. Par de retención de los motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.	43
Figura 73. Diagrama de la prueba para obtener el par de pull-in (Kenjo y Sugawara 1994).	43
Figura 74. Par de pull-in del motor de pasos de imán permanente de doble estator de 20x20x41mm.	44
Figura 75. Par de pull-in de los motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.	44
Figura 76: Esquema de la prueba de pull-out (Kenjo & Sugawara, 1994).	45
Figura 77. Par de pull-out del motor de pasos de imán permanente de doble estator de 20x20x41mm. ...	46
Figura 78. Par de pull-in de los motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.	46

Introducción

El desarrollo de sistemas micromecánicos surge como una alternativa para el desarrollo de partes y dispositivos de bajas dimensiones para la fabricación de nuevas herramientas en el ámbito científico e industrial. Como parte de las aplicaciones de este tipo de dispositivo se pueden mencionar los dispositivos para el desarrollo de cirugías no invasivas, dispositivos de microposicionamiento para sistemas de enfoque en teléfonos y cámaras, sistemas de microposicionamiento para el estudio de actividad neuronal en animales pequeños, entre otras. Este tipo de dispositivos de bajas dimensiones por lo regular están constituidos por el sistema mecánico, sistema de actuadores, sistema de sensores y sistema de control. Centrándonos en los actuadores de bajas dimensiones, en la actualidad podemos encontrar actuadores basados en materiales piezoeléctricos, basados en principios electromagnéticos, hidráulicos y neumáticos, y los basados en materiales de aleación con memoria de forma. Los motores de pasos representan una alternativa sencilla y económica para resolver problemas de automatización en sistemas de bajas dimensiones. El Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del CCADET-UNAM ha desarrollado algunos prototipos de motores de pasos con el fin de automatizar micromáquinas herramienta. En este informe técnico se presenta el diseño, fabricación y evaluación de motores a pasos de dimensiones pequeñas. Se consideran como motores de dimensiones pequeñas a aquellos con dimensiones inferiores a los 30x30x30mm. En el capítulo uno se presentan los antecedentes del trabajo con una descripción de los diferentes tipos de actuadores que existen, centrándose en los motores de pasos y sus aplicaciones en el área de micromecánica. En el capítulo dos se desarrolla el planteamiento del problema y se establecen los objetivos de este trabajo. En el capítulo tres se presenta la propuesta de diseño de motores de pasos basados en dos principios de funcionamiento: uno de ellos trabaja haciendo uso de la interacción entre el campo magnético de un imán y el campo magnético producido por una bobina; mientras que el otro hace uso de la fuerza que se genera al hacer interactuar el campo magnético de un imán sobre la corriente que circula por un alambre, a este principio se le conoce como fuerza de Lortentz . En el capítulo cuatro se describe la fabricación de los componentes de los motores a pasos basados en los dos principios de funcionamiento mencionados arriba y en el capítulo cinco se describe el proceso de ensamble. En el capítulo seis se describen los motores fabricados y en el capítulo siete se presenta su evaluación considerando tres medidas de par como parte de la caracterización: par de retención (Holding torque), par pull-in y par de pull-out, para después finalizar el trabajo con las conclusiones.

1 Antecedentes

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares (Ogata 2003). Los sistemas físicos, por su parte, son una interconexión de componentes, dispositivos o subsistemas en contextos que van del procesamiento de señales y comunicaciones a motores electromecánicos, vehículos automotores y plantas de procesos químicos (Oppenheim y Willsky 1997).

Dentro de los componentes de un sistema, se encuentran los actuadores. Un actuador transforma una fuente de energía a desplazamiento mecánico o una fuerza (Uchino y Giniewicz 2003). En un sistema dinámico los actuadores son de gran importancia porque generalmente permiten controlar el estado del sistema.

Existe una gran variedad de actuadores: actuadores hidráulicos, neumáticos, eléctricos, basados en el efecto electrostrictivo, basados en el efecto magnetostrictivo, entre otros (Uchino y Giniewicz 2003).

1.1 Actuadores Hidráulicos

Este tipo de actuadores funcionan con base en fluidos a presión y por lo general se emplean en aplicaciones de alta potencia. Este tipo de actuadores es posible clasificarlo en los de tipo cilindro y los motores. Dentro de los actuadores de tipo cilindro es posible encontrar actuadores de simple efecto cuando se utiliza fuerza hidráulica para empujar y una fuerza externa para contraer y los de doble efecto cuando se emplea la fuerza hidráulica para efectuar ambas acciones. Por otro lado, los motores hidráulicos pueden catalogarse como rotatorios cuando a la salida se obtiene un desplazamiento angular después de que el fluido pasa a través de engranes u oscilatorio cuando el movimiento rotatorio es generado por la acción oscilatoria de un pistón o percutor; este tipo de motor tiene mayor demanda debido a su mayor eficiencia.

1.2 Actuadores Neumáticos

Este tipo de actuadores convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico. En esencia son idénticos a los motores hidráulicos, el rango de compresión es mayor en este caso, además de que hay una pequeña diferencia en cuanto al uso y en lo que se refiere a la estructura, debido a que el aire tiene poca viscosidad. Algunos ejemplos son: cilindro neumático de efecto simple, cilindro neumático de doble efecto, motor neumático con veleta, entre otros.

1.3 Actuadores basados en el efecto electrostrictivo y magnetostrictivo

Los materiales electro y magnetoactivos cambian sus propiedades físicas cuando se someten a un campo eléctrico y magnético, respectivamente. Dentro de esta clasificación están los materiales piezoeléctricos, los materiales electro y magnetostrictivos, y los materiales electro y magnetoreológicos. De acuerdo con esto, el 'efecto piezoeléctrico' es un fenómeno que resulta de una relación entre las propiedades eléctricas y mecánicas del material. Similarmente, los materiales electrostrictivos presentan el efecto de electrostricción, el cual implica un cambio de las dimensiones cuando se aplica un campo eléctrico. Una diferencia de éstos materiales con los piezoeléctricos es que en los primeros existe una dependencia cuadrática de la permisividad sobre el campo eléctrico, mientras que en los últimos existe dependencia lineal. Los materiales magnetostrictivos pueden responder a campos magnéticos como los piezoeléctricos responden a un campo eléctrico. Los fluidos magnetoreológicos (MR) y electrorreológicos (ER) (fluidos inteligentes) pueden cambiar su viscosidad, drásticamente y de manera reversible, cuando se someten a un campo magnético y eléctrico, respectivamente (ARIAS MAYA y VANEGAS USECHE 2004).

1.4 Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos convierten la energía eléctrica en mecánica. Este tipo de actuadores son los más comúnmente empleados en cuestiones de automatización debido a que los sistemas de control son más sencillos. De acuerdo al tipo de corriente empleada para su excitación, los motores eléctricos se dividen en: motores de corriente continua, motores de corriente alterna y los motores de pasos.

1.4.1 Motor de Corriente Continua

El estator es un imán permanente, y el rotor es un arrollamiento conductor montado en la armadura, a través del cual pasa la corriente. El arrollamiento está en contacto con un conmutador giratorio que a su vez está en contacto con las escobillas mediante las cuales se energiza el motor. El conmutador es un anillo metálico dividido en dos partes y destinado a conmutar la dirección de la corriente en el arrollamiento para modificar con esto el sentido del flujo magnético en la armadura y así hacer girar al motor. En la mayoría de los motores de uso común, el campo magnético del estator no es creado por un imán permanente, sino por unos arrollamientos fijos por los cuales se hace pasar la corriente continua con la que se energiza el arrollamiento del rotor. El estator y el rotor pueden estar conectados en serie o en paralelo (Enciclopedia Metódica 1996). A continuación se enlistan algunos ejemplos de motores de corriente continua:

- *Motor serie*
- *Compound*
- *Shunt*
- *Sin escobillas*

1.4.2 Motor de Corriente Alterna

En este tipo de motores, el estator contiene un número de bobinas de alambre enrollado alrededor y a través de las ranuras del estator. Siempre hay más ranuras que bobinas y por eso las bobinas son trenzadas de manera bastante compleja. Cuando las bobinas se ponen bajo corriente, se genera un campo magnético rotativo adentro del estator. La velocidad de rotación depende del número de bobinas, o del número de polos. Se les puede clasificar en dos grandes grupos:

- *Síncronos*. Se hace pasar la corriente por el estator y, vía un conmutador, por el rotor. El estator produce un campo magnético giratorio adaptado al del rotor, lo que obliga a éste a girar a la misma velocidad que el campo del estator. La velocidad de rotación es proporcional a la frecuencia de la tensión de alimentación.
- *Asíncronos o de Inducción*: No se hace pasar corriente por el rotor. El campo magnético oscilante del estator induce corrientes alternas en el rotor, y éstas producen el campo magnético del rotor. Estos motores no requieren conmutador ni conexiones eléctricas con las partes móviles. Es el tipo de motor eléctrico más empleado debido a la simplicidad de su funcionamiento.

Existe otro tipo de motores eléctricos llamados **motores de pasos**, los cuales son tema central de este trabajo, por lo que a continuación se presenta con mayor detalle sus características generales, funcionamiento y control.

1.5 Motores de Pasos

Los motores de pasos son motores eléctricos que rotan mediante pasos discretos. Este tipo de motores llenan un hueco de aplicación en el mundo de los motores y son comúnmente empleados en aplicaciones tales como, impresoras de inyección de tinta, máquinas de control numérico (CNC), etc. Sus características de funcionamiento los hacen ideales para este tipo de aplicaciones. Dichas características se enlistan a continuación:

1. Los motores de 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 de pasos girarán a una velocidad fija a pesar de la carga, mientras que ésta no exceda el par nominal del motor.
4. Los motores de pasos tienen la capacidad de mantener la flecha fija en un estado por un tiempo determinado por el usuario (Condit y Jones 2004).

La figura 1 ilustra la estructura típica de un motor de pasos, también llamado de motor de apilamiento simple de reluctancia variable.

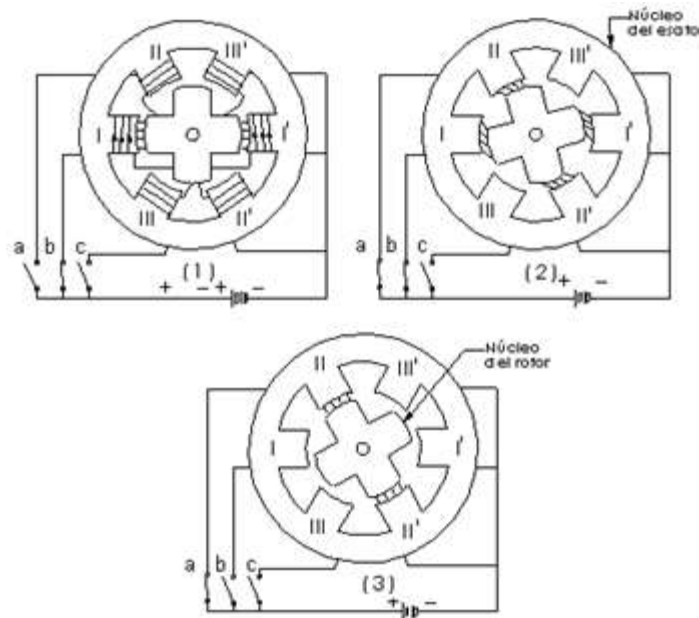


Figura 1. Principio de funcionamiento de un motor a pasos de reluctancia variable.

Con el fin de explicar la estructura y el principio de funcionamiento de este tipo de motores, se tomará como referencia la figura 1. La armadura del estator tiene seis polos o dientes salientes, mientras que el rotor tiene cuatro; tanto el estator como rotor están hechos de hierro dulce. La armadura forma el núcleo de tres arreglos de bobinas que se encuentran dispuestas de acuerdo a los números romanos I, II, III. La parte donde se encuentra el número romano sin apostrofe representa el inicio de la bobina, mientras que el número romano con apostrofe representa el fin. Cada arreglo consiste de dos arrollamientos de alambre magneto conectados en serie. Un arreglo de bobinas es denominado “fase”, por lo que el motor mostrado en la figura es un motor de tres fases. Para que el motor se mueva, la corriente es suministrada por una fuente de CD a las bobinas y se controla la polarización de cada una de las fases por medio de tres interruptores.

En el Estado (1) la bobina de la fase 1 es energizada al cerrarse el interruptor “b”. El flujo magnético que se genera en el entre hierro de aire debido a la excitación de la fase 1 es indicado con líneas en la figura 1a. En este estado, los dos polos salientes de la fase 1 se alinean con dos de los cuatro dientes del rotor. Este es un estado de equilibrio en términos dinámicos. Cuando se cierra el interruptor “a” para excitar a la fase 2 en conjunto con la fase 1, se genera también un flujo magnético en los polos de la fase 2. Con esto se logra estado (2), ya que el rotor experimentará una rotación en sentido contrario a las manecillas del reloj debido a la ‘fuerza’ que crean las líneas de flujo magnético inclinadas (ver figura 1c). El estado (3) es

alcanzado cuando el interruptor “b” es abierto y dos de los dientes del motor se alinean con los polos de la fase dos. Para alcanzar los demás estados del motor y cubrir una revolución completa es necesario continuar energizando las bobinas de acuerdo a la secuencia mostrada en este párrafo. Para que el rotor del motor mostrado en la figura 1 de una revolución completa, es necesario cubrir 24 estados de excitación en las fases. Por lo tanto el motor se desplaza 15° por estado o por paso (Kenjo y Sugawara 1994).

Existen 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 de pasos generando las secuencias de señales requeridas para hacer girar al motor de pasos con la frecuencia y sentido requeridos (ver figura 2).

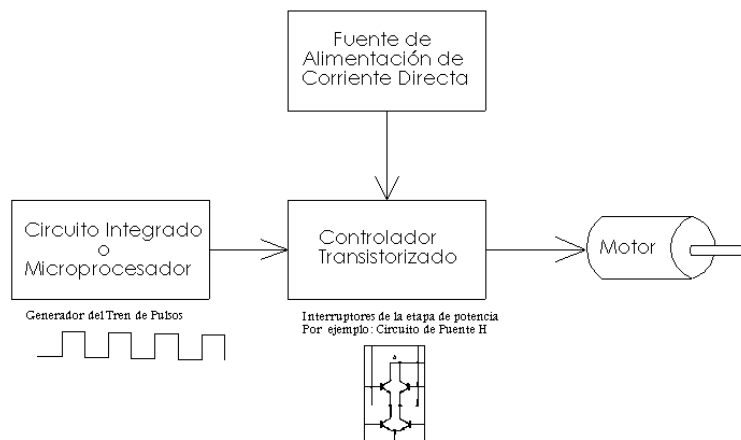


Figura 2. Sistema de control para un motor de pasos.

1.6 Clasificación de los motores de pasos

Los motores de pasos pueden ser clasificados de acuerdo a su estructura y a su modo de excitación. A continuación se presenta la clasificación por estructura:

1.6.1 Motor de Reluctancia Variable (motor RV)

Los motores de reluctancia, podrían considerarse las máquinas eléctricas más simples. Consisten en un estator con bobinas de excitación y un rotor de material magnético con salientes. Este tipo de motores dependen del par de reluctancia para operar. El par de reluctancia es el par producido por la fuerza inducida en un objeto de material ferromagnético en presencia de un campo magnético externo. Esta fuerza provoca que el campo magnético inducido en el objeto de hierro tienda a que éste se alinee con el campo magnético externo; tal como sucede en el indicador de una brújula. En la figura 3 se muestra cómo el campo magnético hace girar un objeto de material ferromagnético para alinearlo con él. En la figura 4 se muestra cómo se cierra el circuito magnético en un motor de pasos de reluctancia variable (Kenjo y Sugawara 1994).

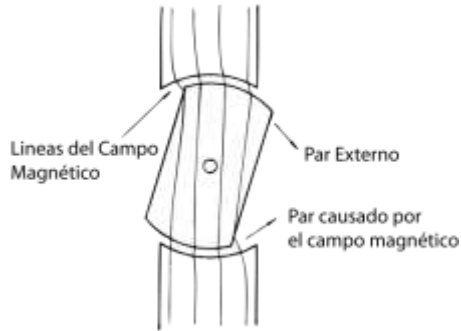


Figura 3. Líneas del campo magnético provocando el par de reluctancia.



Figura 4. Circuito magnético en un motor de pasos de reluctancia variable.

Los motores de reluctancia variable podrían funcionar, girando continuamente, si se conectan sus fases a la corriente alterna. Sin embargo, si sus fases son excitadas secuencialmente con corriente directa. De esta manera, conforme se va excitando cada una de las fases secuencialmente, el motor de reluctancia rotará un ángulo específico por cada vez que se excite. En la figura 5 se muestra cómo se generan los pasos en un motor de pasos de reluctancia variable.

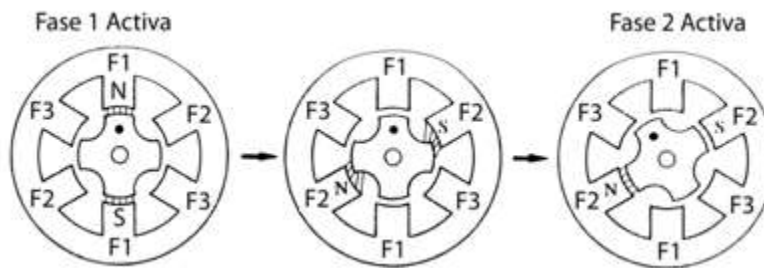


Figura 5. Generación de un paso en un motor de pasos de reluctancia variable.

En estos motores el flujo magnético busca fluir por donde se encuentre la mínima reluctancia, por lo que el par de reluctancia tiende a alinear el rotor con el eje que une a la fase excitada.

Los motores de pasos de reluctancia variable no dependen de la polaridad de la corriente, porque no hay ningún imán permanente en el circuito magnético que se forma; por esta razón la secuencia con que se excitan sus fases es diferente a otras clases de motores a pasos. En este tipo de motores para incrementar el par de salida sin reducir la aceleración, se colocan varios estatores. (Gieras y Wing 1997).

