



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**T E S I S**

**“ANÁLISIS DE MOTORES A PASOS DE  
FUERZA DE LORENTZ”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**PRESENTA  
ELY EDGARDO TEJEDA NÚÑEZ**

**DIRECTORES:  
DR. ALBERTO CABALLERO RUÍZ  
DR. LEOPOLDO RUÍZ HUERTA**



CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO, 2010

## AGRADECIMIENTOS

---

Al llegar a la culminación a esta etapa, no me queda más que agradecer a mis padres (todos ellos) por todo el amor y soporte que con esfuerzo y sacrificio me han dado a lo largo de mi vida; sin su guía y experiencia no habría llegado hasta aquí.

De igual manera agradezco a mis abuelos: Concha, Armando, Ramona y Ely por todo su cariño, apoyo y por todos los consejos que me han dado. En especial, le agradezco a mi abuelo Armando, por haber cumplido su promesa de estar saludable y presente para estas fechas y por ser, además, la persona que me inspiró a estudiar ingeniería.

Le doy las gracias a mis amigos: Alejandro Gallo, Gustavo Valencia, Gerardo Palacios y Claudia Romero; por haber sido un soporte para mí durante estos años de estudio y por haber hecho de la universidad una época llena de recuerdos gratos.

Agradezco también, a mis tutores el Dr. Alberto Caballero Ruiz y el Dr. Leopoldo Ruíz Huerta, así como a los compañeros del GMM por sus enseñanzas y apoyo recibidos durante mi estancia en el grupo.

Finalmente, agradezco a mi universidad, a mi país y a todos los excelentes maestros que me formaron como ingeniero.

El siguiente trabajo fue realizado en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM dentro del Grupo de Mecatrónica y Micromecánica bajo la dirección del Dr. Alberto Caballero Ruiz y del Dr. Leopoldo Ruíz Huerta, con el apoyo de los proyectos PAPIME-PE105909 y CONACYT 60895.

# Tabla de contenido

---

<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1: Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
1.1.    Motores Eléctricos .....	4
1.1.1.    Motores a pasos .....	9
1.1.1.1. Historia .....	9
1.1.1.2. Definición.....	10
1.1.1.3. Clasificación .....	12
1.1.1.4. Motores a pasos en la actualidad .....	20
<b>2. Capítulo 2: Objetivos, Metodología y Alcances</b> .....	<b>27</b>
<b>3. Capítulo 3: Marco Teórico</b> .....	<b>31</b>
3.1.    Fuerza de Lorentz .....	31
3.2.    Parámetros de desempeño de los Motores a Pasos.....	33
3.2.1.    Características Estáticas .....	33
3.2.2.    Características Dinámicas .....	36
<b>4. Capítulo 4: Desarrollo</b> .....	<b>43</b>
4.1.    Principio de Funcionamiento de los Motores .....	43
4.2.    Manufactura de los Motores .....	52
4.3.    Control de los Motores.....	64
4.4.    Caracterización de los Motores a Pasos.....	68
4.4.1.    Medición de la caída del campo magnético .....	68
4.4.2.    Pruebas de par de <i>holding</i> .....	69
4.4.3.    Pruebas de par de <i>pull-in</i> .....	78

4.4.4.	Pruebas de par de <i>pull-out</i> .....	81
<b>5.</b>	<b>Capítulo 5: Análisis de Resultados</b> .....	<b>85</b>
5.1.	Gráficas Características .....	85
5.2.	Análisis del par de <i>holding</i> .....	87
5.3.	Análisis del par de <i>pull-in</i> .....	89
5.4.	Análisis del par de <i>pull-out</i> .....	92
5.5.	Comparación con motores comerciales .....	95
	<b>Conclusiones</b> .....	<b>101</b>
	<b>Trabajo a Futuro</b> .....	<b>103</b>
	<b>Referencias</b> .....	<b>105</b>

# Tabla de Figuras

---

<b>Figura 1.1</b> : Líneas del campo magnético provocando el par de reluctancia .....	<b>13</b>
<b>Figura 1.2</b> : Circuito magnético en un motor a pasos de reluctancia .....	<b>13</b>
<b>Figura 1.3</b> : Generación de un paso en un motor a pasos de reluctancia.....	<b>14</b>
<b>Figura 1.4</b> : Embobinados en un motor de reluctancia.....	<b>15</b>
<b>Figura 1.5</b> : Embobinados en un motor a pasos de imán permanente.....	<b>16</b>
<b>Figura 1.6</b> : Generación de los pasos en un motor de imán permanente.....	<b>16</b>
<b>Figura 1.7</b> : Circuito magnético en un motor de pasos híbrido .....	<b>17</b>
<b>Figura 1.8</b> : Diagrama de la configuración de un motor de pasos híbrido .....	<b>18</b>
<b>Figura 1.9</b> :Generación de pasos en un motor híbrido.....	<b>19</b>
<b>Figura 1.10</b> : Fotografía de un motor a pasos microscópico.....	<b>22</b>
<b>Figura 1.11</b> : Lentes para microcirugía que utilizan motores a pasos .....	<b>23</b>
<b>Figura 1.12</b> : Bomba peristáltica activada por un motor a pasos .....	<b>24</b>
<b>Figura 1.13</b> : Pipeta de alta precisión activada por un motor a pasos.....	<b>24</b>