1.6.2 Motor de Pasos de Magneto Permanente (Motor MP)

Los motores de pasos de imán permanente funcionan de igual manera que los motores de reluctancia variable; sólo que, en este caso, el par que hace girar al motor es generado por la atracción y repulsión de los polos magnéticos del rotor, debido a que su rotor es un imán permanente, y los que se generan en

el estator por la excitación de alguna de sus fase. En la figura 6a se muestra la forma que tienen generalmente los rotores de éste tipo de motores de pasos. En la figura 6b se muestra cómo se encuentran distribuidas las fases en el motor; y en la figura 6c se muestra cómo se conectan las bobinas para generar la fases para. Este tipo de motores generalmente se construyen con ángulos de paso grandes, y, por su simplicidad, son producidos masivamente a bajo costo.

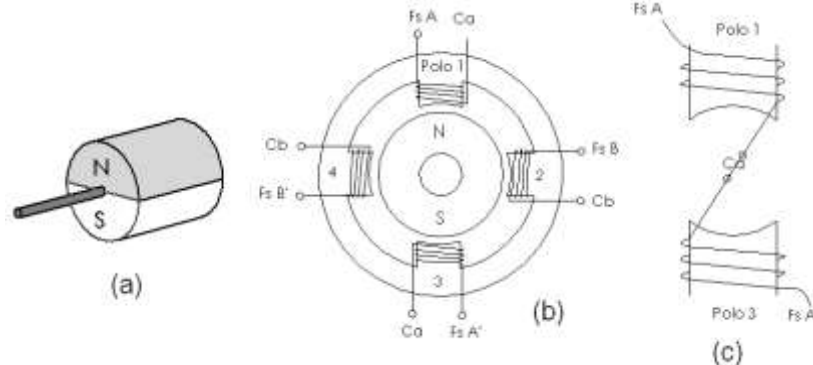


Figura 6. Motor MP. (a) Rotor cilíndrico; (b) Núcleo del estator y arreglo simbólico de las bobinas; (c) Conexión de los arrollamientos para formar las fases.

Otra diferencia de gran importancia de los motores MP es la secuencia de la polaridad que deben tomar los polos de su estator, ya 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 la figura 7 se muestra cómo se deben de ir generando los dipolos en el estator para que se haga girar el rotor.

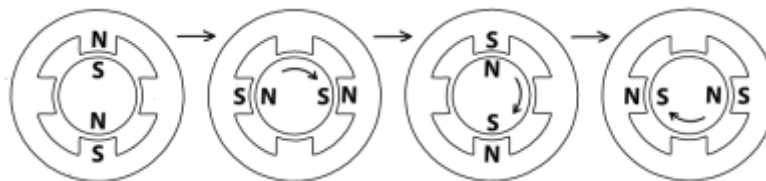


Figura 7. Generación de los pasos en un motor de imán permanente.

En general, el motor a pasos de imán permanente puede producir más par que el de reluctancia, puesto que el motor de pasos de imán permanente produce su par debido al campo magnético permanente y a los efectos de reluctancia.

1.6.3 Motor de pasos Híbrido (Motor H)

La última clase de motores de pasos son los motores de pasos híbridos, los cuales reciben este nombre debido a que utilizan una combinación de los principios de funcionamiento de los motores a pasos de reluctancia variable y de los motores a pasos de imán permanente. Este tipo de motores se ha convertido en los motores más populares para aplicaciones industriales. La mayoría de los motores de pasos híbridos son de dos fases, pero existen comercialmente motores de hasta cinco fases. En años recientes se han desarrollado motores híbridos mejorados que utilizan imanes que enfocan el flujo magnético, mejorando así su desempeño, con la desventaja de un incremento en el costo.

En los motores híbridos el rotor es multidentado, tal como lo es el motor de paso de reluctancia variable y contiene un imán magnetizado axialmente concéntrico al eje de la flecha. En la figura 8 se muestra su configuración.

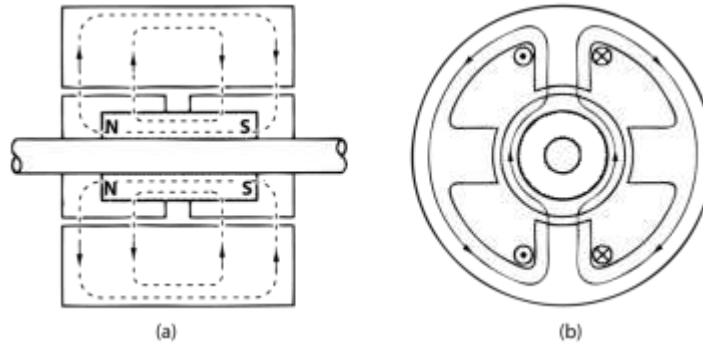


Figura 8. Circuito magnético en un motor de pasos híbrido.

En este tipo de motores se tienen embobinados en ambos extremos del estator. Dichos embobinados se construyen de tal manera que al excitar las fases, el flujo magnético que pasaría normalmente a través del rotor, tenga el mismo sentido que el flujo magnético del imán permanente montado en el rotor; de esta manera, se tiene un mayor flujo magnético en el circuito que en otras clases de motores a pasos; esto último sin la necesidad de suministrarle mayor potencia (Ver figura 9). En la figura 10 se observa cómo se van excitando las fases.

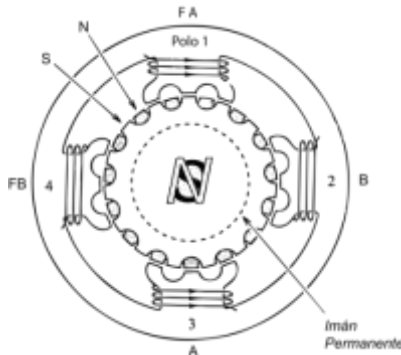


Figura 9: Diagrama de la configuración de un motor de pasos híbrido.

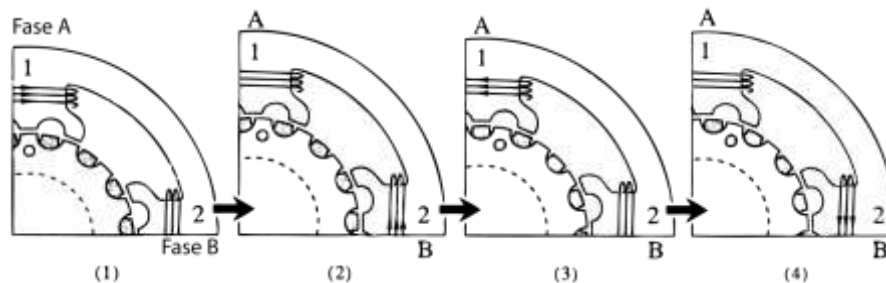


Figura 10. Generación de pasos en un motor híbrido.

Las aplicaciones típicas para este tipo de motores incluyen: alimentación de papel y posicionamiento de cabezales de impresión en impresoras y plotters, posicionamiento de cabezales de lectura en drivers de discos duros y reproductores de CD; posicionamiento de mesas de trabajo y herramientas en sistemas de control numérico (CNC).

Cuando en un sistema se requiere de un motor de pasos, se debe de seleccionar el tipo de motor de pasos que se va a utilizar. En realidad no se puede asumir que una clase es mejor que las demás en todas las situaciones, por lo que habrá que escoger una clase que se desempeñe mejor en la aplicación que se esté desarrollando. Sin embargo, las distintas clases tienen ciertas ventajas y desventajas:

La ventaja que presentan los motores híbridos está en su resolución, pues éstos se manufacturan típicamente con una resolución de 1.8° (200 pasos por revolución), lo cual puede ser de gran utilidad cuando se requiere de una gran resolución en la posición angular. Una investigación sobre maquila de motores de pasos reveló que, para un volumen de motor determinado, el par producido es mayor en los motores híbridos que en motores reluctancia. (Harris, y otros 1977), por lo que los motores de pasos híbridos serían la selección ideal para cuando se requieran pasos pequeños y alto torque en un espacio restringido. Otra ventaja de los motores de pasos híbridos es que, cuando ninguna fase se encuentra excitada, se presenta un par de retención pequeño que mantiene al rotor en su posición, debido a la presencia del imán permanente.

Por otra parte los motores de reluctancia variable tienen dos ventajas cuando la carga debe de ser movida una distancia angular considerable. La primera es que estos motores se manufacturan con una resolución típica de 15° (24 pasos por revolución), lo cual representa que se requerirá de menor cantidad de pasos para llegar de una posición a otra en un determinado tiempo y se evitará la pérdida de par por la alta frecuencia de la excitación. Otra ventaja que presenta este tipo de motores es que tienen menor inercia en sus rotores que los motores híbridos (Bakhuizen 1976). En muchas de las aplicaciones la inercia del rotor contribuye en una porción significativa a la carga total que mueve el motor, por lo que una reducción de ésta inercia permite un aumento en la aceleración.

Finalmente, los motores a pasos de imán permanente tienen las mismas ventajas que los motores de reluctancia, pero presentan un costo menor. Esta diferencia se debe a que en los motores de reluctancia para aumentar el rendimiento el motor se debe de manufacturar los dientes en el estator y en el rotor.

Los motores a pasos también pueden clasificarse de acuerdo a su modo de excitación. A continuación se presenta dicha clasificación.

1.6.4 Motor Unipolar

Los motores de pasos unipolares (MPU) se componen de dos fases, cada una con derivación central. Las derivaciones centrales se pueden sacar del motor como dos cables separados (como se muestra en la figura 11), 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 los arrollamientos se conectan mediante interruptores para generar las secuencias requeridas.

La figura 11a muestra un motor de pasos 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.

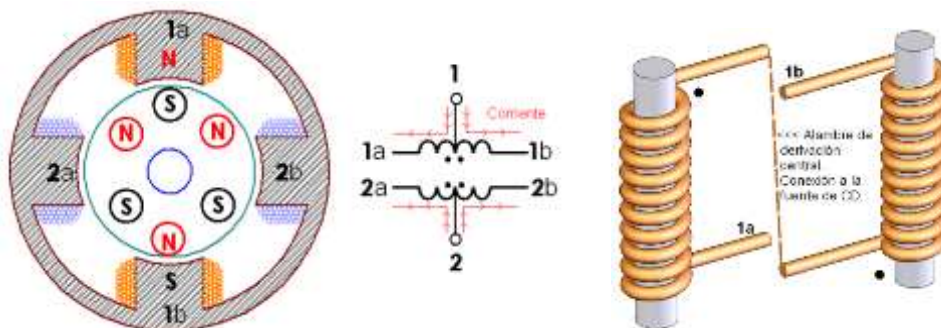


Figura 11. Motor de pasos unipolar.

La línea punteada que une los extremos de los arrollamientos mostrada la figura 11b representa la unión entre estos dos alambres. Los puntos en los extremos de las bobinas indican el extremo donde se inicia el arrollamiento.

1.6.5 Motor Bipolar

Los motores de 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. 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 los arrollamientos de un motor de pasos bipolar. Esto requiere el cambio de polaridad de cada una de las bobinas. Como se muestra en la figura 13, 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.

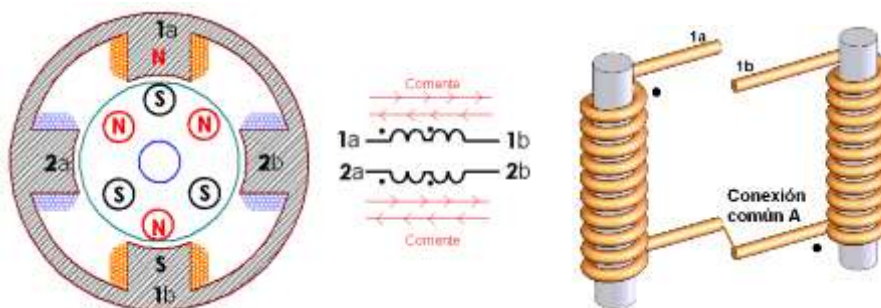


Figura 12. Motor de pasos bipolar.

1.7 Evolución de los motores de pasos

El principio de funcionamiento de los motores de pasos no ha evolucionado mucho desde la década de los noventa. Lo que más ha evolucionado son los sistemas para controlar los motores a pasos. Han pasado de ser simples elementos que generaban una secuencia de pulsos en varios canales a dispositivos que son capaces de comunicarse con una computadora y darle información en tiempo real sobre la posición del motor; estos controladores modernos son capaces de controlar múltiples motores al mismo tiempo, generando para cada uno curvas de aceleración además de tener un control sobre su posición. Incluso existen algunos controladores que utilizan algún algoritmo para verificar que el motor no haya perdido sincronía sin la necesidad de agregar retroalimentación alguna (Arefeen y Childrens 2007). También se han creado controladores que generan las curvas de aceleración basándose en las características de torque de Pull-in y de Pull-out del motor, evitando así que el motor sobrepase sus limitantes para determinada carga y velocidad, aumentando la fiabilidad del sistema motor-controlador (Kuo 2006).

Una parte de los desarrollos recientes que se han hecho en los motores a pasos se han enfocado en la reducción de sus dimensiones, puesto que para miniaturizar algunos dispositivos electrónicos también fue necesario miniaturizar sus actuadores. Por esta razón se han construido motores de pasos que funcionan dentro de pequeños dispositivos ópticos, en los sistemas de enfoque y de acercamiento. Algunos de estos dispositivos se encuentran en dispositivos portátiles, como teléfonos celulares. La miniaturización de los motores a pasos ha llegado hasta el campo de los dispositivos microscópicos. En el desarrollo de estos dispositivos, conocidos como MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) se han utilizados motores a pasos con diámetros menores a 1[mm] cuyos estatores cuentan apenas con un par de arrollamientos en sus embobinados (Gad-el-Hak 2001), en la figura 13 se encuentra una fotografía un motor parte de un MEMS.



Figura 13. Fotografía de un motor a pasos microscópico.

Algunas aplicaciones de punta donde se utilizan motores de pasos se han dado en el campo de la medicina. La compañía austriaca *Life Optics GmbH*, por ejemplo, ha creado microscopios que se utilizan como una especie de lentes de aumento; estos lentes permiten al médico tener la visión que tendría con un microscopio pero con toda la movilidad que permiten unos lentes. Para que estos lentes sean funcionales, deben de ajustar el enfoque automáticamente a cada pequeño movimiento de la persona, lo cual se logra mediante pequeños motores a pasos (Life Optics 2012). En la figura 14 se muestra una imagen de los lentes mencionados.



Figura 14. Lentes para microcirugía que utilizan motores a pasos.

En este mismo campo, se han desarrollado dispositivos que dosifican medicamentos a través de bombas peristálticas (figura 15) (Mraz 2012) , para tener un control preciso de la dosificación y debido al par alto que se requiere para mover este tipo de bombas, se utilizan motores a pasos. También existen en el mercado pipetas de alta precisión que pueden tomar cantidades volumétricas muy precisas mediante la succión controlada por un motor a pasos (figura 16) (Mraz 2012) .



Figura 15. Pipeta de alta precisión activada por un motor a pasos

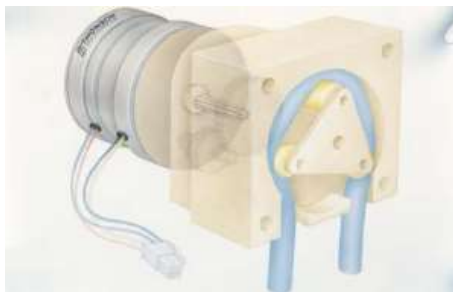


Figura 16. Bomba peristáltica activada por un motor a pasos.

1.8 Motores de pasos aplicados a micromecánica

El auge en el desarrollo de microdispositivos mecánicos se inició a mediados de los 80's. Este desarrollo se ha llevado a cabo en forma casi paralela en varias partes del mundo empleando diferentes métodos para la fabricación, tales como la microlitografía, maquinado por láser, electroerosión, mecánica convencional, etc.

La propuesta de generar microdispositivos mecánicos mediante el uso de técnicas de la mecánica convencional surge en Japón y Ucrania hacia finales de los 90's (Kussul, Rachkovski, y otros 1996, Okazak y Kitahara 2000). La idea básica es crear máquinas herramienta acordes a la escala de las piezas que se deseen fabricar. Más allá de crear micromáquinas herramienta (MMH's), se planteó la idea de desarrollar microfábricas como una alternativa para la producción de pequeños dispositivos mecánicos reduciendo errores y consumo de recursos tales como energía, materiales y espacio de trabajo (Ishikawa y Kitahara 1997, Trimmer 1996.). Una microfábrica cuenta con unidades de proceso (conformadas por MMH's), de ensamble, de control de calidad, de transporte, de mantenimiento, entre otras.

En los inicios de estas propuestas los investigadores se dieron a la tarea de desarrollar MMH's que permitieran comprobar las hipótesis generadas en esta área de investigación. A finales de los 90's, se reportan dos MMH's: una de ellas es un microtorno desarrollado en el Mechanical Engineering Laboratory (MEL) del National Institute of Advanced Industrial Science and Technology en Japón (Okazak y Kitahara 2000); y el otro es un Microcentro de maquinado desarrollado en el International Research and Training Center of UNESCO/IIP of Information Technologies and System de la, National Academy of Sciences of Ukraine (Kussul, Rachkovski, y otros 1996). A partir de ese momento surge un interés a nivel mundial por realizar investigaciones en el área Micromecánica. Países como Alemania, Corea, Noruega, Suiza, USA y México muestran interés por esta área (Ishikawa y Kitahara 1997, Okazak y Kitahara 2000, Kussul, Rachkovski, y otros 1996, Ito, y otros 2002, Yu-Chong 2000, Tanaka 2001, Bleuler, y otros 2000, Brand, Kleine-Besten y Schwenke 2000, Driesen, y otros 2004). En el año 2000 se culmina el desarrollo del primer microcentro de maquinado mexicano dentro del Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM (Kussul, Baidyk, y otros 2002) .