<b>Figura 1.14:</b> Microdrive desarrollado en el GMM .....	<b>25</b>
<b>Figura 1.15:</b> Utilización del Microdrive en ratas del laboratorio .....	<b>26</b>
<b>Figura 2.1:</b> Centro de micro-maquinado desarrollado en el GMM.....	<b>28</b>
<b>Figura 3.1 :</b> Representación vectorial de la fuerza de Lorentz .....	<b>31</b>
<b>Figura 3.2 :</b> Gráfica de Par vs. Posición estática .....	<b>34</b>
<b>Figura 3.3 :</b> Gráficas de par de <i>holding</i> típico .....	<b>36</b>
<b>Figura 3.4 :</b> Gráfica de par de <i>pull-in</i> típica .....	<b>38</b>
<b>Figura 3.5 :</b> Gráfica de par de <i>pull-out</i> típica.....	<b>39</b>
<b>Figura 3.6 :</b> Gráfica característica típica de un motor a pasos .....	<b>41</b>
<b>Figura4.1:</b> Explosivo del motor a pasos de fuerza de Lorentz .....	<b>43</b>
<b>Figura 4.2 :</b> Rotor de un motor a pasos de de fuerza de Lorentz .....	<b>45</b>
<b>Figura 4.3:</b> Estator de un motor a pasos de fuerza de Lorentz .....	<b>45</b>
<b>Figura 4.4:</b> Posición del rotor respecto al estator.....	<b>46</b>
<b>Figura 4.5 :</b> Producción de la fuerza de Lorentz en el motor .....	<b>46</b>
<b>Figura 4.6 :</b> Colocación de los imanes en el rotor .....	<b>47</b>
<b>Figura 4.7 :</b> Generación de pasos etapa 1 .....	<b>48</b>
<b>Figura 4.8 :</b> Generación de pasos etapa 2.....	<b>49</b>
<b>Figura 4.9 :</b> Generación de pasos etapa 3.....	<b>49</b>
<b>Figura 4.10 :</b> Generación de pasos etapa 4.....	<b>50</b>

<b>Figura 4.11:</b> Explosivo de uno de los motores a pasos construidos para este trabajo .....	52
<b>Figura 4.12:</b> Núcleo del estator del motor a pasos.....	53
<b>Figura 4.13 :</b> Carcasa del motor a pasos.....	55
<b>Figura 4.14 :</b> Tapa del motor a pasos .....	56
<b>Figura 4.15 :</b> Rotores manufacturados para los motores de este trabajo .....	58
<b>Figura 4.16 :</b> Circuito externo del motor a pasos .....	60
<b>Figura 4.17 :</b> Ensamble general de los motores a pasos .....	61
<b>Figura 4.18 :</b> Esquema de las conexiones de los motores a pasos .....	62
<b>Figura 4.19 :</b> Fotografía de los motores a pasos construidos para este trabajo.....	64
<b>Figura 4.20 :</b> Secuencia de excitación de las fases de los motores a pasos .....	65
<b>Figura 4.21 :</b> Diagrama de bloques del control de los motores a pasos .....	66
<b>Figura 4.22 :</b> Densidad de flujo vs Distancia.....	69
<b>Figura 4.23 :</b> Diagrama de la prueba de <i>holding</i> torque .....	70
<b>Figura 4.24 :</b> Gráfica de par de <i> Holding</i> vs Corriente, para uno y dos estatores .....	74
<b>Figura 4.25 :</b> Gráfica de Par de <i> Holding</i> vs Corriente – motor de 20mm .....	75
<b>Figura 4.26 :</b> Grafica de Par de <i> Holding</i> vs Corriente – motor de 25mm .....	76
<b>Figura 4.27 :</b> Gráfica de Par vs. Posición Estática – motor de 20mm .....	77

<b>Figura 4.28:</b> Gráfica de Par vs. Posición Estática	
– motor de 25mm .....	<b>77</b>
<b>Figura 4.29 :</b> Gráfica de Par de <i>pull-in</i> vs Frecuencia	
– motor de 25mm .....	<b>79</b>
<b>Figura 4.30 :</b> Gráfica de Par de <i>pull-in</i> vs Frecuencia	
– motor de 20mm .....	<b>80</b>
<b>Figura 4.31:</b> Esquema de la prueba de <i>pull-out</i> .....	<b>82</b>
<b>Figura 4.32:</b> Gráfica de Par de <i>pull-out</i> vs Frecuencia	
– motor de 20mm .....	<b>83</b>
<b>Figura 4.33 :</b> Gráfica de Par de <i>pull-out</i> vs Frecuencia	
– motor de 25mm .....	<b>84</b>
<b>Figura 5.1:</b> Gráfica característica – motor de 20mm .....	<b>85</b>
<b>Figura 5.2:</b> Gráfica característica – motor de 25mm .....	<b>86</b>
<b>Figura 5.3:</b> Gráfica comparativa de par de <i>holding</i> .....	<b>88</b>
<b>Figura 5.4:</b> Gráfica comparativa de par de <i>pull-in</i> .....	<b>89</b>
<b>Figura 5.5:</b> Gráfica comparativa de par de <i>pull-in</i> vs. velocidad.....	<b>90</b>
<b>Figura 5.6:</b> Gráfica comparativa del par de <i>pull-out</i> .....	<b>93</b>
<b>Figura 5.7:</b> Gráfica comparativa del par de <i>pull-out</i> vs. velocidad.....	<b>93</b>
<b>Figura 5.8:</b> Gráfica característica para un motor comercial	
de 25mm .....	<b>95</b>
<b>Figura 5.9:</b> Gráfica característica para un motor comercial	
de 20mm .....	<b>97</b>

# Índice de Tablas

---

<b>Tabla 4.1:</b> Características de los motores manufacturados.....	<b>63</b>
<b>Tabla 5.1:</b> Resumen de las propiedades estáticas y dinámicas medidas.....	<b>87</b>
<b>Tabla 5.2:</b> Tabla de los parámetros de un motor comercial de 25[mm] de diámetro.....	<b>96</b>
<b>Tabla 5.3:</b> Tabla de los parámetros de un motor comercial de 20[mm] de diámetro.....	<b>99</b>

## Introducción

---

Hoy en día, los motores a pasos que se pueden conseguir en el mercado provienen de una gran variedad de marcas; de igual forma se pueden encontrar motores a pasos con diversas características en cuanto al número de pasos por revolución, tamaño, potencia, etc. Sin embargo, la disponibilidad de diferentes opciones de motores a pasos comerciales disminuye notablemente cuando se requiere de motores de dimensiones reducidas (diámetro de motor menor a 20mm) [1]. De hecho, en ciertas dimensiones, sólo se pueden encontrar modelos hechos a mano y algunos modelos catalogados como experimentales.

En el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), grupo en donde se desarrolló esta tesis, se investiga acerca de la creación de micro-máquinas herramientas que permitan manufacturar componentes de dimensiones reducidas. Para que se pueda seguir reduciendo las dimensiones de dichas micro-máquinas se requiere de actuadores de dimensiones reducidas, dimensiones en las cuales no se pueden encontrar una gran variedad de motores a pasos. Es por esto que en el GMM se ha optado por desarrollar actuadores propios; esta tesis forma parte de ese desarrollo.

En general, esta tesis está dividida en cinco capítulos. El primero de ellos expone una breve descripción de las principales clases de

motores eléctricos que se utilizan hoy en día y su principio de funcionamiento; profundizando en los motores a pasos.

En el segundo capítulo, se plantean los objetivos de esta tesis y el planteamiento del problema de donde surge la misma. En el capítulo tercero, se presenta el marco teórico relacionado con los motores a pasos de fuerza de Lorentz, así como las características dinámicas y estáticas que presentan los motores a pasos en general. En el cuarto capítulo se explica cómo se desarrolló este trabajo; describiendo el funcionamiento de los motores que se construyeron, algunos aspectos de su manufactura y cómo se llevó a cabo la obtención de las características dinámicas y estáticas de éstos. En el quinto capítulo se hace un análisis comparativo de las características dinámicas y estáticas de los motores construidos.

Finalmente, se presentan las conclusiones sobre los datos obtenidos en este trabajo y, más adelante, se presentan algunas propuestas para trabajo a futuro.

---

## Capítulo 1: Antecedentes

---

Un sistema es una combinación de componentes, dispositivos o subsistemas que actúan juntos y realizan un objetivo determinado, en contextos que van desde el procesamiento de señales y comunicaciones hasta motores electromecánicos, vehículos automotores y plantas de procesos químicos [2].

El concepto de sistema también 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 [3].

Dentro de los componentes de un sistema, se encuentran los actuadores, mismos que son dispositivos capaces de aportar energía a un sistema. En un sistema dinámico los actuadores son de gran importancia porque generalmente permiten controlar el estado del sistema.

Existe una gran variedad de actuadores, sin embargo, los que este trabajo aborda son los motores eléctricos.

## **1.1 Motores Eléctricos.**

Un motor eléctrico es una clase de máquina eléctrica; una máquina eléctrica es un dispositivo que se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica o viceversa.

Los motores eléctricos se clasifican según la clase de corriente con que se alimentan y por su principio de funcionamiento. Según el tipo de corriente con que funcionan, pueden clasificarse en motores de **corriente directa** y en motores de **corriente alterna**.

Todos los motores eléctricos, independientemente del tipo de corriente con que estén alimentados tienen dos características en común. La primera es que para producir su par, los campos magnéticos del rotor y del estator deben de ser estáticos entre sí. Por ejemplo, en los motores de corriente alterna, ambos campos magnéticos están rotando en el espacio y en los motores de corriente directa ambos campos magnéticos están estáticos en el espacio y respecto a sí mismos.

La segunda característica en común que tienen todos los motores, es que para una determinada dimensión de rotor, entrehierro y velocidad; existe una potencia de salida máxima. Dicha potencia es determinada por el tipo de hierro que se utiliza, la densidad de flujo máxima y corriente máxima. La clase de hierro que se utiliza limita la potencia de salida debido a la saturación magnética que presenta, mientras que la densidad de flujo máxima en el entrehierro está limitada a un valor que no sature al núcleo del embobinado del estator.

Por otra parte, la corriente máxima está limitada por la efectividad con que se remueva la generación de calor por el efecto de Joule y por la temperatura máxima permisible. Dicha temperatura máxima es, a su vez, función del tipo de aislamiento que se utilice para separar los conductores en la armadura del acero del núcleo.

Las principales clases de motores eléctricos son las siguientes:

- ***Motores de Corriente Alterna***

Los motores eléctricos diseñados para funcionar con fuentes de corriente alterna se clasifican principalmente en dos tipos: motores de inducción y motores síncronos.

- *Motores de Inducción.*

Probablemente los motores de inducción sean los más numerosos en la economía actual. Las máquinas de inducción son simples robustas y por lo general baratas de producir. Dominan en aplicaciones en diferentes rangos de potencia, desde algunos cientos de watts hasta alrededor de medio mega-watt. En capacidades nominales de varios cientos de caballos de fuerza, los motores síncronos son, a menudo, más eficientes que las máquinas de inducción y, por lo tanto, se eligen máquinas síncronas muy grandes en lugar de los motores de inducción.

Un motor de inducción es un transformador eléctrico cuyo circuito magnético se encuentra separado por un entrehierro en dos segmentos relativamente móviles. Uno que conduce el devanado primario y otro el devanado secundario. La corriente alterna

suministrada al devanado primario desde un sistema de alimentación eléctrica induce una corriente opuesta en el devanado secundario, cuando éste último se pone en cortocircuito o se cierra a través de una impedancia externa. El movimiento relativo entre las estructuras primaria y secundaria se produce por las fuerzas electromagnéticas correspondientes a la potencia que es transferida a través del entrehierro por inducción. La característica esencial que distingue la máquina de inducción de otros tipos de motores eléctricos es que las corrientes del secundario son creadas únicamente por inducción, como en un transformador, en lugar de ser suministradas mediante un excitador de corriente directa u otra fuente de energía externa, como máquinas síncronas o de corriente directa.

– *Motores Síncronos*

Los motores síncronos no tienen un uso tan amplio como las máquinas de inducción, porque sus rotores son más complejos y requieren de excitadores. No obstante, estos motores tienen grandes aplicaciones industriales en situaciones donde sus capacidades para proporcionar factor de potencia adelantado ayuda a soportar o estabilizar el voltaje y para mejorar el factor de potencia total.

La característica principal de este tipo de motores es que giran a la misma velocidad que la corriente alterna que los alimenta. En estos motores, el estator produce un campo eléctrico giratorio, al igual que en el motor de inducción, mientras que el rotor produce un campo magnético constante. De esta manera por atracción o repulsión de campos magnéticos se produce el par.

- ***Motores de Corriente Directa***

A finales del siglo XVII varios inventores construyeron los primeros motores eléctricos, ésta primera generación de motores funcionaba con corriente directa. Después de la invención de los motores de inducción, los motores de corriente directa han sido reemplazados por motores de corriente alterna. Sin embargo, los motores de corriente directa aún tienen muchas aplicaciones.