El GMM tiene como principal línea de investigación 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 (Kussul, Baidyk, y otros 2002). 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. Como resultado se desarrolló un MicroCentro de Maquinado (MCM) con dimensiones totales de 130×160×85 mm, controlado mediante el uso de una computadora personal y software elaborado en Borland C++. Este microcentro de maquinado tiene como configuración: tres ejes de translación configurados en forma ortogonal, y un eje rotacional. El volumen de trabajo obtenido con este microcentro de maquinado es de: 20 mm de desplazamiento en los ejes X y Z, y 35 mm para el eje Y. La resolución de este equipo es de 1.9µm. El equipo es mostrado en la Figura 17 y en la Figura 18 se muestran algunas piezas desarrolladas con este equipo.

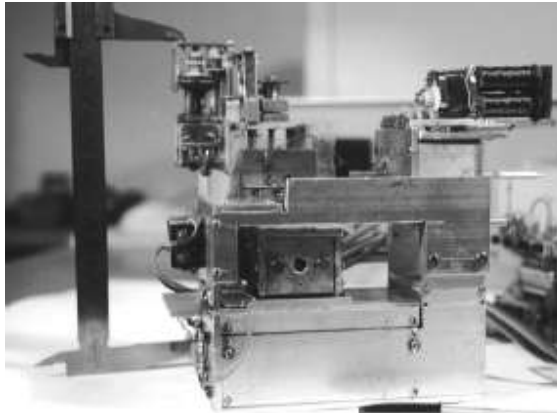


Figura 17. Micromáquina herramienta de primera generación (prototipo 2000).

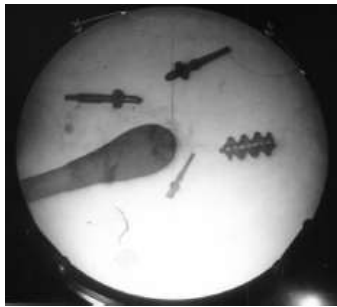


Figura 18. Piezas producidas en la micromáquina herramienta.

Para el 2008, se desarrolló un MicroCentro de Maquinado con configuración dimensiones totales similares al del año 2000, pero con mejoras relacionadas con el tipo de actuadores utilizados, los métodos de manufactura de sus partes y con el sistema de control. Este MCM cuenta con una resolución de 140 nm y cuenta con un sistema de control que interpreta códigos estándar de sistemas CNC (Caballero Ruiz, Ruiz Huerta y Silva López 2010) . El equipo es mostrado en la Figura 19 y en la Figura 20 se muestran algunas piezas desarrolladas con este equipo.



Figura 19. Versión 2008 de prototipo de MCM desarrollado en México.



Figura 20. Manufactura de piezas en el prototipo 2008.

Dentro de las áreas de aplicación que se pueden mencionar para esta línea de investigación se destacan el área médica con aplicaciones enfocadas al desarrollo de pequeños dispositivos para el desarrollo de cirugías no invasivas; la industria metal-mecánica con aplicaciones principales en la manufactura de micropiezas, tales como tornillos, engranes, flechas, entre otras; la educación con aplicaciones encaminadas al desarrollo de herramientas que permitan la enseñanza, mediante sistemas micromecánicos, de técnicas de manufactura por control numérico, control de procesos, tiempos y movimientos, electrónica, etc.; entre otras.

Uno de los principales campos de investigación que se ha abierto dentro de esta área es el relacionado con la investigación y desarrollo de actuadores para la automatización del microequipo. Lo anterior se debe a la necesidad de eliminar la manipulación en forma manual, con la finalidad de evitar problemas en el manejo de los microdispositivos, así como también para incrementar las prestaciones del microequipo, principalmente la exactitud y repetibilidad.

En el caso de las micromáquinas herramienta desarrolladas hasta este momento se han empleado diferentes alternativas en cuanto a actuadores se refieren. En la Tabla 1 se presenta una comparación de los tipos de actuadores que se emplean en dos desarrollos japoneses y el desarrollo mexicano.

El tipo de actuadores que se emplean en el desarrollo de microequipo repercute directamente en sus características generales y en su precio, es por ello que resulta de gran importancia la generación de una línea de investigación enfocada al desarrollo de motores que permita un crecimiento del campo de MMH's incrementando el rango de aplicaciones de microsistemas.

El uso de motores de pasos representa una alternativa sencilla y económica para resolver problemas de posicionamiento. Su fácil integración a sistemas de control representa otra gran ventaja de este tipo de actuadores con respecto a actuadores de otro tipo, como pueden ser motores DC, Motores de AC, etc. Por otro lado, algunas desventajas de este tipo de actuadores están directamente relacionadas con limitaciones de torque y relativa baja velocidad de operación.

Los actuadores desarrollados hasta este momento en el GMM han dado buenos resultados a bajos costos, el valor promedio de estos motores oscila entre los 50 y 100 pesos.

El principal objetivo, al desarrollar este tipo de actuadores, es escalar sus dimensiones para aplicarlos en diseños de dispositivos micromecánicos. El reto en este apartado es tratar de mantener características de eficiencia acordes a las necesidades de las aplicaciones, puesto que algunos estudios reportan que la eficiencia en motores electromagnéticos decrece en forma similar al decremento de su tamaño (Trimmer 1996.). Las aplicaciones de este tipo de actuadores pueden presentarse también en otros ámbitos como por ejemplo: 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 actuadores para la automatización de manipuladores, robots sonda, líneas de transporte, etc.

En el mercado comercial es posible encontrar algunas compañías que desarrollan motores con dimensiones de hasta 6 mm de diámetro, tal es el caso de las empresas Faulhaber-Group y Seiko Instruments Inc., pero los precios de este tipo de actuadores son elevados.

MICROEQUIPO	CARACTERÍSTICAS GENERALES	ELEMENTO EMPLEADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Microtorno Japonés desarrollado por MEL (1999)	Resolución: 0.2µm Precisión: 1 µm Dimensiones generales: 32x28x30mm Actuadores: PZT's Husillo: Motor DC 15000 rpm Precio aproximado: 35,000 dólares	Piezoeléctricos acoplados a platinas	Resolución nanométrica	Costo elevado >1000 dólares por eje
Microcentro de Maquinado desarrollado en el GMM (2000)	Resolución: 1.8 µm Precisión: 62 µm Dimensiones generales: 136x160x85mm Actuadores: Motores de pasos acoplados a cajas de engranes Husillo: Motor de pasos 1200 rpm. Precio aproximado: 110 dólares (únicamente materiales).	Motores de pasos (4 pasos/rev) acoplados a cajas de engranes desarrollados en el laboratorio.	Bajo costo < 30 pesos por eje alta resolución	
Microtorno Japonés desarrollado por NanoWave (2002)	Resolución: 0.195 µm Precisión: 5 µm Dimensiones generales: 100x150x100mm Actuadores: Microservo actuadores de AC. Husillo: Motor DC 10000 rpm. Precio aproximado; 30,000 dólares.	Servomotores AC con optosensor de 1024 pasos/rev marca Yaskawa	Alta resolución ≈0.35 grados Alto par ≈2.5 mNm	No es un motor comercial, se estima que el costo por motor supera los 2000 dólares

Tabla 1. Tipos de actuadores empleados en micromáquinas herramienta.

2 Planteamiento del problema.

A nivel mundial, uno de los principales problemas que enfrentan los grupos relacionados con la investigación y desarrollo de microsistemas está relacionado con los actuadores empleados en la automatización de los mismos. Dentro de las alternativas que existen se encuentran los actuadores basados en materiales piezoeléctricos, los basados en principios electromagnéticos, hidráulicos y neumáticos, y los basados en materiales de aleación con memoria de forma.

Atendiendo a las nuevas y futuras demandas que están surgiendo en el ámbito científico e industrial relacionadas con el desarrollo de actuadores de dimensiones pequeñas (menores a los 30x30x30mm) para la automatización de procesos, resulta un campo atractivo generar investigación y tecnología para fortalecer el desarrollo del sector científico e industrial.

Para lograr esto se propone realizar investigaciones para el diseño y fabricación de motores de pasos basados en diferentes principios de operación, así como llevar a cabo tareas de evaluación experimental que permitan establecer nichos de aplicación.

2.1 Objetivos

- Desarrollar prototipos de motores de pasos basados en diferentes principios de operación (fuerza de Lorentz e intensidad de campo magnético) con dimensiones iguales o inferiores a 30x30x30mm.
- Evaluar prototipos de motores a paso de dimensiones pequeñas.

3 Propuesta de diseño

En el GMM se desarrollan motores de pasos basados en dos diseños: el motor de pasos basado en intensidad de campo magnético y el motor de pasos basado en la Fuerza de Lorentz. 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 teniendo las mismas dimensiones. Otra particularidad de estos motores es que todos ellos tienen imán permanente en su rotor.

3.1 Motor de pasos basado en intensidad de campo magnético

Como se ha mencionado anteriormente, los motores del GMM han sido fabricados en función de las necesidades de cada proyecto que se realiza. Para el proyecto del microcentro de maquinado se emplearon este tipo de motores (con algunas variantes, pero en esencia es la misma clase de motor). Para explicar el funcionamiento de este tipo de motores, se partirá de la estructura de un motor de pasos de un estator. Las figuras 21 y 22 ilustran la forma de este tipo de motores.

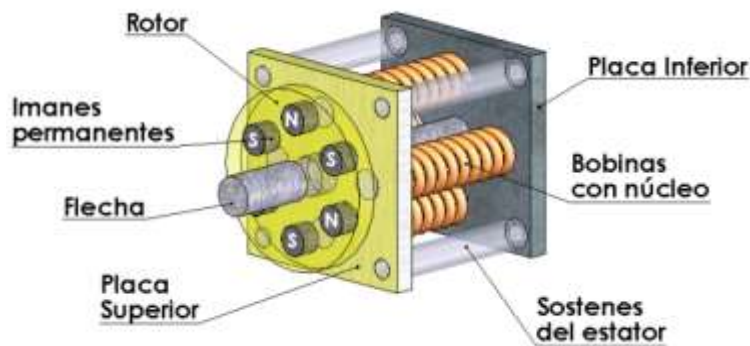


Figura 21. Motor a pasos de un estator.

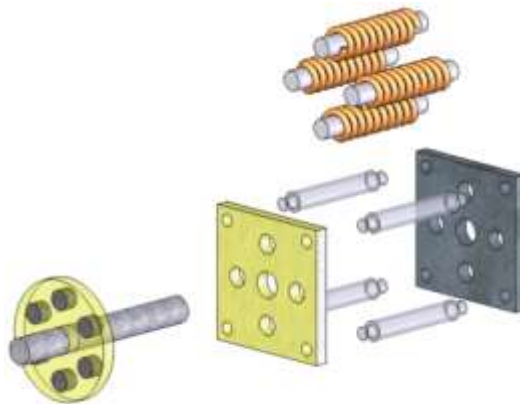


Figura 22. Vista en explosión del motor de un estator.

Las dos partes fundamentales del motor son el estator y el rotor. El estator está conformado por cuatro bobinas, cuatro soportes y las placas laterales. Mientras que el rotor está conformado por un disco en el cual están insertados seis imanes que están imantados axialmente, éstos están separados en ángulos iguales uno del otro; el disco está acoplado al estator mediante una flecha. En la figura 23 se muestra el ensamble del estator y del rotor, así como una vista frontal de cómo queda el arreglo.

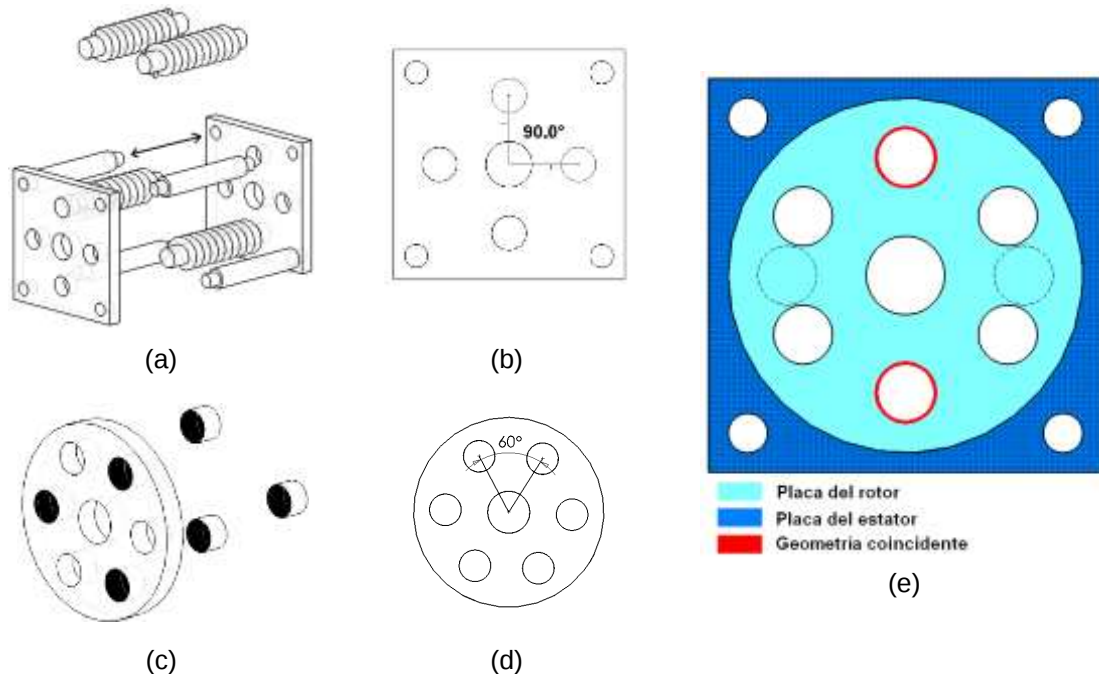


Figura 23. Estator y rotor. (a) Armado del estator. (b) Vista frontal de la placa del estator. (c) Armado del rotor. (d) Vista frontal del rotor. (e) Coincidencia geométrica ambas partes.

En el estator, las bobinas están separadas en ángulos iguales de 90° . Caso similar se tiene con los imanes del rotor, que se encuentran separados por 60° entre sí. Al ver la vista frontal de la placa del estator (figura 23b), al mismo tiempo que la del rotor (figura 23d), se puede apreciar que las geometrías de ambas están diseñadas de manera que dos de las caras de los núcleos de las bobinas del estator y dos imanes del rotor coincidan entre sí para posiciones determinadas. Esto se puede observar en la figura 23e. Se tiene que poner especial atención a esto último, ya que de esto depende el número de pasos que el motor dará por revolución.

Los motores desarrollados en este informe trabajan en modo bipolar. El circuito eléctrico que se conforma en el estator con las cuatro bobinas se presenta en la figura 24.

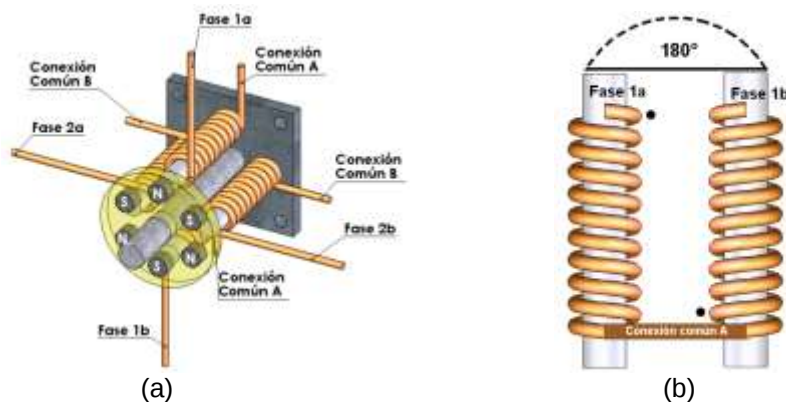


Figura 24. Conexión de las bobinas para formar el circuito eléctrico.

De las cuatro bobinas que se tienen en el estator, se tiene un total de ocho alambres (dos por cada bobina, inicio y fin de arrollamiento), se hacen conexiones en pares para tener entonces dos fases en total, tal como se muestra en la figura 24b, que muestra la conexión para formar la fase 1, dejando libres dos alambres de salida. La fase 2 está conectada de la misma manera, dejando así un total de cuatro

alambres de salida a la etapa de potencia. Esta disposición se hace para que cada fase del motor genere polos alternados en los extremos de los núcleos de las bobinas.

En lo que respecta al circuito magnético, los imanes insertados en el disco del rotor cuentan con una imantación axial (ver figura 25), con la finalidad de que puedan interactuar con los polos magnéticos generados por las fases de motor.

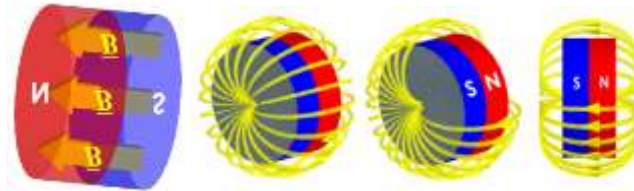


Figura 25. Líneas de flujo magnético de un imán permanente imantado de forma axial.

Los polos magnéticos opuestos (norte y sur) de cada fase del estator se generan a 180° geométricos uno del otro. Por lo tanto, para que el rotor gire se tienen que cumplir dos condiciones:

Condición 1. Es necesario ordenar los polos magnéticos de los imanes permanentes del rotor, de manera que existan polos opuestos a 180° geométricos uno del otro, y debe cumplirse para cualquier polo o imán del rotor (ver figura 26).

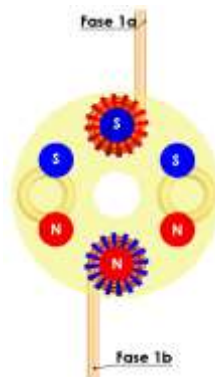


Figura 26. Condición uno para la colocación de los imanes en el rotor.

Condición 2: Los polos contiguos del rotor deben estar colocados de manera alternada (ver figura 27)

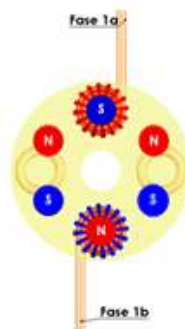


Figura 27. Condición uno y dos para la colocación de los imanes en el rotor.