El motor de corriente directa consiste de un rotor con embobinados y un estator con embobinados o imanes. En todos los motores de corriente directa se debe de pasar corriente a través de los embobinados del rotor, esto se logra a través de escobillas de carbón que se encuentran en contacto con un conmutador; cuando dichos embobinados se energizan a través del conmutador, se genera en el rotor un dipolo magnético, que se repele o atrae con el dipolo que se encuentra en el estator. Es así como se genera el par con que se mueve al rotor. El dipolo que se encuentra en el estator puede ser generado por un imán permanente o por un embobinado [4].

La ventaja principal de los motores de corriente directa es que se puede controlar su velocidad. Debido a que la velocidad es directamente proporcional al voltaje con que se alimentan los embobinados del rotor e inversamente proporcional a flujo magnético producido en el estator; si se ajustan el voltaje de alimentación en el rotor y/o la corriente en el estator, se puede seleccionar la velocidad a la que operará el motor de corriente directa [4].

Por otra parte, los motores de corriente directa tienen algunas desventajas como: alto costo inicial, costo de la generación de la corriente directa y costo de mantenimiento mayor. Además, los motores a pasos requieren de otros sistemas para funcionar, como elementos de rectificación que también generan pérdida en la eficiencia del sistema.

Las principales clases de motores de corriente directa son los de imán permanente, los de conexión en serie, los de conexión en paralelo y de conexión mixta.

Los motores de corriente directa de imán permanente, generan el campo magnético necesario mediante imanes permanentes en el estator. Debido a que el campo magnético producido tiene una magnitud determinada que no puede controlarse, los motores de corriente directa de imán permanente generalmente son pequeños y producen baja potencia [4].

Los motores de corriente directa de conexión en serie, paralelo o mixta reciben su nombre precisamente por la manera en que se encuentran conectados los devanados del estator y del rotor.

Dentro de las aplicaciones de los motores de corriente directa se encuentran desde los sistemas en los automóviles, hasta los grandes motores de tracción que accionan los trenes subterráneos y las locomotoras diesel/eléctricas.

Además de los motores de corriente directa y de corriente alterna existen otras clasificaciones de motores que no pertenecen del todo a ninguna de las anteriores; dentro de estas otras clasificaciones

encontramos motores como los de reluctancia, de histéresis y de pasos.

### **1.1.1 Motores a pasos**

#### ***1.1.1.1 Historia***

La primera aplicación de motores a pasos de la que se tiene referencia aparece en una publicación de la *JIEE* [5] en un artículo titulado “*The application of electricity of warships*” en el año de 1927; en este artículo se describe un motor a pasos de reluctancia con tres fases que se utilizaba en los barcos de la marina inglesa, para controlar remotamente el indicador de la dirección de los tubos de torpedo. En este artículo se describe que la secuencia de excitación de ese motor a pasos era generada por un interruptor rotatorio operado manualmente. Más adelante, de acuerdo con un artículo publicado en la revista *IEEE Transactions in Automatic Control* [6], los motores a pasos fueron utilizados por la Marina de Estados Unidos para propósitos similares.

A pesar de que las primeras aplicaciones prácticas de los motores a pasos aparecieron en los años de 1920, se tienen registros de prototipos de motores a pasos de reluctancia desde mediados del siglo XIX [7].

Las aplicaciones industriales de éste tipo de motores vinieron más adelante en la década de 1960 con el advenimiento de los

sistemas digitales. Fue en esta década donde comenzaron a aparecer aplicaciones avanzadas en las que se utilizaba este tipo de motores, por ejemplo, se crearon las primeras máquinas de control numérico que funcionaban con tres motores a pasos [8]. En esta década, también, los fabricantes de computadoras descubrieron el potencial de los motores a pasos y promovieron el desarrollo de motores confiables y de alto desempeño. Por ejemplo, la marca IBM alrededor del año de 1965, ya incluía motores a pasos en sus productos.

En la década de 1970 la industria de las computadoras incrementó la aplicación de motores a pasos en sus productos, por lo que los motores se comenzaron a fabricar en masa. En esta década surgieron las primeras impresoras que utilizaban motores a pasos y circuitos integrados para su control, en lugar de los mecanismos mecánicos complejos utilizados hasta aquel momento. Al igual que en otros campos, el avance exponencial en el uso de estos motores se debe al advenimiento de los circuitos integrados pues, con esta tecnología, se pudieron construir controladores que ejecutaban secuencias de control para los motores a pasos, haciéndolos más flexibles para distintas aplicaciones.

#### ***1.1.1.2 : Definición***

Los motores a pasos generalmente son clasificados dentro de los motores eléctricos de aplicación especial, al igual que otros tipos de motores que no pueden clasificarse precisamente como motores de corriente directa o alterna.

Un motor a pasos se define como un motor de excitación única capaz de convertir impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos. En un motor a pasos la señal de entrada (pulso) se convierte directamente en una posición de flecha determinada sin la necesidad de ningún sensor de posición o retroalimentación. Como su nombre lo indica, la característica principal de los motores a pasos es su capacidad de convertir la excitación secuencial en incrementos precisos, “pasos”, de la posición del rotor.

Los motores a pasos se utilizan cuando se requiere control de la velocidad y posición sin la necesidad de implementar un costoso control de lazo cerrado. Un sistema de control típico de un motor a pasos consiste en un generador de pulsos, un circuito lógico, un amplificador de potencia y una fuente de poder. En algunas aplicaciones, en lugar de un generador de pulsos se puede utilizar un microprocesador, una microcomputadora o un convertidor analógico digital que genere los pulsos. En la industria, generalmente, se sustituyen todos los elementos anteriores por un controlador de motores a pasos, que hace todas las funciones necesarias para operar al motor.

Para un buen desempeño, los diseños de motores a pasos deben de cumplir los siguientes requerimientos: una constante de tiempo eléctrica y mecánica pequeña, operación sin pérdida de pasos y alta fiabilidad. Los motores a pasos proveen un muy alto torque a bajas velocidades, hasta cinco veces el torque continuo que provee un motor de corriente directa de las mismas dimensiones o que un motor de corriente directa sin escobillas del doble de tamaño. Este tipo de

motores en algunas ocasiones elimina la necesidad de mecanismos reductores.

Las principales ventajas de utilizar motores a pasos son:

- Capacidad de operar con un control de lazo abierto.
- Avances pequeños (hasta de  $1.8^\circ$  por paso)
- Sincronización sencilla [9].

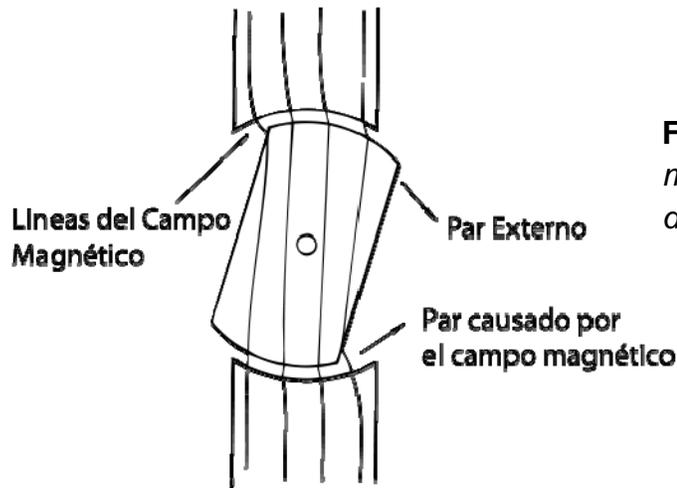
Por otra parte, como desventajas, se tiene que los motores a pasos algunas veces tienden a perder la sincronía, presentan resonancia y oscilan al colocarse en una determinada posición. La velocidad y eficiencia de estos motores es menor que la de los motores sin escobillas.

### ***1.1.1.3 Clasificación:***

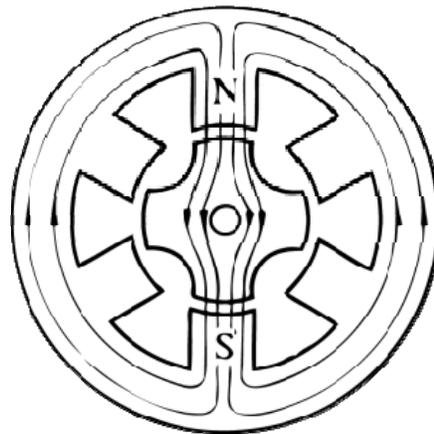
Existen tres tipos básicos de motores a pasos que difieren entre sí sólo por la construcción del rotor: *de imán permanente*, *de reluctancia* e *híbridos*.

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 alinearse con el campo magnético externo; tal como sucede en el indicador de una brújula. En la figura 1.1 se muestra

cómo el campo magnético hace girar un objeto de material ferromagnético para alinearlo con él. En la figura 1.2 se muestra como se cierra el circuito magnético en un motor de reluctancia.



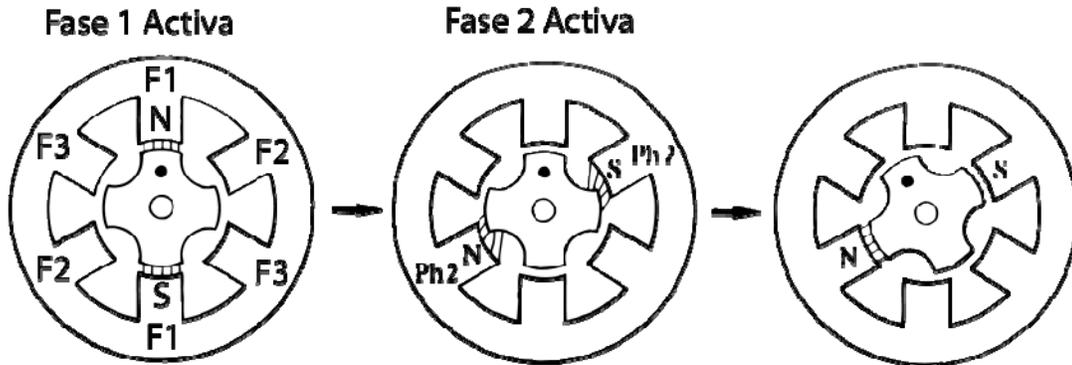
**Figura 1.1:** Líneas del campo magnético provocando el par de reluctancia [22].



**Figura 1.2:** Circuito magnético en un motor a pasos de reluctancia [22].

Los motores de reluctancia podrían funcionar, girando continuamente, si se conectan sus fases a la corriente alterna. Sin embargo, si sus fases son excitadas secuencialmente con corriente directa, se convierte en un motor a pasos de reluctancia. 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 1.3 se muestra cómo se generan los pasos en un motor a pasos de reluctancia.



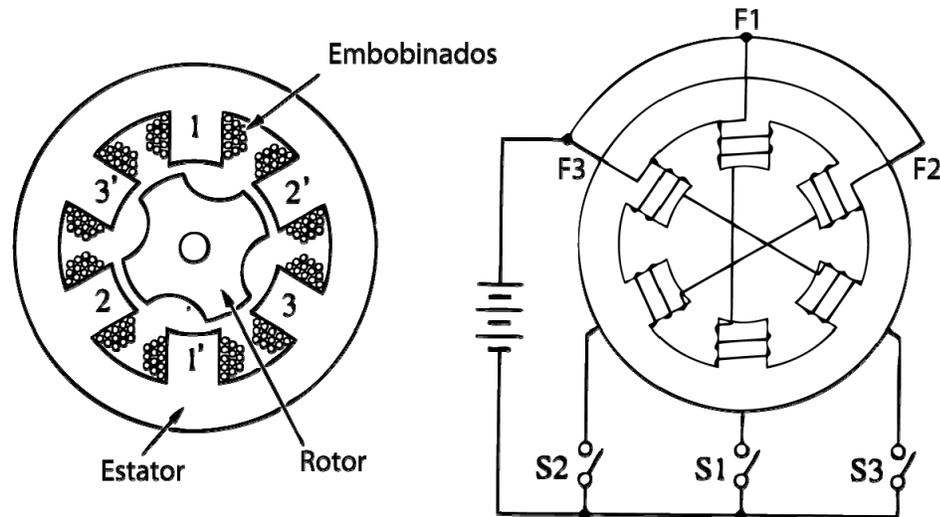
**Figura 1.3:** *Generación de un paso en un motor de a pasos de reluctancia*

En estos motores el flujo magnético busca pasar 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 a pasos de reluctancia no dependen de la polaridad de la corriente, 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 [9].