Para excitar al motor, se lleva a cabo la polarización de las fases de acuerdo al diagrama de tiempos mostrado en la figura 28.

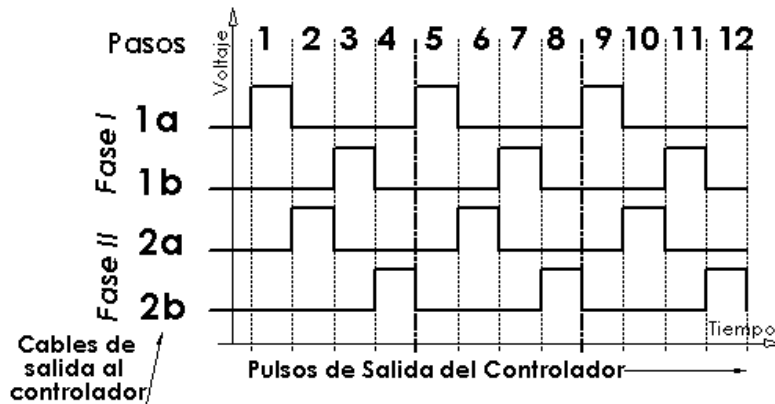


Figura 28. Diagrama de tiempos para la polarización de las fases del motor.

Al realizarse esta secuencia de polarización en el motor, se genera en los núcleos de las bobinas del estator las polaridades marcadas en la tabla 2 (el signo (+) señala un polo Norte y el signo (-) un polo Sur).

	Paso	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12
Fase I	Núcleo de la bobina 1a	+	*	-	*	+	*	-	*	+	*	-	*
	Núcleo de la bobina 1b	-	*	+	*	-	*	+	*	-	*	+	*
Fase II	Núcleo de la bobina 2a	*	+	*	-	*	+	*	-	*	+	*	-
	Núcleo de la bobina 2b	*	-	*	+	*	-	*	+	*	-	*	+

* indica "sin polaridad"

Tabla 2. Secuencia de Polaridades en los núcleos de las bobinas de estator.

Con el fin de que se tenga una mejor eficiencia en los flujos magnéticos del estator, una de las placas laterales de éste es de acero con el propósito de que el flujo magnético circule a través de ésta (ver figura 29).

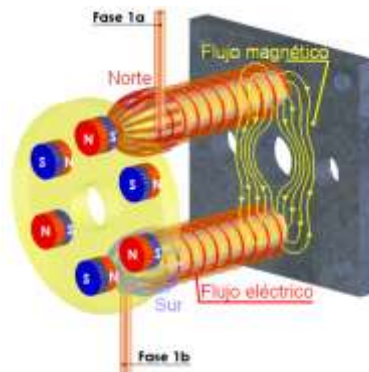


Figura 29. Flujo magnético a través de la placa de acero.

Se eligen materiales tales como el acero debido a su alta permeabilidad, lo que permite que el flujo magnético encuentre baja reluctancia en su camino de una bobina a otra.

El circuito magnético queda completo tal como se muestra en la figura 30.

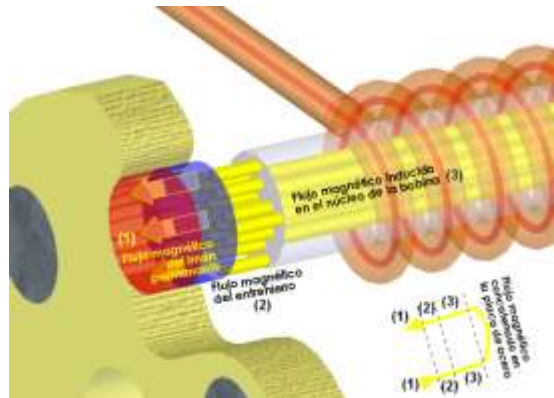


Figura 30. Circuito magnético cuando se excita una fase del motor.

Finalmente, el número de pasos por revolución está dado por la siguiente ecuación:

$$S = mNr \quad (1)$$

Donde:

S: número de pasos por revolución

Nr: número de imanes en el rotor

m: número de fases

Para este caso, el rotor tiene 6 imanes y el número de fases es dos, sustituyendo estos valores en la expresión anterior:

$$S = 2 * 6 = 24 \text{ pasos} \quad (2)$$

Cuando se agrega otro estator al motor, se le denomina motor de doble estator. Este motor resulta ser óptimo para aplicaciones que requieren aún mayor par.

La figura 31 se representa la estructura de un motor de doble estator. El estator del frente está representado de manera transparente con el fin de que se entienda mejor la ilustración. Se observa que a cada arrollamiento se le ha dado un nombre, esto con el fin de hacer clara la conexión entre las bobinas de cada estator.

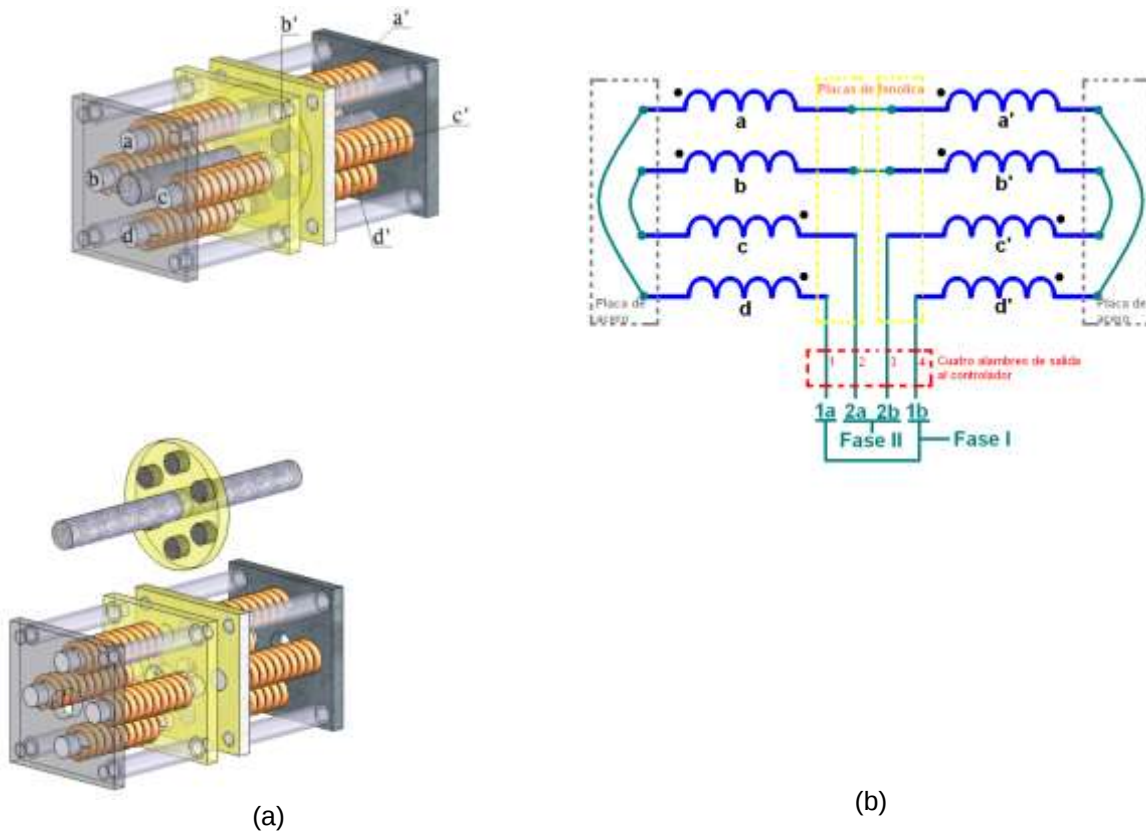


Figura 31. (a) Estructura de un motor de doble estator; (b) Circuito eléctrico del motor.

En la figura 31, los puntos marcados en los símbolos de bobinas indican el extremo por el que se inició el arrollamiento. Debe considerarse que cada extremo que sea fin de arrollamiento de una bobina, debe estar conectado a un inicio de arrollamiento de otra bobina, y viceversa. En la figura 32 se muestra el circuito magnético del motor de doble estator

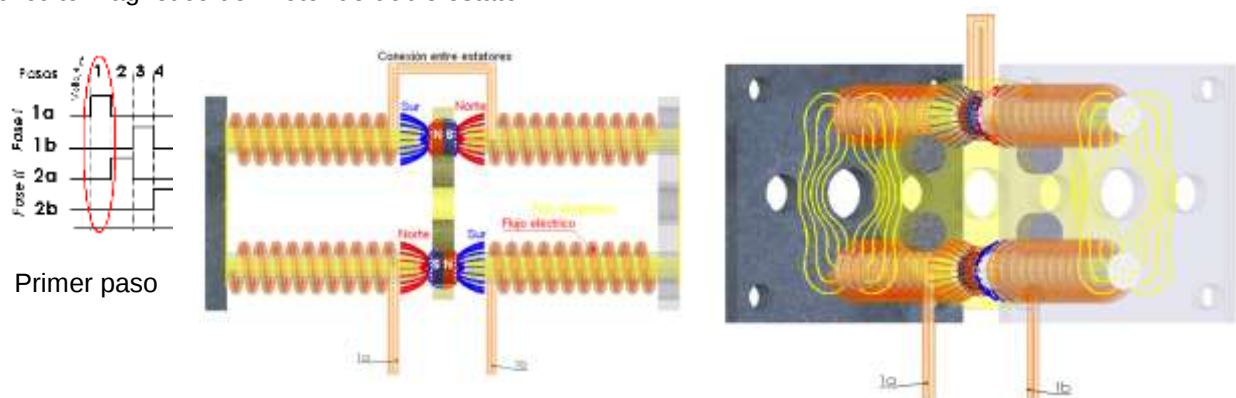


Figura 32. Circuito magnético del motor de doble estator con la fase a excitada.

Las bobinas de la fase II, al igual que el resto de las líneas de flujo magnético de los polos, no se muestran en esta figura para que se vean con claridad las líneas de flujo magnético de la fase a. En la figura 33 se muestran las líneas de flujo magnético cuando la fase b esta excitada.

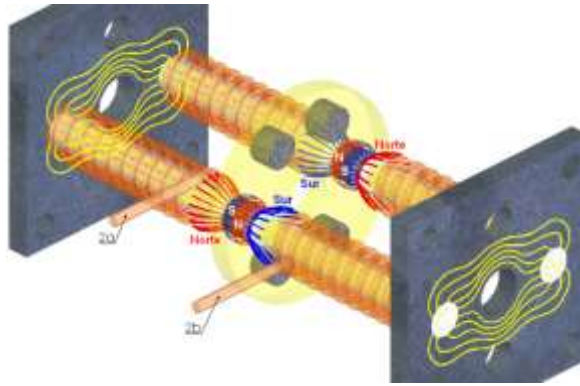


Figura 33. Excitación de la fase b.

3.2 Motor de pasos basado en el principio de Fuerza de Lorentz

La mayoría de motores a pasos, híbridos o de imán permanente, funcionan mediante circuitos magnéticos, es decir, por reluctancia. En cambio, en los motores a pasos de fuerza de Lorentz, lo que causa el movimiento es la fuerza que aparece cuando un alambre por el que circula una corriente es atravesado por un campo magnético.

Un campo magnético afecta a sus alrededores de dos maneras: por la ley de Faraday y por la Fuerza de Lorentz.

La ley de Faraday es la base del funcionamiento de los transformadores y establece que si un flujo atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá en ésta un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo magnético con respecto al tiempo.

La otra manera en que un campo magnético afecta a sus alrededores es a través de la fuerza de Lorentz, que es la fuerza que un campo magnético induce sobre un alambre conductor que porta corriente dentro de él. El concepto básico se encuentra ilustrado en la figura 34.

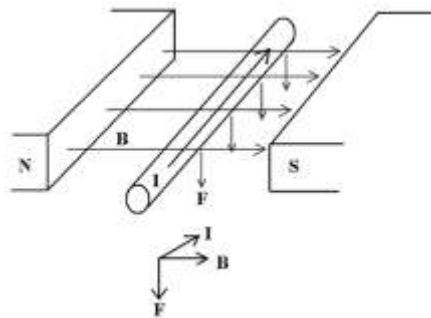


Figura 34. Representación vectorial de la fuerza Lorentz.

En la figura se muestra un conductor dentro de un campo magnético uniforme de densidad de flujo B . El conductor mide l metros y porta una corriente de i amperes, cuyo vector apunta hacia adentro de la página. La fuerza F inducida sobre el conductor está dada por:

$$F = i(l \times B) \quad (3)$$

La dirección de la fuerza está dada por la regla de la mano derecha: si el dedo índice de la mano derecha apunta en la dirección del vector de corriente i y el dedo medio apunta en la dirección del vector de densidad de campo B , entonces el dedo pulgar apuntará en la dirección de la fuerza resultante sobre el

alambre; o lo que es lo mismo por el producto cruz de los vectores de longitud y campo magnético. La magnitud de esta fuerza está dada por la ecuación:

$$F = i l B \sin \theta \quad (4)$$

Donde θ es el ángulo comprendido entre el alambre y el vector de densidad de flujo(B).

Esta fuerza es la base de la acción motor. Casi todos los tipos de motor eléctrico se basan en este principio básico para producir las fuerzas y pares que producen el movimiento.

Con esta idea, lo que se busca en un diseño de un motor a pasos por fuerza de Lorentz, es generar par a través de la fuerza de Lorentz y a su vez mantener la mayor cantidad de corriente atravesando el campo magnético, para maximizar dicha fuerza de Lorentz. De igual manera, para incrementar la fuerza de Lorentz, también se deben de buscar elementos que proporcionen el mayor campo magnético posible.

Para cumplir con los principios de diseño se seleccionó una configuración similar al motor de doble estator basado en intensidad de campo magnético. Al igual que en dicho motor, el rotor está conformado por un disco donde se colocan varios imanes permanentes separados un ángulo determinado como se muestra en la figura 35.

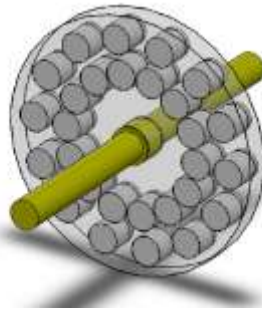


Figura 35. Rotor de un motor de pasos de fuerza de Lorentz.

A su vez, el estator se diseña en forma de toroide, con cuatro embobinados, dos por cada fase, las fases quedan como se muestra en la figura 36

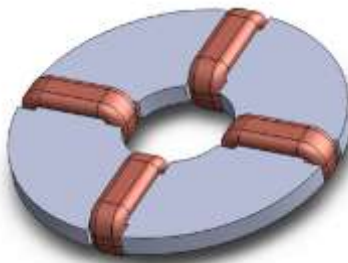


Figura 36. Estator de un motor a pasos de fuerza de Lorentz.

En este diseño se coloca el rotor de manera perpendicular a los embobinados de manera que entre las líneas de flujo de los imanes y las líneas del embobinado queden en un ángulo de 90° , como se muestra en la figura 37.

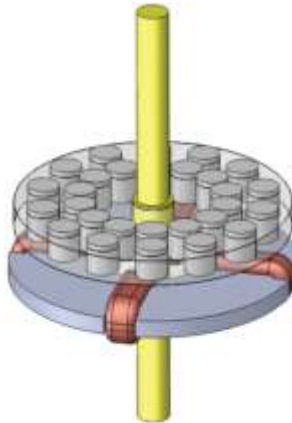


Figura 37: Posición del rotor respecto al estator.

En este diseño, como se muestra en la figura 8, la fuerza de Lorentz se produce al hacer fluir corriente por los embobinados del rotor. El campo magnético es provisto por los imanes del estator, por lo que la fuerza resultante apunta en el sentido del producto cruz de la corriente y del campo magnético.

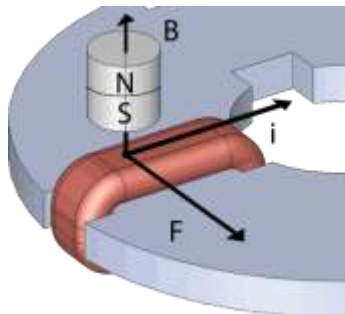


Figura 38: Producción de la fuerza de Lorentz en el motor.

Para generar los pasos en estos motores en su rotor se acomodan varios imanes y, al igual que en el motor basado en intensidad de campo magnético, se alterna su polaridad como se muestra en la figura 39.

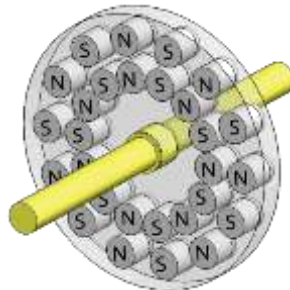


Figura 39: Colocación de los imanes en el rotor.

Las dos fases de estos motores están formadas por los embobinados que se encuentran coloniales en el estator. Los embobinados de la misma fase se encuentran conectados entre sí de tal manera que al fluir corriente eléctrica a través de ella y bajo la influencia del campo magnético de los imanes, las fuerzas de Lorentz que se producen generen un par en complementario.

En este punto cabe aclarar que la ecuación de la fuerza de Lorentz describe la fuerza que induce el campo magnético sobre el conductor en el que está fluyendo la corriente. Si el conductor que se describe en dicha ecuación se encontrara libre de resistencia mecánica, se movería hasta donde se encontrara fuera de la influencia del campo magnético. En el caso de estos motores, el conductor se encuentra fijo, en el estator, mientras lo que se encuentra móvil son los imanes que generan el campo magnético,

porque el rotor en el que éstos están montados puede girar libremente. De esta manera, si se energiza el embobinado que está bajo la influencia del campo magnético de uno de los imanes, la fuerza de Lorentz aparecerá en el embobinado, y, por efecto de la tercera ley de Newton, esta fuerza también aparecerá en el imán del rotor pero con sentido contrario, y es con esta fuerza con la que el rotor de éste diseño se mueve.

Para que el motor gire, paso a paso, se deben de ir energizando las fases, una a la vez, alternando entre una y otra. Cada una de las fases se energiza primero en un sentido y después se energiza en el otro, como se describe a continuación

- Etapa 1: Al energizar primera fase del motor, el imán más cercano se repele por la fuerza de Lorentz, haciendo girar el rotor, hasta que otro imán empieza a ser influenciado por la fuerza de Lorentz. Este otro imán, por tener polaridad inversa al primero produce un par en sentido contrario. El rotor entonces se detiene justo en la posición en que la fuerza de Lorentz de ambos producida en ambos imanes se equilibra, esto sucede cuando ambos imanes encuentran a la misma distancia de la fase encendida. Si se trata del primer paso que da el motor, la rotación puede ser en cualquier sentido, dependiendo de la polaridad del imán se encuentre más cercano. En la figura 40 se muestra una ilustración de la etapa1.

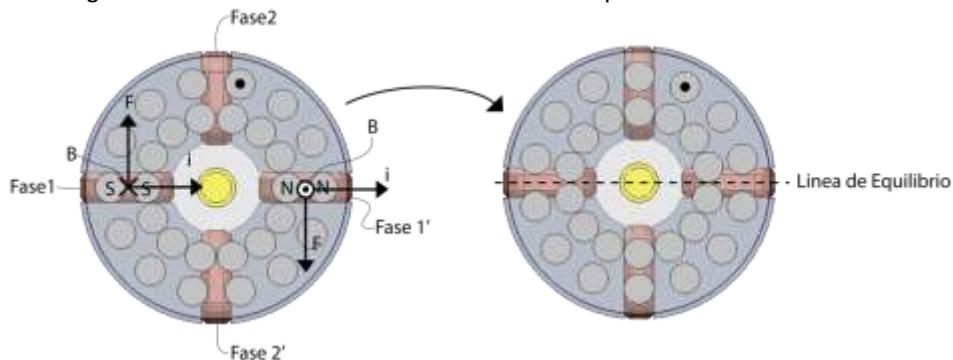


Figura 40. Generación de pasos etapa 1.

- Etapa 2: Después de la etapa anterior, un imán quedo justamente encima de los embobinados de la segunda fase, de tal manera que su flujo magnético se encuentra influyendo directamente sobre los embobinados de esta fase por lo que al pasar corriente por la segunda fase la fuerza de Lorentz se produce con la máxima magnitud posible; esto provoca que el rotor gire hasta que, por la aparición de la fuerza de Lorentz en el imán que se acercó a la fase excitada; las fuerzas producidas se equilibren nuevamente. En la figura 41 se muestra una ilustración de esta etapa.

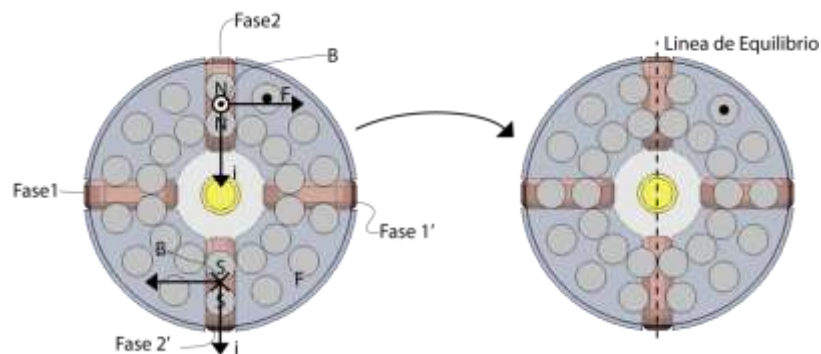


Figura 41. Generación de pasos etapa 2.

- Etapa 3: En esta etapa se excita la fase 1, pero en sentido contrario. De esta manera se garantiza que el par producido sea en el mismo sentido que el anterior, puesto que los imanes que están sobre la fase 1, son de la polaridad contraria a los que estaban en la primera etapa. Si excitáramos esta fase haciendo fluir corriente de la misma manera que en la etapa 1, el motor giraría en la dirección contraria debido a la polaridad invertida que ahora tienen los imanes sobre la fase 1. Al igual que las dos fases anteriores, el movimiento se detiene hasta que otro imán con polaridad invertida produce par en sentido contrario. En la figura 42 se muestra una ilustración de esta etapa.

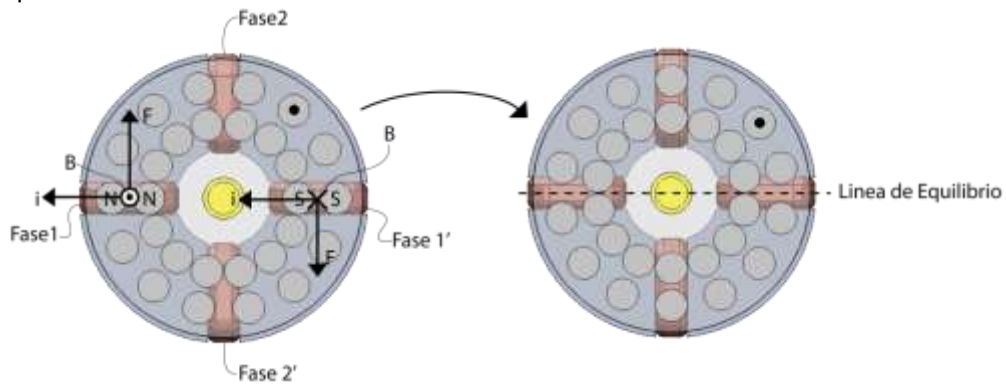


Figura 42. Generación de pasos etapa 3.

- Etapa 4: En esta etapa se excita la fase 2, pero haciendo fluir la corriente en sentido contrario a la etapa dos. Al igual que en la etapa tres, se garantiza la dirección del giro debido a la polaridad de los imanes que están sobre la fase dos. De nuevo el movimiento se detiene en el momento en que aparece otro imán y produce par en sentido negativo. En la figura 43 se muestra una ilustración de esta etapa.

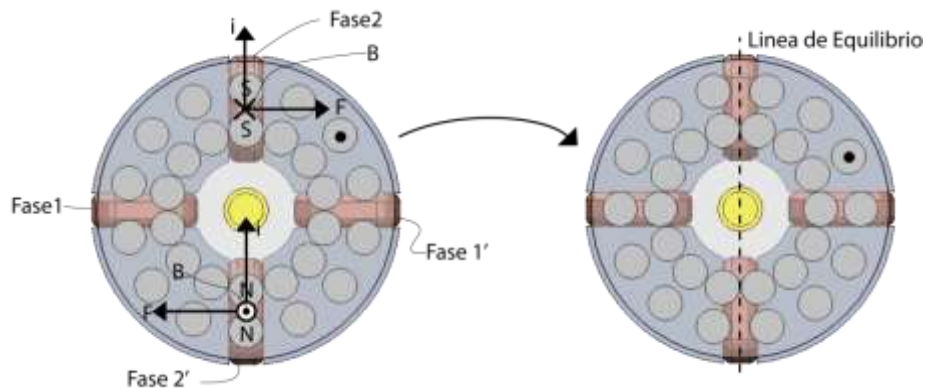


Figura 43. Generación de pasos etapa 4.

Si estas cuatro etapas se repiten, el motor seguirá girando en el mismo sentido. Mientras que, para girar el motor en sentido contrario, se utiliza invierte el orden en las etapas. En este diseño el sentido del giro siempre está garantizado, a excepción del primer paso que el motor realice; incluso si se detiene el motor y se vuelve arrancar, el sentido de giro está garantizado (mientras no se haya hecho un desplazamiento por cuestiones externas). Además, el cambio de sentido se puede hacer sin perder un solo paso ya que el sentido del paso está determinado por el sentido de la corriente que pase por las fases en cualquier momento.

En la descripción de cómo se genera el movimiento, se observa que cada vez que se energiza una de las fases, el rotor avanza la mitad del ángulo que hay entre los imanes del rotor, por lo que el total de pasos de un motor que opera bajo estos principios es del doble del número de imanes que tiene en su rotor.

La manera en que se produce el movimiento en estos motores, impone dos restricciones:

- El número de imanes en el rotor debe de ser par. Si el número de imanes en el rotor es impar, no se podrán tener alternadas las polaridades en todos de los imanes en el rotor, por lo que en algún momento, el rotor giraría en sentido contrario al que se requiere.
- El ángulo entre los imanes con la misma polaridad no debe de ser 90° : Si esto sucede, en cada una de las etapas los imanes que se encuentran directamente sobre los embobinados que se van al siguiente paso energizar serán de la misma polaridad, lo cual provocará que se neutralicen entre sí los pares producidos por cada uno de los embobinados de las fases. Haciendo un motor que no produce par.

En los motores diseñados para este trabajo, con el fin de aumentar el par del motor, se colocan dos estatores, uno a cada lado del rotor. Para que el motor funcione correctamente, las fuerzas de Lorentz producidas por la interacción de las bobinas de la misma fase, de ambos estatores, con el campo magnético de los imanes del rotor deben de generar par en el mismo sentido. Si no fuese así, los pares que producen las fuerzas de Lorentz en los embobinados se neutralizarían entre sí por lo que se tendría un motor que consume energía, pero que no produce par alguno.

En este diseño, las únicas partes que interactúan para producir par son el estator y el rotor, sin embargo se diseñan todas las demás piezas para mantener al estator y al rotor en su lugar. El explosivo del motor diseñado se muestra en la figura 44. En este diseño, para dar soporte a los estatores, se diseña una carcasa que coloque las bobinas a la distancia adecuada del estator, evitando que haya rozamientos con éste. Dicha carcasa se cierra con dos tapas, una en cada extremo, y en dichas tapas se coloca un soporte con un rodamiento que mantendrá a la flecha en su lugar. El soporte del rodamiento a su vez sirve para mantener al rotor en su lugar, entre los dos estatores.

En el explosivo (figura 44) se observa además que se agregan un circuito externo en cada uno de las tapas, que permiten hacer las conexiones de los embobinados.

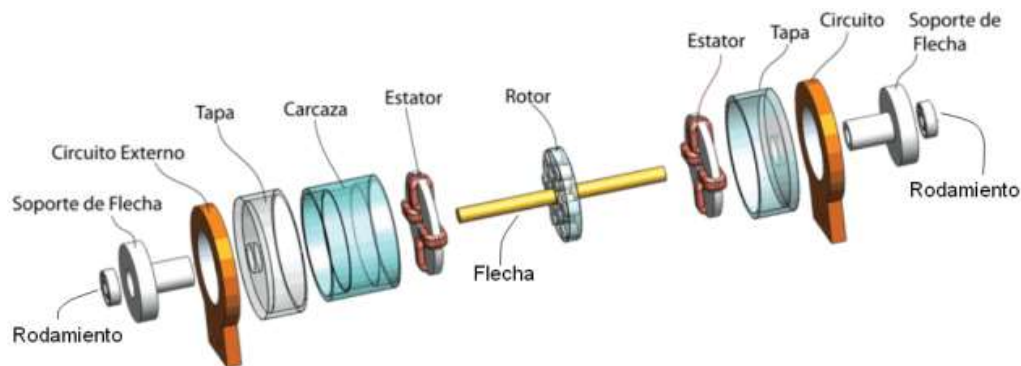


Figura 44. Explosivo del motor a pasos de fuerza de Lorentz.

La mayoría de los motores eléctricos producen energía eléctrica en el cambio de polaridad del rotor, lo cual crea instantes de corto circuito en el embobinado, esto se refleja en el aumento de temperatura. No es lineal la reacción corriente-par. Funcionan a mayores velocidades. El motor basado en fuerza de Lorentz no genera dicha pérdida eléctrica, y a largo plazo no produce un exceso del llamado ruido de *buzzing* (laminación eléctrica). La relación corriente-par es lineal, así que a mayor corriente, mayor par. Se usan a bajas revoluciones, pero con un mayor par.

4 Fabricación de los motores propuestos.

4.1 Motor de pasos de doble estator basado en intensidad de campo magnético

A continuación se hará la descripción del proceso de manufactura de las piezas que conforma al Motor de doble estator basado en intensidad de campo magnético. En la figura 45 se muestran las partes que conforman este motor.

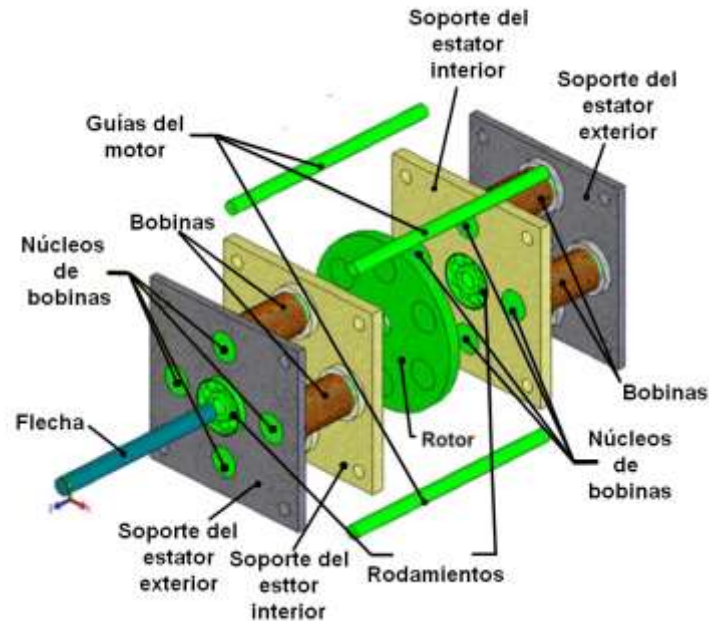


Figura 45. Partes que conforman al motor de doble estator.

Para este caso se tomará como ejemplo la fabricación de un motor de 22x22x30 mm. Para comenzar, se tienen que fabricar los carretes que conforman a las bobinas. La imagen de esta pieza se muestra en la figura 46.

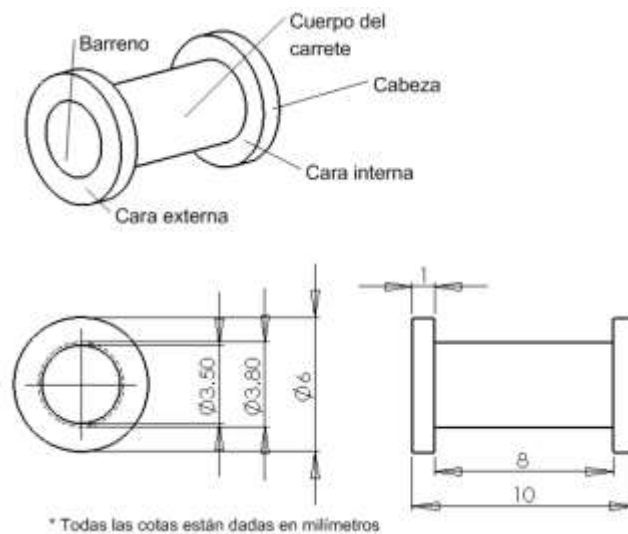


Figura 46. Carrete para la fabricación de las bobinas del motor.

Para fabricar las bobinas se hace un arrollamiento sobre el cuerpo de cada carrete con alambre magneto del calibre necesario según el diseño eléctrico del motor. Se recomienda que, una vez terminado el arrollamiento de cada bobina, se selle con esmalte para bobinas con el fin de que el arrollamiento no se deshaga.

Los soportes tanto exteriores como interiores de los estatores se realizan considerando el esquema mostrado en la figura 47.

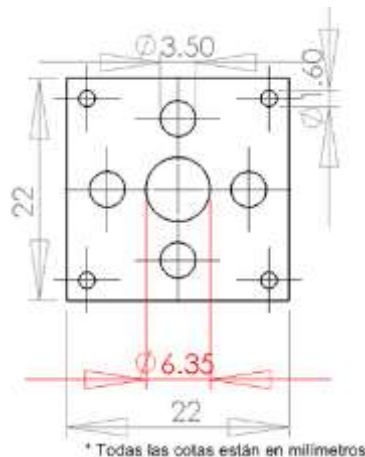


Figura 47. Esquema de los soportes de los estatores del motor.

Para la manufactura de estos soportes se tiene que considerar que los soportes exteriores deben ser fabricados con un material de alta permeabilidad (hierro, acero dulce, etc.) y los soportes interiores de un material aislante (placa fenólica, baquelita, fibra de vidrio, etc.). Para garantizar que los maquinados de estas piezas tengan las tolerancias adecuadas, se recomienda que el proceso de manufactura se lleve a cabo en un sistema CNC. El diámetro del barreno central de ambas placas está en función del diámetro externo del rodamiento que se empleará.

La figura 48 muestra las dimensiones que se necesitan en cada núcleo para las bobinas del Motor de Doble Estator.

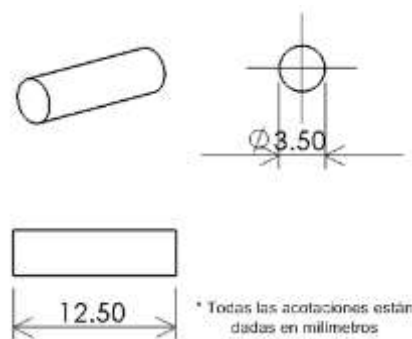


Figura 48. Núcleos de bobinas.

El material para el núcleo de las bobinas se recomienda que sea de alta permeabilidad magnética. Esta pieza es realizada en un sistema de torneado.

Las guías del motor se muestran en la figura 49. Esta barra puede ser de latón o cualquier material suficientemente rígido para dar alineamiento a ambos estatores. Esto es necesario para mejorar el

acoplamiento mecánico, lo que inherentemente repercute en una mejor interacción estator-rotor. Se emplea el torno para la manufactura de esta pieza.