La segunda clase de motores a pasos son los motores a pasos de imán permanente, que 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 fases.



**Figura 1-4:** Embobinados en un motor de reluctancia.

Este tipo de motores son ampliamente utilizados en equipo de cómputo como impresoras, faxes y escáneres. Generalmente se manufacturan con ángulos de paso grandes y, por su simplicidad, son producidos masivamente a bajo costo. En la figura 1.5a se muestra la forma que tienen los rotores de éste tipo, en la figura 1.5b se muestra cómo se encuentran distribuidas sus fases y en la figura 1.5c se muestra cómo se embobinan sus fases para que se genere el dipolo que atraiga o rechace al dipolo del rotor. Por otra parte, en la figura 1.6 se muestra cómo se deben de ir generando los dipolos en el estator para que se haga girar el rotor.

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.

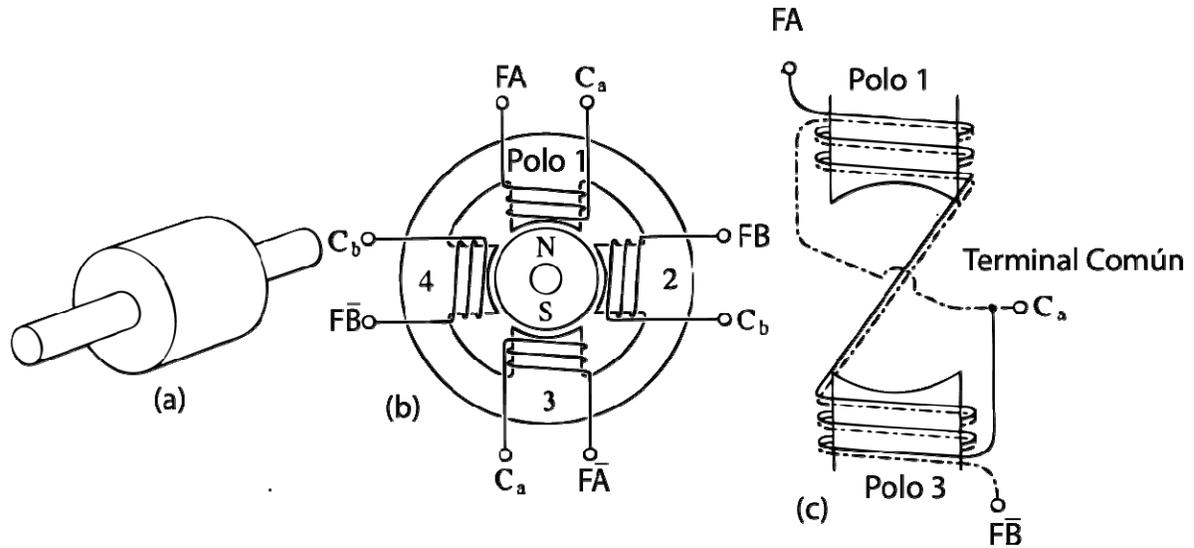


Figura 1.5: Embobinados en un motor a pasos de imán permanente

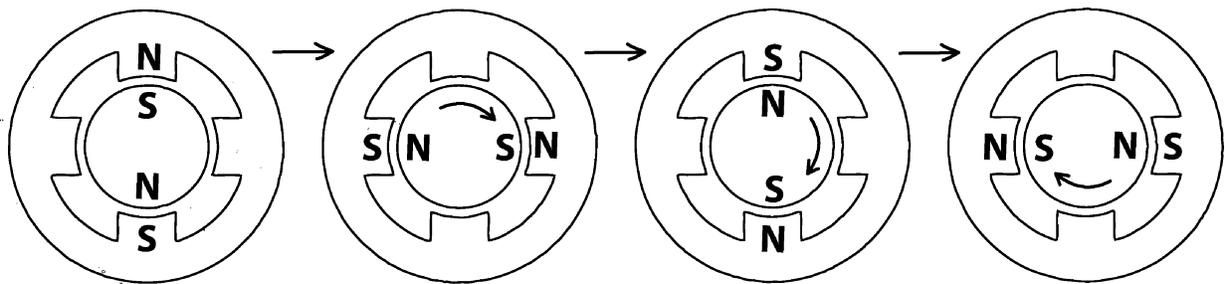
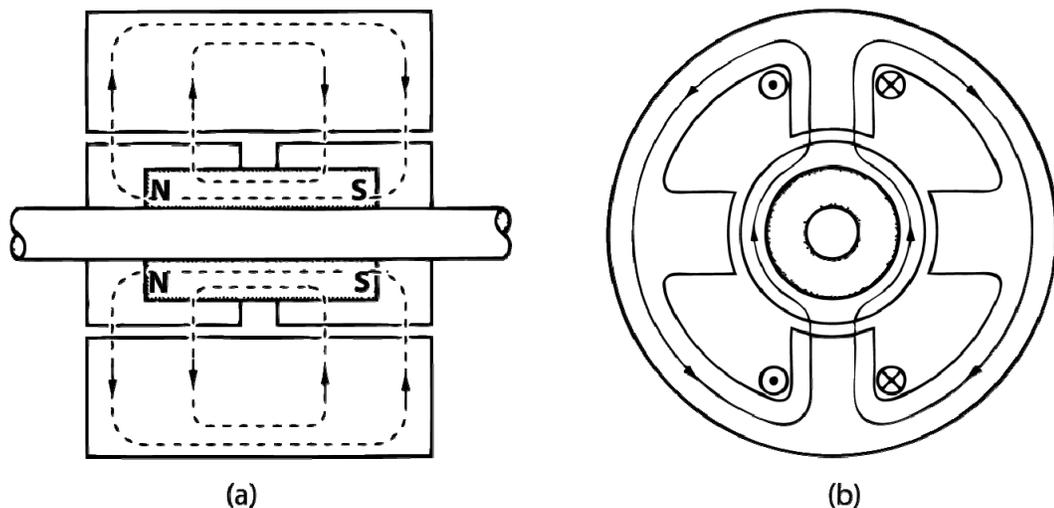


Figura 1-6: Generación de los pasos en un motor de imán permanente.

La última clase de motores a pasos son los **motores a pasos híbridos**, estos reciben este nombre debido a que utilizan una combinación de los principios de funcionamiento de los motores a pasos de reluctancia 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 a pasos híbridos son de dos fases, pero existen algunos 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.