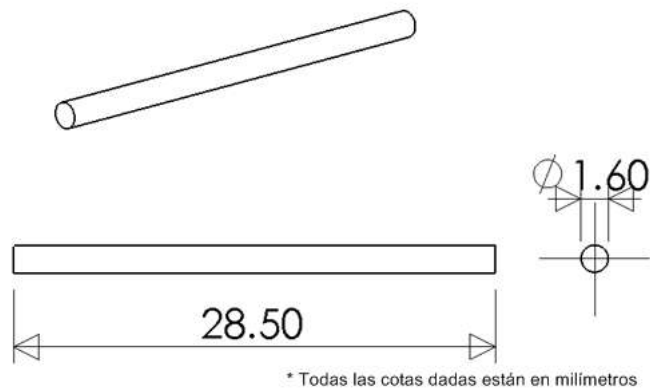


Figura 49. Guías del motor.

El disco del rotor se muestra en la figura 50. La materia prima debe ser de un material no conductor, como ejemplo: Placa fenólica, baquelita, fibra de vidrio, etc. Debe procurarse que el material seleccionado sea ligero para disminuir su inercia. Como ejemplo, para este caso particular, se usará placa fenólica. Las herramientas necesarias para llevar a cabo la manufactura de esta pieza son principalmente el torno y el taladro.

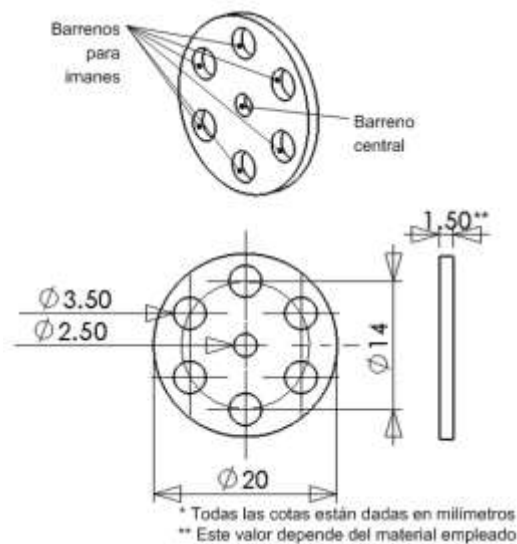


Figura 50. Disco del Rotor.

Finalmente, la flecha del motor se fabrica a partir de una barra de un material que resista las cargas a las cuales se someterá el motor. Para este ejemplo se recomienda que sea de latón.

4.2 Motor de pasos basado en el principio de Fuerza de Lorentz

A continuación se hará la descripción del proceso de manufactura de las piezas que conforma al Motor basado en el principio de Fuerza de Lorentz. En la figura 51 se muestran las partes que conforman este motor.

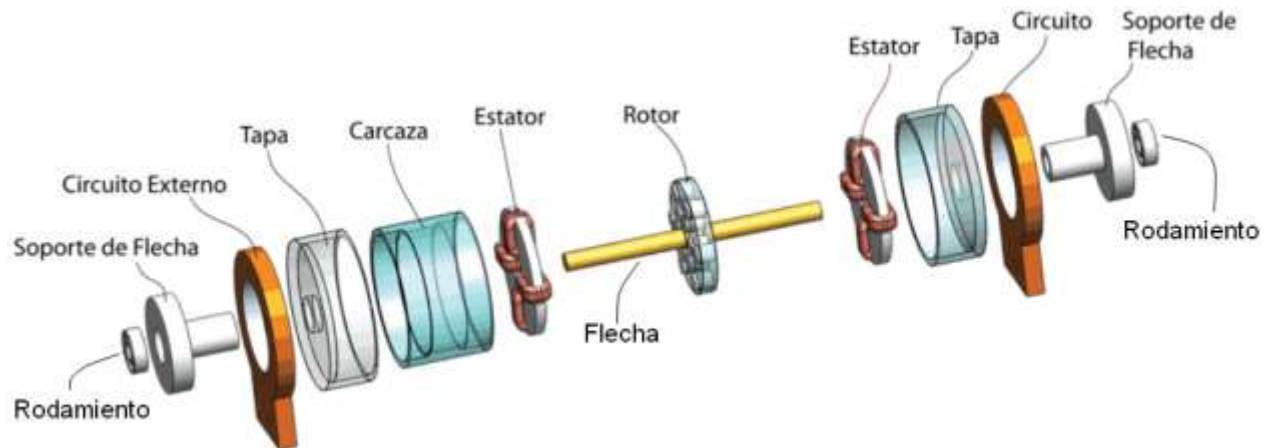


Figura 51. Partes que conforman al motor basado en el principio de fuerza de Lorentz.

Para este caso se tomará como ejemplo la fabricación de un motor de $\phi 31 \times 25 \text{ mm}$. Para comenzar, se tienen que fabricar el estator. La imagen de esta pieza se muestra en la figura 52. El estator está formado por los embobinados y el núcleo.

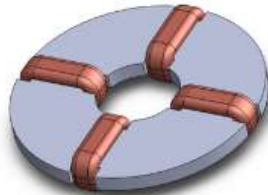


Figura 52. Estator de un motor a pasos de fuerza de Lorentz.

El núcleo del estator (ver figura 53) se fabrica de material de alta permeabilidad magnética, pues se requiere que el circuito magnético creado por las bobinas pase a través del núcleo. Por otra parte, el núcleo debe de ser de un material resistente a las temperaturas altas, alrededor de 50°C (Pérez Reyes, 2008); y deberá ser buen conductor del calor, pues como estará en contacto directo con las bobinas, el estator también funcionará como radiador de calor. De esta manera, el material que se seleccionó para el núcleo de ambos estatores motores fue acero cold rolled.



Figura 53. Núcleo del estator del motor a pasos

Las dimensiones del estator determinan las dimensiones de la carcasa, por lo que el diámetro del estator debe de ser ligeramente mayor que el diámetro del rotor para que éste no roce con las paredes de la carcasa. Las dimensiones de las zonas donde se enrollan las bobinas tienen el mismo ancho que los imanes utilizados en el rotor, esto se hace para concentrar los enrollamientos de los embobinados sólo en la zona donde se encontrará perpendicularmente el campo magnético de los imanes. El núcleo del estator se maquina con la ayuda de una máquina de control numérico (CNC).

Los núcleos fabricados se deben de barnizar, para evitar que hagan contacto directo con el alambre con el que se embobinará. Si el alambre y el núcleo hacen contacto, puede haber un corto circuito entre las fases, o entre las bobinas de la misma fase, lo cual puede sobre cargar a la fuente, sobre calentar el embobinado o afectar el desempeño del motor. Una vez que se barnizan los núcleos, se enrollan las cuatro bobinas de cada uno de los núcleos. El sentido en que se embobina cada una de ellas debe de ser el correcto según el principio de funcionamiento, de lo contrario el motor no producirá par. En el caso de estos motores el embobinado se hace manualmente. El número de vueltas que tiene cada una de las bobinas del mismo motor debe de ser igual, para que los pasos del motor sean uniformes. Finalmente, para evitar cualquier riesgo de corto circuito, a las bobinas se recubren con barniz; durante este paso es importante no hacer gruesa la capa de barniz pues de lo contrario ésta rozará con el rotor.

La carcasa se muestra en la figura 54. Sus medidas están determinadas por el diámetro del estator, pues debe de tener el diámetro suficiente para alojarlo fijamente. La ceja que se observa en el interior es la que determina la posición de los estatores; ésta ceja debe de estar colocada de tal manera que permita que, al colocar los dos estatores, el rotor quede en medio y pueda girar libremente sin rozar con ninguno de los estatores. Sin embargo, la distancia entre el estator y el rotor debe de ser mínima para producir el mayor par posible como lo demuestra la gráfica de la figura 55 donde se observa que el campo magnético decae conforme aumenta la distancia con respecto al imán que lo produce. Por la forma que tiene esta pieza, lo más conveniente es manufacturarla en un torno. La principal dificultad que tiene esta pieza es que para maquinarla hay que desmontarla, darle la vuelta y volverla a colocar en las mandíbulas del torno. Si no se tiene cuidado, el eje que une a los centros de los distintos maquinados puede quedar muy desalineado, lo cual provocaría que los estatores quedaran desalineados. Una vez que se tiene lista esta pieza hay que comprobar que el ajuste entre el estator y la carcasa sea correcto, ya que debido a la capa de pintura y el barniz aplicado en los embobinados habrá que hacer algún ajuste. Si este ajuste queda demasiado apretado, con el calor que se genere durante la operación, la carcasa puede resultar deformada.



Figura 54. Carcasa del motor a pasos basado en fuerza de Lorentz.

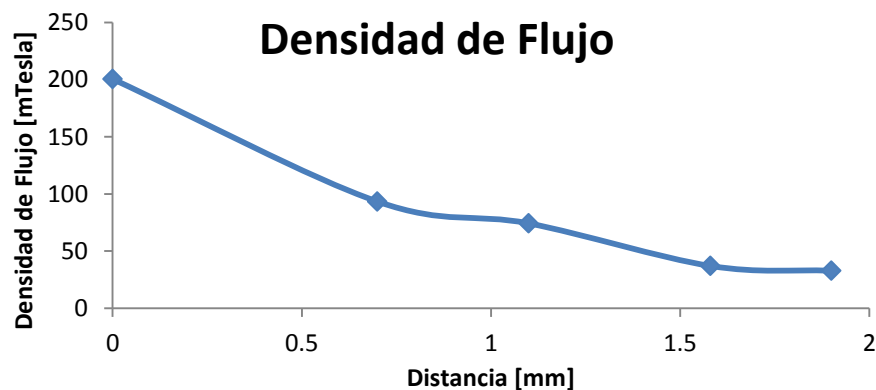


Figura 55. Densidad de Flujo vs. Distancia para un imán de 3mm de diámetro con imantación axial.

El esquema de las tapas del motor se muestra en la figura 56. Las dimensiones de esta pieza están determinadas por las dimensiones externas de la carcasa y por el diámetro de los soportes de las flechas. El diámetro interno de esta pieza debe de permitir que por ajuste ésta pieza quede fija en la carcasa. Por su forma estas piezas pueden ser fabricadas en un centro de maquinado CNC o en torno.

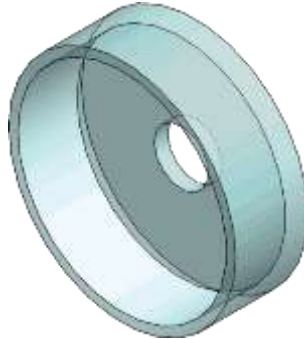


Figura 56. Tapa del motor a pasos basado en fuerza de Lorentz.

A estas piezas se les hacen 4 pequeños barrenos para pasar por allí los alambres de los embobinados para conectar las fases.

El rotor es similar al empleado en el motor de pasos de doble estator basado en intensidad de campo magnético. Como se plasmó con anterioridad, el número de pasos está directamente relacionado con el número de imanes que puedan colocarse en el rotor. Aquí se presenta un rotor con 14 imanes (ver figura 57). Para este rotor, los imanes se colocan en pares para poder aumentar así el área de interacción entre la bobina y los imanes para incrementar la fuerza de Lorentz producida. El rotor se fabrica de acrílico en una fresadora CNC y más adelante se le insertan los imanes de tierras raras, estos imanes se sujetan por ajuste, el cual no debe ser muy apretado, para evitar que el rotor se quiebre. Los imanes deben de estar alternados en polaridad para que el motor funcione correctamente.

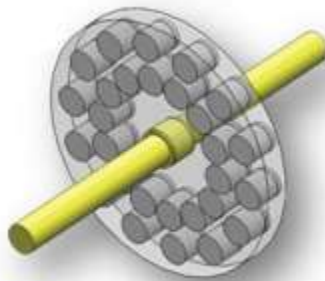


Figura 57. Rotor del motor de pasos basado en fuerza de Lorentz.

Las dimensiones de la flecha del rotor están determinadas por la longitud del motor que se diseñará, en este caso el par producido por el motor es independiente de la longitud total del motor, por lo que la longitud del motor se procuró que fuera sólo la necesaria. La manufactura de la flecha del rotor se realiza en un torno, es importante cuidar sus dimensiones, pues debe de entrar con buen ajuste en los rodamientos que lo soportan, así como en el centro del rotor.

Finalmente se fabrica el PCB externo donde se soldarán los alambres de las bobinas para configurar las fases del motor. Para esta manufactura se emplean procesa para la generación de circuitos impresos. En la figura 58 se muestra una imagen del PCB externo.



Figura 58. PCB externo del motor a pasos.

5 Ensamble de los motores de pasos

5.1 Motor de doble estator basado en intensidad de campo magnético

Antes de llevar a cabo el ensamble de este motor se tienen que verificar dos aspectos importantes. Por un lado se debe verificar la continuidad eléctrica de las bobinas, pues de no cerciorarse de que el alambre magneto no sufrió algún daño mientras éste se arrollaba, se corre el riesgo de perder por completo una de las fases del motor, lo que daría por consecuencia que el rotor no girara. Por otro lado, se tiene que verificar que las ocho bobinas tengan aproximadamente el mismo valor de resistencia óhmica: Si el circuito eléctrico de ambos estatores del motor se encuentra desbalanceado, por ende lo estarán el circuito magnético y, lo más importante, el par producido por el motor.

Por el momento, es conveniente distinguir un estator del otro, para ello se nombrarán “Estator A” y “Estator B” respectivamente. El ensamblaje de ambos es el mismo, la diferencia únicamente consiste en que los rodamiento de uno está puesto en la placa de material conductor (“Estator A”), y el otro está puesto en la placa de material no conductor (“Estator B”), ver figura 59.

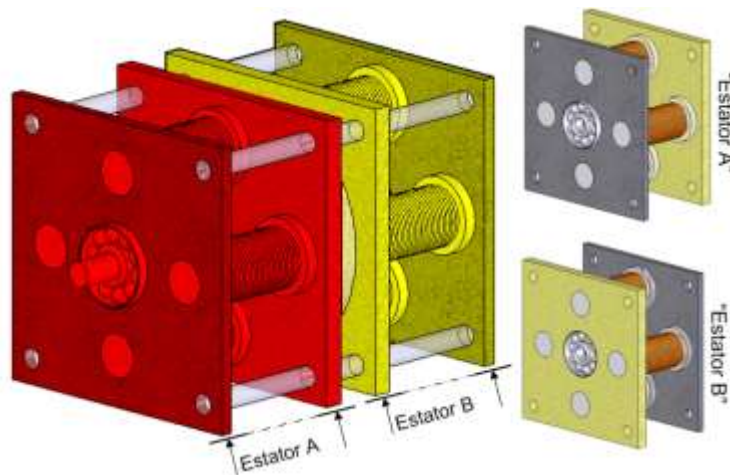


Figura 59. Estantores del motor basado en intensidad de campo magnético.

Teniendo en cuenta estas precauciones y consideraciones, se puede seguir con el ensamblaje del motor. Al igual que en la sección anterior se hará un listado de los pasos a seguir en este proceso:

Para ensamblar el “Estator A”, se inserta el rodamiento en el barreno central de la placa de acero, este queda sujeto a presión, no se pega. Para evitar un mal acople mecánico de la flecha, debe procurarse que si el cuerpo del rodamiento es más grueso que la placa, se deje éste al ras de la cara de la placa, ver figura 60.



Figura 60. Colocación del rodamiento sobre la placa lateral del estator.

Tomando como base la placa de fenólica se insertan los núcleos con sus respectivas bobinas. Y sobre éstas últimas se coloca la placa de acero. Al colocar las bobinas los inicios y fines de los arrollamientos para que posteriormente se simplifique las conexiones para generar las fases, ver figura 61.

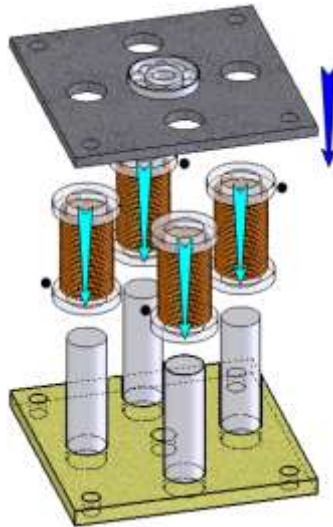


Figura 61. Armado del estator "A".

Teniendo ya el estator armado, se pegan los núcleos a ambas placas del estator con ciancrlato, ver figura 62.

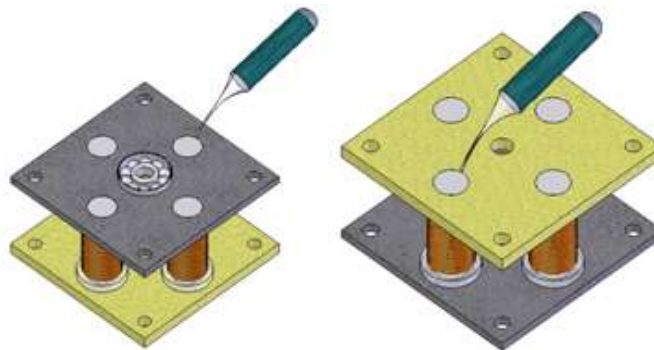


Figura 62. Pegado de los estator "A".

Para ensamblar el Estator "B" se repite el proceso anterior.

Como siguiente paso se inserta la parte más corta de flecha que soporta al rotor en el balero del Estator "B". Se debe procurar que el entrehierro sea pequeño, sin que ello quiera decir que el disco del rotor y la placa estator tengan contacto físico, ver figura 63.

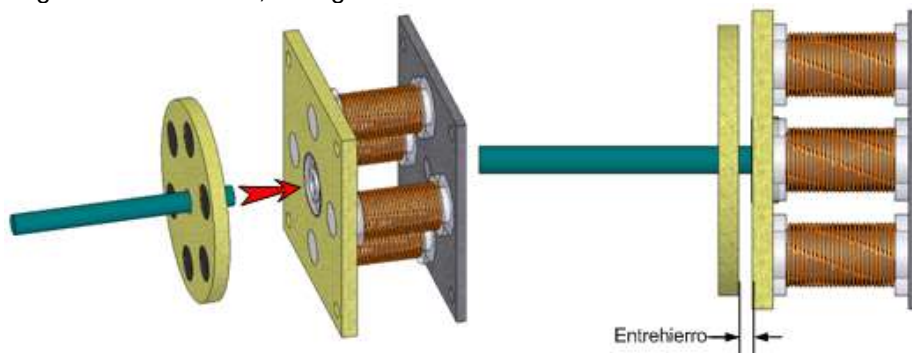


Figura 63. Ensamble del rotor en el estator "B".