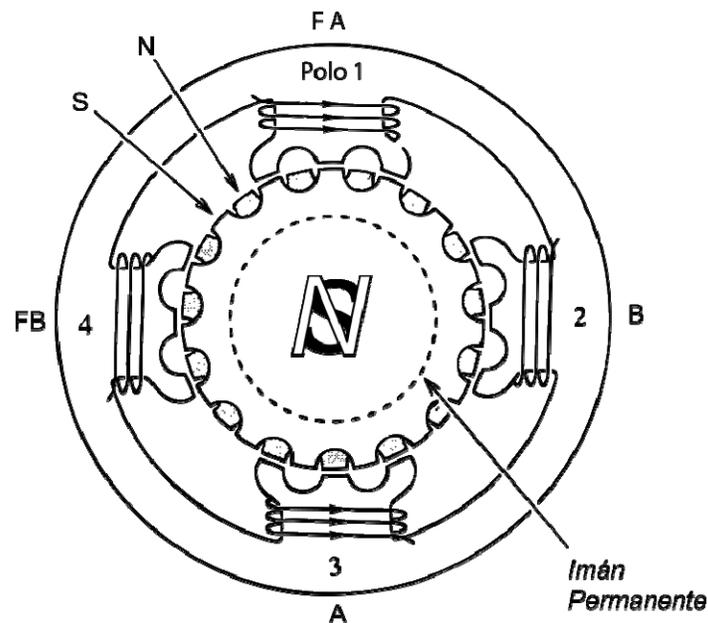
En los motores híbridos el circuito magnético que se forma entre el estator y el rotor es una combinación del flujo magnético generado por los embobinados y el de un imán permanente. Los embobinados son colocados en polos en el estator mientras que el imán permanente se monta en el rotor, como se muestra en la figura 1.7.



**Figura 1.7:** 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 mismo; de esta

manera, se suma el flujo magnético del imán y el de los embobinados obteniendo un mayor flujo magnético que en otras clases de motores a pasos; esto último sin la necesidad de suministrarle mayor potencia. En la figura 1.8 se muestra un diagrama de la configuración de esta clase de motores y en la figura 1.9 se muestra cómo se generan los pasos.

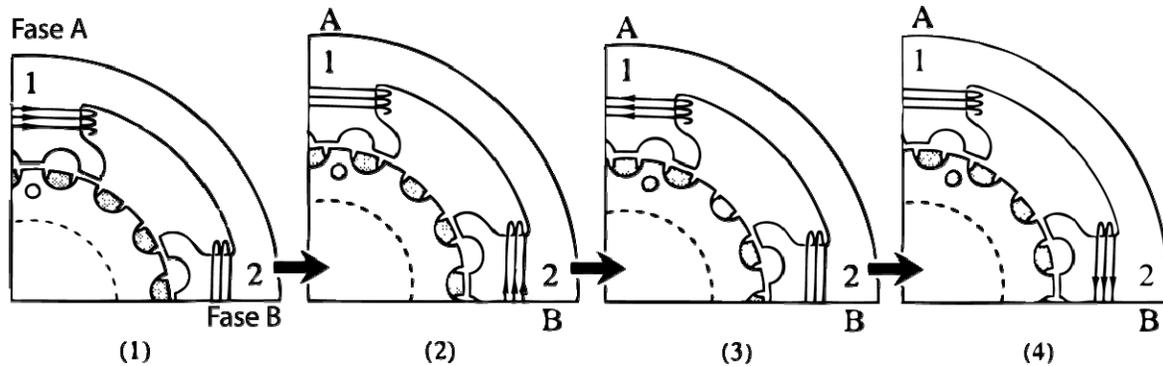


**Figura 1.8:** Diagrama de la configuración de un motor de pasos híbrido.

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

Los motores a pasos de fuerza de Lorentz, como los que se desarrollan en este trabajo, no aparecen dentro de clases descritas

anteriormente. Debido a su principio de funcionamiento deberían pertenecer a una nueva clasificación.



**Figura 1.9:** *Generación de pasos en un motor*

Cada una de las clases de motores a pasos presenta diversas ventajas o desventajas, según la aplicación para la que sean requeridos. La ventaja que presentan los motores híbridos está en su resolución, pues éstos se manufacturan típicamente logrando  $1.8^\circ$  por paso (200 pasos por revolución), lo cual puede ser de gran utilidad cuando se requiere de una gran precisión en la posición angular. Una investigación sobre manufactura de motores a pasos reveló que, para un volumen de motor determinado, el par producido es mayor en los motores híbridos que en motores reluctancia [10]. Por lo que los motores a pasos híbridos serían la selección ideal para cuando se requieran pasos pequeños y alto torque en un espacio restringido. Otra ventaja de los motores a 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, debido a que estos se manufacturan con una resolución típica de  $15^\circ$  por paso (24 pasos por revolución), se requiere de una menor cantidad de pasos para llegar a una posición determinada, al mismo tiempo que se evita la pérdida de par por el aumento de la frecuencia de excitación. Otra ventaja que presenta este tipo de motores es que los motores de reluctancia variable tienen menor inercia en sus rotores que los motores híbridos, porque los motores de reluctancia no tienen el imán permanente en el rotor [11]. 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.

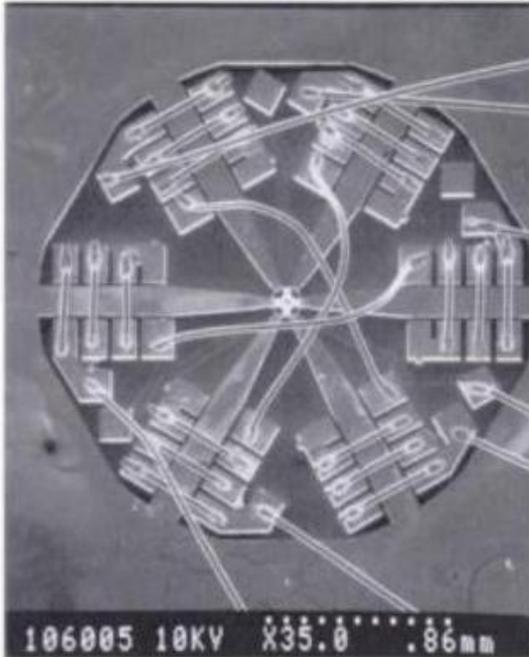
#### ***1.1.1.4: Motores a Pasos en la Actualidad***

El principio de funcionamiento de los motores a pasos no ha evolucionado mucho desde la década de los noventas. 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 [12]. 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 límites para determinada carga y velocidad, aumentando la fiabilidad del sistema motor-controlador [13].