Posteriormente, se coloca el Estator "A" procurando que el espacio de entrehierro sea el mismo que en el ensamble anterior, ver figura 64.

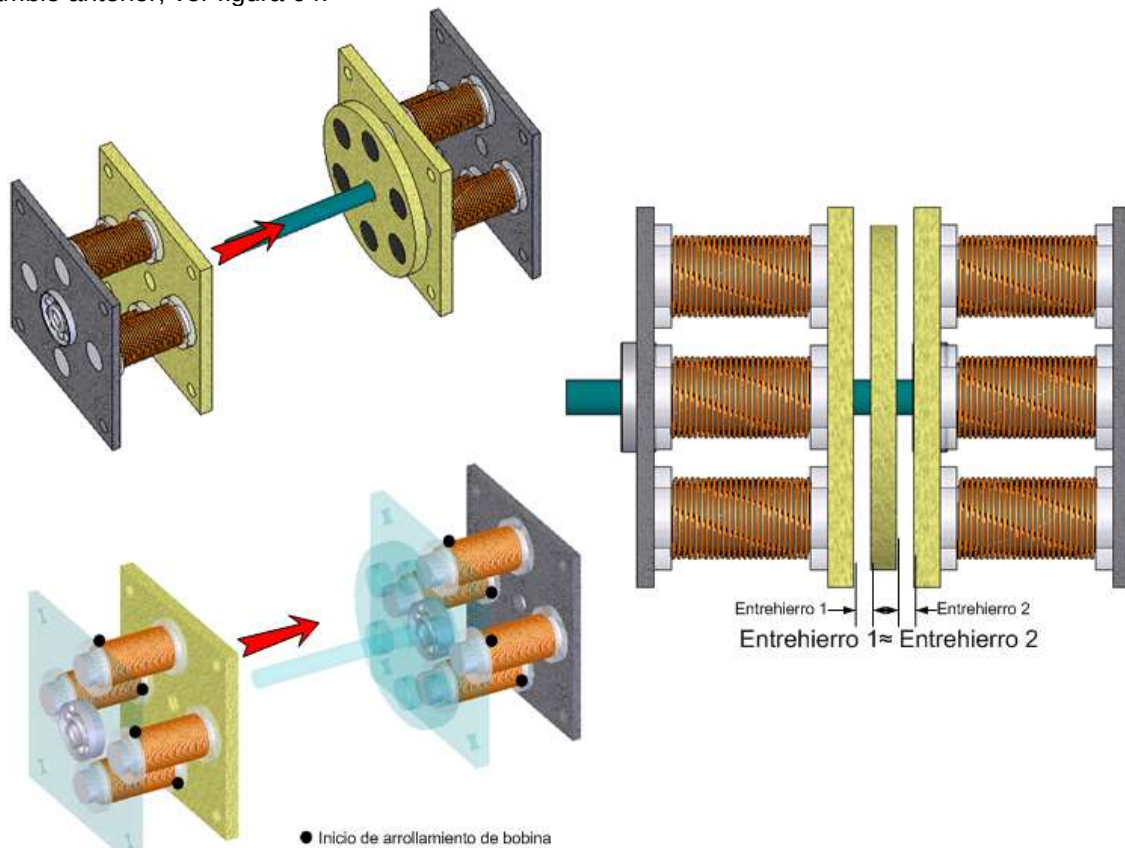


Figura 64. Ensamble del estator "A" en el motor.

Como paso siguiente, se introducen las guías del motor a los barrenos de las esquinas de la placas y se pegan a cada una de éstas con cianocrilato, ver figura 65.

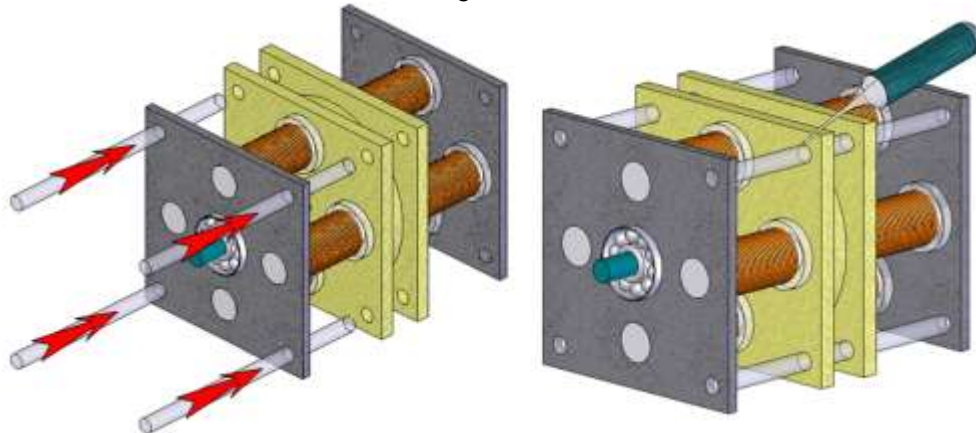


Figura 65. Ensamble de las guías en el motor.

Finalmente, se lleva a cabo la conexión de los alambres de las bobinas entre estatores cuidando que la secuencia de generación de polos magnéticos en los núcleos de las bobinas sea la adecuada.

5.2 Motor basado en el principio de Fuerza de Lorentz

El ensamble de este motor se realiza tomando como pieza central al rotor. Hay que cuidar que las bobinas de las mismas fases del estator queden bien alineadas con las bobinas del otro estator, de lo contrario el motor nos entregará menor par del que se espera o incluso puede no funcionar.

Durante la operación de este motor se producirán vibraciones que podrían cambiar la orientación del estator y desalinearlo respecto al otro. Para evitar esto, el estator se pega a la pared de la carcasa con cianocrilato.

Una vez que se armaron la carcasa, con el rotor y con los estatores en su lugar. Se deben de ajustar los soportes, disminuyendo poco a poco su longitud, hasta que se tenga un motor que tenga un poco de juego, pero que no permitan que el rotor choque con los embobinados al girar. Si el motor se deja sin juego la fricción entre el rotor y los soportes será muy alta resultando en una reducción importante en la eficiencia, ver figura 66.

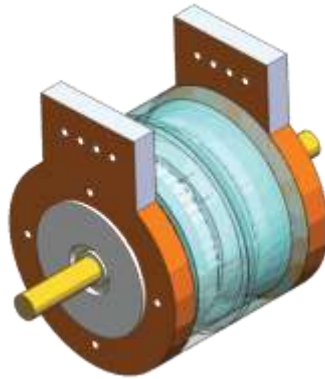


Figura 66: Ensamble general de los motores a pasos.

Una vez que se ajustan los soportes, se montan las tapas y éstas se colocan en la carcasa. Finalmente se coloca el PCB en su lugar para después se soldar los cables de las bobinas de acuerdo a la secuencia mostrada en la figura 67. Las conexiones entre los dos estatores se hacen mediante un cable externo, que lleva la corriente entre los embobinados de las fases iguales.

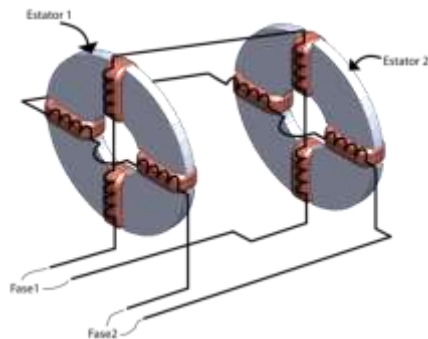


Figura 67. Esquema de las conexiones de los motores a pasos.

6 Motores de pasos fabricados

Para demostrar el funcionamiento de los motores de pasos mostrados en el punto anterior, se desarrollaron tres motores de pasos de cada tipo. Para el caso de los motores de pasos de doble estator basados en el principio de campos magnéticos, las dimensiones de los motores fabricados fueron 25x25x43mm, 20x20x41mm y 9x9x11 mm, mientras que para los motores basados en fuerza de Lorentz fueron 25x ϕ 32mm, 21x ϕ 25mm y 10x ϕ 11mm. En la Figura 68 y 69 se muestra las imágenes de los motores desarrollados. Mientras que en la tabla 3 y tabla 4 se muestran las características de dichos motores.



(a)



(b)

Figura 68. Motores de pasos de imán permanente de doble estator. (a) El motor de 25x25x43mm comparado con el de 20x20x41mm; (b) El motor de 25x25x43mm comparado con el de 9x9x11mm



Figura 69. Motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.

	Motor de 9x9[mm]	Motor de 20x20[mm]	Motor de 25x25[mm]	Unidades
Diámetro del Rotor	7	16	20	[mm]
Dimensiones frontales	9x9	20x20	25x25	[mm]
Largo del Motor	11	41	43	[mm]
Pasos por revolución	12	20	28	[pasos/rev]
Angulo por paso	30°	18°	12.86°	[°]
Inductancia	1.8	3	19	[mH]
Resistencia por fase	30	12	30	[Ω]
Calibre del embobinado	41	30	34	(AWG)

Tabla 3. Características de los motores de pasos basados en intensidad de campo magnético.

	Motor $\phi 11$ [mm]	Motor de $\phi 25$ [mm]	Motor de $\phi 31$ [mm]	Unidades
Diámetro del Rotor	6.4	20	25	[mm]
Diámetro Externo	10	25	31	[mm]
Largo del Motor	11	24	24	[mm]
Pasos por revolución	12	12	28	[pasos/rev]
Angulo por paso	30°	30°	12.86°	[°]
Inductancia	1.2	3.3	9	[mH]
Resistencia por fase	1.5	12	24	[Ω]
Calibre del embobinado	35	35	34	(AWG)

Tabla 4. Características de los motores de pasos basados fuerza de Lorentz.

7 Caracterización de los motores a pasos

Como parte de la caracterización de los motores se consideraron tres medidas de par: par de retención (Holding torque), par de pull-in y par de pull-out.

7.1 Pruebas de par de retención

El par de retención (holding torque) es el par máximo que puede entregar el motor con una de sus fases encendidas. Por lo tanto, lo que se tiene que medir en esta prueba es el par máximo que se le puede aplicar al motor sin que el rotor se desvíe de su posición de equilibrio cuando una de sus fases se encuentra energizada.

Para llevar a cabo esta prueba, se construyó una polea con diámetro conocido; a dicha polea se enredo un hilo y en el otro extremo del se colocó una masa conocida. Para realizar la prueba se enreda el hilo en la polea y después se energiza una de las fases del motor. Una vez que se tiene una de las fases del motor energizada (con la corriente a la que se tomará la lectura), se agrega peso en el recipiente hasta que el rotor pierda su posición de equilibrio, la polea empieza a girar. De esta manera, conociendo la masa total que esta colgando de la polea en ese momento, se puede obtener el par de retención. En la figura 70 se muestra un diagrama de cómo se realizó esta prueba.

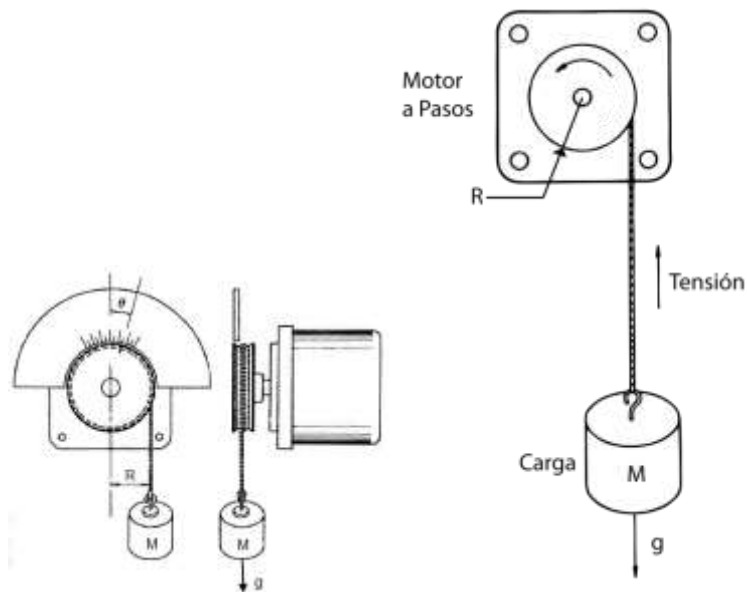


Figura 70. Diagrama de la prueba para obtener el par de retención (Kenjo y Sugawara 1994).

El valor del par de retención se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$\tau_{\text{retención}} = M g R \quad (5)$$

Donde M es la masa, g la gravedad y R el radio de la polea.

Para establecer la corriente nominal, se realizaron pruebas de par de retención a diferentes intensidades de corriente. En la figuras 71 y 72 se muestran las gráficas correspondientes al par de retención de cada uno de los motores fabricados.

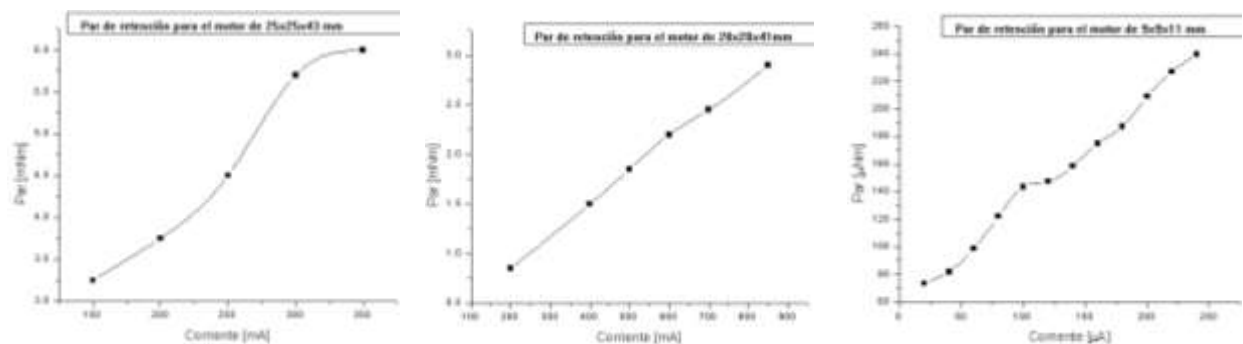


Figura 71. Par de retención de los motores de pasos de imán permanente de doble estator.

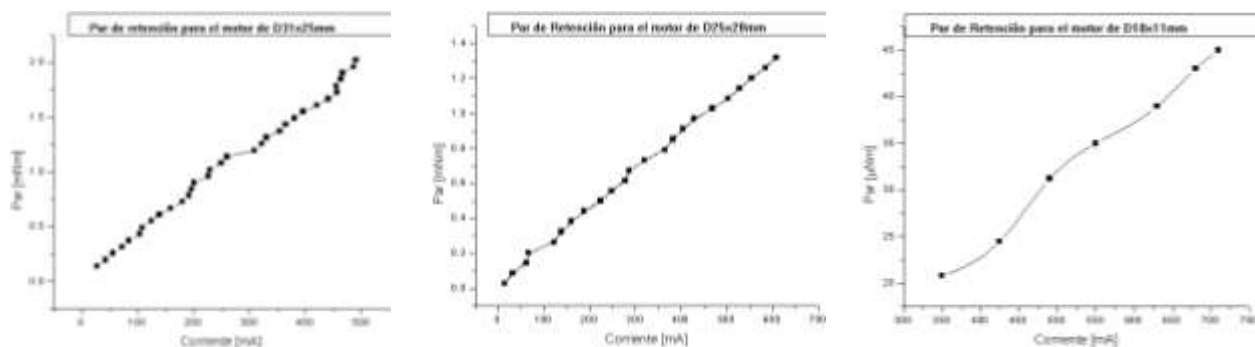


Figura 72. Par de retención de los motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.

7.2 Pruebas para el par de pull-in

El par de pull-in representa las características de arranque de un motor de pasos. Este par está dado por una gráfica del rango de par de carga de fricción en el cual el motor puede arrancar y detenerse sin perder sincronía para varias frecuencias. En otras palabras, es la máxima carga con la que el motor se puede sincronizar a determinada frecuencia. Para realizar esta prueba se utilizó un método similar al utilizado para el par de retención. En este caso primero se coloca una carga, y se enciende el motor, pero la señal de reloj apagada, por lo que el motor estará sosteniendo dicha carga. Una vez que la carga esté colocada, el generador de señales se coloca en la frecuencia a la que se hará la lectura, y se enciende. Si el motor puede levantar esta carga, el par pull-in es mayor que la carga que se le colocó. De esta manera se va colocando más carga, hasta que se llega al punto en que el motor ya no puede sincronizarse, en este punto se tiene el par de pull-in (ver figura 73).

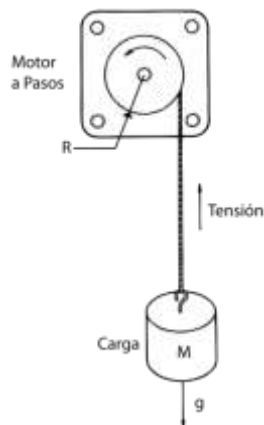


Figura 73. Diagrama de la prueba para obtener el par de pull-in (Kenjo y Sugawara 1994).

Al igual que en la prueba de par de retención, el par de pull-in se obtiene con la ecuación:

$$\tau_{pull-in} = M g r \quad (6)$$

En esta prueba se debe de tener cuidado de que el rotor no se encuentre en movimiento cuando se le aplique la carga, de lo contrario el rotor ya tendrá una inercia al momento de aplicar la carga y por lo tanto la lectura no será válida.

La prueba descrita anteriormente se aplicó a tres de los seis motores de paso de mayores dimensiones. En la figura 74 y 75 se muestran las gráficas de esta caracterización.

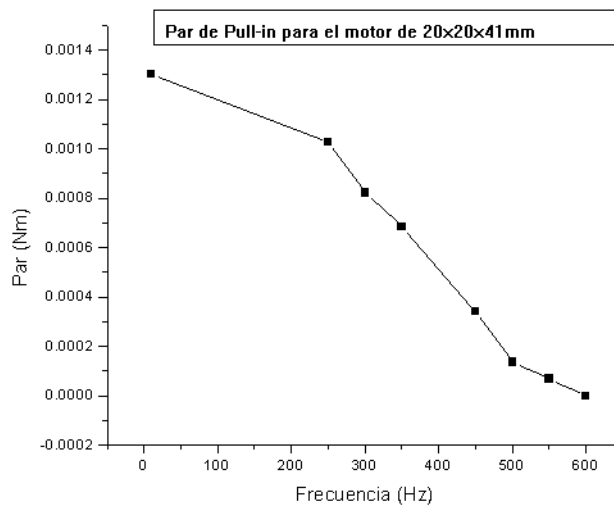


Figura 74. Par de pull-in del motor de pasos de imán permanente de doble estator de 20x20x41mm.

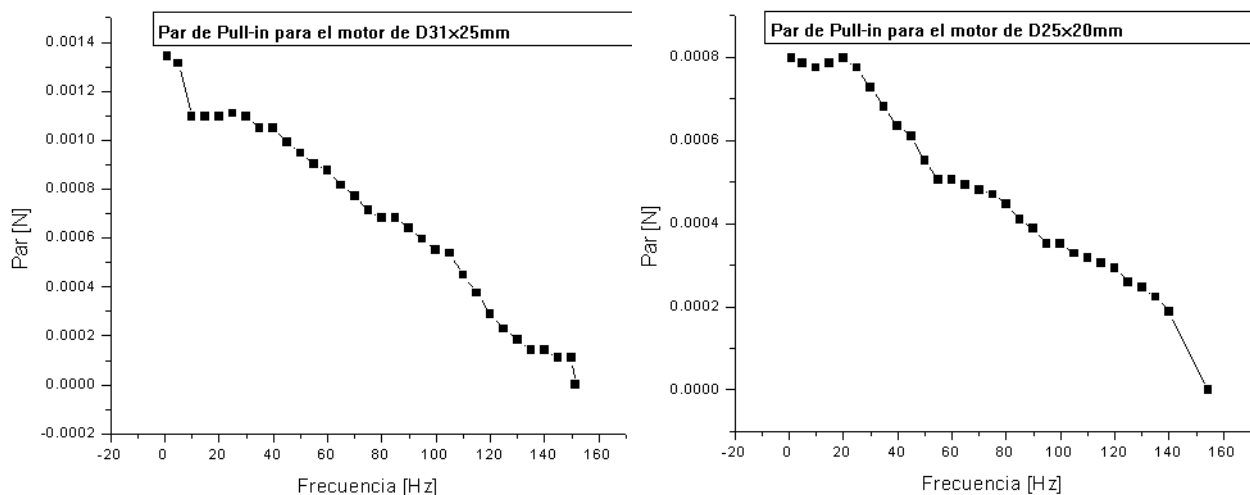


Figura 75. Par de pull-in de los motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.

La información en las gráficas de las figuras 74 y 75 ayudan a determinar dos puntos importantes: la frecuencia máxima de sincronización y el par máximo de sincronización. La frecuencia máxima de sincronización determina la frecuencia a la que el motor ya no puede sincronizarse incluso sin carga. Más

importante que el punto anterior, es el par máximo de sincronización, porque este par determina la carga máxima con que podrá operar el motor en cualquier momento, pues si la carga es mayor a éste valor, el motor ni siquiera podrá girar un paso aun con curvas de aceleración y, por lo tanto, mucho menos podrá girar a altas velocidades; este punto se encuentra como la primera lectura de par de pull-in en cada una de las gráficas.

7.3 Pruebas del par de pull-out

El par de pull-out se determina mediante un arreglo como el que se muestra en la figura 76. En este arreglo se coloca una masa conocida (M), de tal manera que tensione la cuerda que está sujeta de un dinamómetro, esta cuerda se enreda a su vez en la polea. De ésta manera, al arrancar el motor, se genera un par de fricción en la polea; dicho par se puede medir en el dinamómetro obteniendo la diferencia entre el peso de masa y la lectura en el dinamómetro (entendiendo el peso como la fuerza con que la tierra atrae a la masa M). Mediante este arreglo, a diferencia del utilizado en la prueba de par de retención, se puede medir el par que el motor está produciendo mientras está girando. En este arreglo, si se aumenta la masa M , el rotor se somete a un mayor par de fricción; y es así como se va variando la carga en el motor a pasos hasta que se encuentra el valor del par de pull-out.

Para obtener una lectura mediante este método, primero se lleva el motor a las revoluciones en las que se tomará la lectura, una vez que se tenga la velocidad determinada, se comienza a aumentar la masa tomando lectura del par de fricción cada vez hasta que, finalmente, el par de pull-out mide como la última lectura del par de fricción que se tome antes de que el motor pierda sincronía.

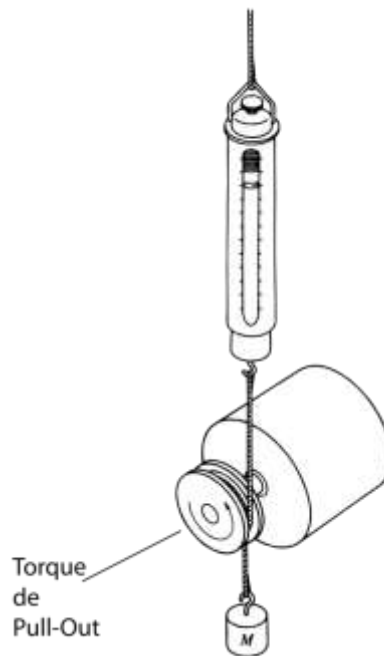


Figura 76: Esquema de la prueba de pull-out (Kenjo & Sugawara, 1994).

La prueba descrita anteriormente se aplicó tres de los seis motores da pasos. En la figura 77 y 78 se muestran las gráficas de esta caracterización.

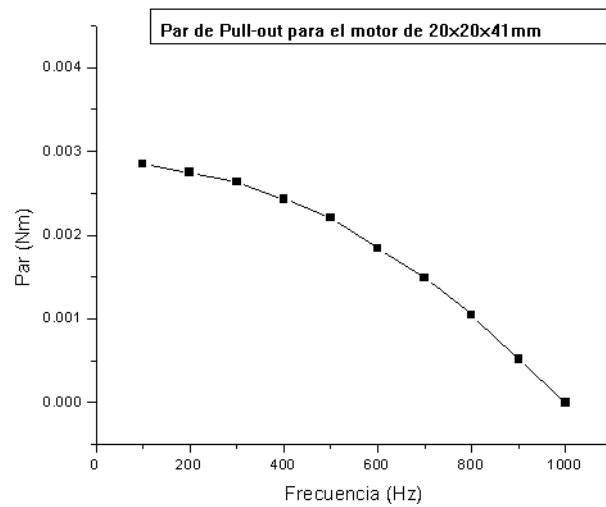


Figura 77. Par de pull-out del motor de pasos de imán permanente de doble estator de 20x20x41mm.

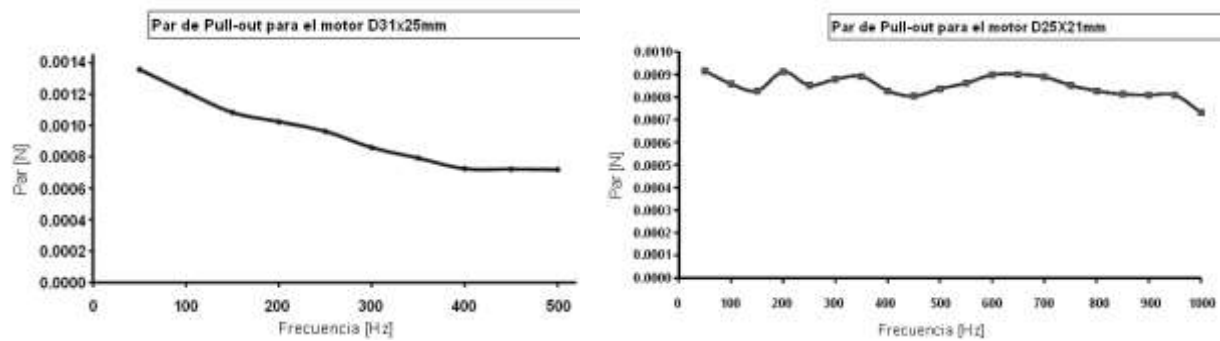


Figura 78. Par de pull-in de los motores de pasos basados en el principio de fuerza de Lorentz.

Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño, fabricación y evaluación de motores de pasos de dimensiones pequeñas basados en dos principios de operación: uno basado en la configuración de doble estator y campo electromagnético; y el otro basado en la configuración de doble estator y fuerza de Lorentz.

Se diseñaron y fabricaron tres motores de cada tipo con dimensiones de: 25x25x43mm, 20x20x41mm y 9x9x11 mm para la configuración de doble estator y campo electromagnético; mientras que para los motores basados en fuerza de Lorentz fueron de 25x ϕ 32mm, 21x ϕ 25mm y 10x ϕ 11mm. Durante el diseño de los motores se buscó emplear métodos de manufactura y materiales que hagan más eficiente su comportamiento y que faciliten su ensamble.

Para llevar a cabo la evaluación de los motores se desarrollaron algunos protocolos de prueba dentro de los que se incluyeron la medición de par de retención (holding torque), par de pull-in y par de pull-out.

Los resultados demostraron que los motores de pasos con configuración de doble estator y campo electromagnético proporcionan un mayor par a la salida. Se caracterizó en su totalidad el motor de paso de doble estator de 20x20x40mm, el cual tiene como características un torque de retención máximo de 2.9 mNm y un consumo de 850mA. Asimismo, se obtuvieron sus curvas de pull-in y de pull-out. La velocidad máxima de operación para el torque de pull-in fue de 825 rpm con un torque de 0.068 mNm y para el caso de torque de pull-out fue de 1350 rpm con un par de 0.52 mNm.

Para el caso de los motores de doble estator basados en el principio de fuerza de Lorentz, se caracterizaron, para los tres tipos de par, los motores con dimensiones de 25x ϕ 32mm y 21x ϕ 25mm. El motor de 25x ϕ 32mm tiene como características un par de retención de 2.28 mNm, un consumo de 600 mA y 26 pasos por revolución. Asimismo, se obtuvieron sus curvas de pull-in y de pull-out. La velocidad máxima de operación para el torque de pull-in fue 359 rpm con un torque de 0.1 mNm y para el caso de torque de pull-out fue de 1153 rpm con un par de 0.4 mNm. Para el caso del motor de 21x ϕ 25mm, tiene como características un par de retención de 1.138 mNm, un consumo de 600 mA y 12 pasos por revolución. Asimismo, se obtuvieron sus curvas de pull-in y de pull-out. La velocidad máxima de operación para el torque de pull-in fue 700 rpm con un torque de 0.4 mNm y para el caso de torque de pull-out fue de 5000 rpm con un par de 0.7 mNm.

En el caso de los motores a pasos basados en fuerza de Lorentz se modelaron considerando la ecuación que rige el principio y se obtuvieron curvas características de par de retención con 7% de diferencia con respecto a los valores experimentales. Por lo anterior, se puede considerar como aproximación para el diseño dicho modelo matemático.

Los resultados de las pruebas realizadas a los motores revelaron que los motores de pasos de fuerza de Lorentz tienen algunas diferencias con respecto a los motores de pasos basados en campo electromagnético. Una de las diferencias que se encontró es que los motores desarrollados en este trabajo presentan bajas frecuencias de sincronización, de alrededor de 150[Hz]. Otra diferencia que presentaron los motores de pasos de este tipo es que la caída del par conforme aumenta la frecuencia de operación es menor que en otro tipo de motores de pasos. Esto los hace candidatos para aplicaciones donde se requiere que el nivel de par se mantenga conforme se aumenta la velocidad.

Referencias

- Arefeen, Mohamed S., y Jim D. Childrens. (2007) Method of Stall Detection for Stepper Motor System. **Estados Unidos, Patente US 7224140B2**.
- Arias Maya, Luz Stella, y Libardo Vegas Useche. (2004) Materiales Compuestos Inteligentes. **Scientia et Technica**, 10(25), p. 143-148.
- Bakhuizen, A. J. C.(1976) Considerations on improving the ratio of torque to inertia. **Proceedings of the International Conference on Stepping Motors and Systems, Julio 13-15, University of Leeds**. University of Leeds.
- Beaty, H. Wayne, y James L. Kirtley. (2000) **Manual del Motor Eléctrico**. 1ra. ed. México, McGraw-Hill.
- Bleuler, H., R. Clavel, J.-M. Breguet, H. Langen, y E. Pernette. (2000) Issues in precision motion control and microhandling. **IEEE International Conference on Robotics and Automation, Abril 24-28, San Francisco**. IEEE, p. 959 – 964.
- Brand, U, T Kleine-Besten, y H Schwenke. (2000) Development of a special CMM for dimensional metrology on microsystem components. **ASPE 15th Annual Meeting, octubre 22-27, Scottsdale, Arizona**. ASPE. p. 542-546.
- Byrne, J. V., y Lacy J. C. (1976) Characteristics of saturated stepper and reluctance motors. **IEE Conference Publications**, nº 136, p. 93-96.
- Caballero Ruiz, Alberto, Leopoldo Ruiz Huerta, y Héctor Silva López. (2010) **Desarrollo de un sistema de control para una micromáquina herramienta basado en código estándar para CNC**. Informe Técnico CCADET.
- Condit, Reston, y Dr. Douglas W. Jones. (2004) **Stepping Motors Fundamentals**. Application Note, Microchip Technology Inc.
- Driesen, W, T Varidel, S Regnier, y J Breguet. (2004) Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots. **4th International Workshop on Microfactories, octubre 15-17, Shanghai**. IWFMF. p. 17- 22.
- Ed.Larousse. (1996) **Enciclopedia Metódica**. Colombia. Larousse.
- Gad-el-Hak, Mohamed. (2001) **The MEMS Handbook**. CRC Press.
- Gieras, Jacek F., y Mitchel Wing. (1997) **Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications**. New York: Marcel Dekker.
- Harris, M. R., V. Andjargholi, P. J. Lawrenson, A. Hughes, y B. Ertan. (1977) Unifying approach to the static torque of stepping motor structures. **IEE Proceedings**, no 124, p.1215-1224.
- Ishikawa, Y., y T. Kitahara. (1997) Present and future of micromechatronics. **International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Japón**, IEEE, p. 13-20.
- Ito, S, D Iijima, A Hayashi, H Aoyama, y M Yamanaka. (20002) Micro turning system: a super small CNC precision lathe for microfactories. **ASPE 16th Annual Meeting, noviembre 10-15, Virginia**, ASPE, p. 295-298.
- Kenjo, Takashi, y Akira Sugawara. (1994) **Stepping Motors & their Microprocessor Controls**. Inglaterra. Oxford Science Publications.
- Kiebertz, R. B. (1964) The step motor: The next advance in control systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 9(1), p. 98-104.
- Kuo, Ping-Hung. (2006) Stepper Motor Accelerating System and Method. **Estados Unidos, Patente US 7116074**
- Kussul, E, D Rachkovski, T Baidyk, y S Talayev. (1996) Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment. **Journal of Micromechanics and Microengineering**. 6(4), p. 410-425.

Kussul, E, T Baidyk, L Ruiz-Huerta, A Caballero-Ruiz, G Velasco, y L Kasatkina. (2002) Development of Micromachine Tool Prototypes for Microfactories. **Journal of Micromechanics and Microengineering**. 12(6), p. 795-813.

Life Optics, GmBh. (2012) **leica-microsystems** [Internet]. Disponible desde: <<http://www.leica-microsystems.com/products/surgical-microscopes/headmounted-microscope/product/leica-hm500/>> [Acceso 12 de marzo de 2012].

McClelland, W. (1927) The Application of electricity in warships. **JIEE**. 65, p. 829-71.

Mraz, Stephen J. (2012) Machine Design. **Getting to know stepper motors** [internet]. Disponible desde: <<http://machinedesign.com/article/getting-to-know-stepper-motors-0505>> [Acceso 2 de febrero de 2012].

Ogata, Katsuhiko.(2003) **Ingeniería de Control Moderna**. Madrid, España: Pearson Educación.

Okazaki, Y, y T Kitahara. (2000) Micro-Lathe Equipped with Closed-Loop Numerical Control. **Proceedings of the 2-nd International Workshop on Microfactories, octubre 9-10, Switzerland**. FSRM,. p. 87- 90.

Oppenheim, Alan V., y Alan S. Willsky. (1997) **Señales y Sistemas**. Ciudad de México. Pearson Educación.

Pérez Reyes, Oscar. (2008) **Desarrollo de Motores a Pasos para la Automatización de Máquinas Herramientas**. Tesis de licenciatura, UNAM.

Tanaka, M. (2001) Development of desktop machining microfactory. **RIKEN REVIEW**. 34, p. 46-49.

Thomas, A. G., y F. J. Fleischauer. (1957) The power of stepping motor: A new digital Actuator. **Control Engineering**. 4, p. 74-81.

Trimmer, W. S. (1996) **Micromechanics and MEMS, Classic and Seminal Papers to 1990**. IEEE.

Uchino, K., y J. R. (2003) **Giniewicz. Micromechatronics**. Nueva York: Marcel Dekker, Inc.

Yu-Chong, Tai. (2000) MEMS Manufacturing at The Caltech Micromachining **Lab M4 Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing** [internet]. Disponible desde: <<http://www.mech.northwestern.edu/MFG/AML/M4/M4-Files/Tai/index.htm>> [Acceso 2 de septiembre de 2005] .