Una parte de los desarrollos recientes que se han hecho en los motores a pasos se ha 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 a 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 utilizado motores a pasos con diámetros menores a 1mm cuyos estatores cuentan apenas con un

par de enrollamientos en sus embobinados [14], en la figura 1.10 se encuentra una fotografía de un motor parte de un MEMS.



**Figura 1.10:** *Fotografía de un motor a pasos microscópico [14].*

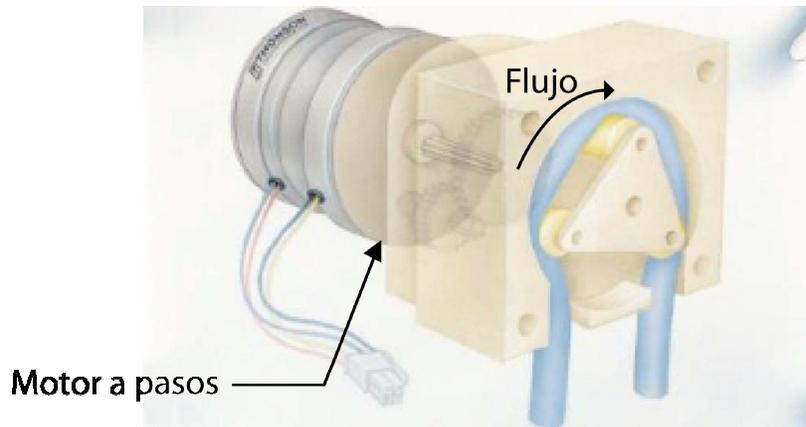
Algunas aplicaciones de punta donde se utilizan motores a pasos se han dado en el campo de la medicina. La compañía austriaca *LifeOptics*, por ejemplo, ha creado microscopios que se utilizan como una especie de lentes de aumento; estos lentes le permiten al médico tener una visión equivalente a la que tendría con un microscopio pero con toda la movilidad que permiten unas gafas normales. Para que estos lentes sean funcionales, deben de ajustar el enfoque automáticamente a cada pequeño movimiento de la persona, esto se logran mediante pequeños motores a pasos montados en los lentes

mismos, que hacen los ajustes a cada movimiento [15]. En la figura 1.11 se muestra una imagen de los lentes mencionados.

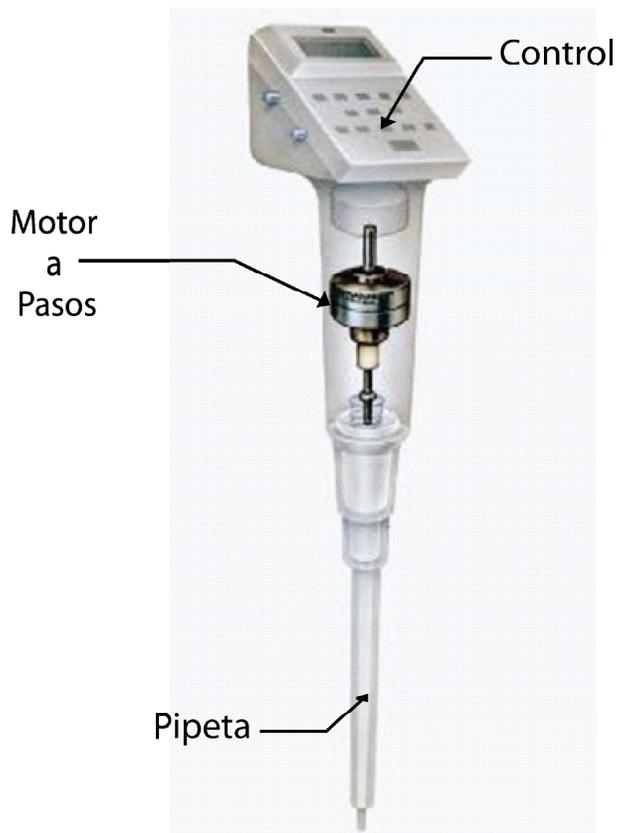
**Figura 1.11:** Lentes para microcirugía que utilizan motores a pasos [14].



En este mismo campo se han desarrollado dispositivos que dosifican medicamentos a través de bombas peristálticas (figura 1.12). En estos dispositivos se utilizan motores a pasos, debido al control preciso que se debe tener en la dosificación y al alto par que se requiere para mover este tipo de bombas. 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 1.13)

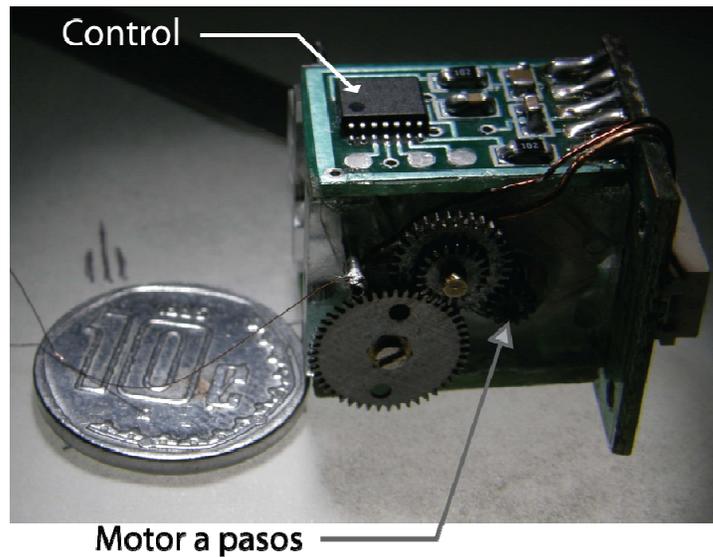


**Figura 1.12:** Bomba peristáltica activada por un motor a pasos.

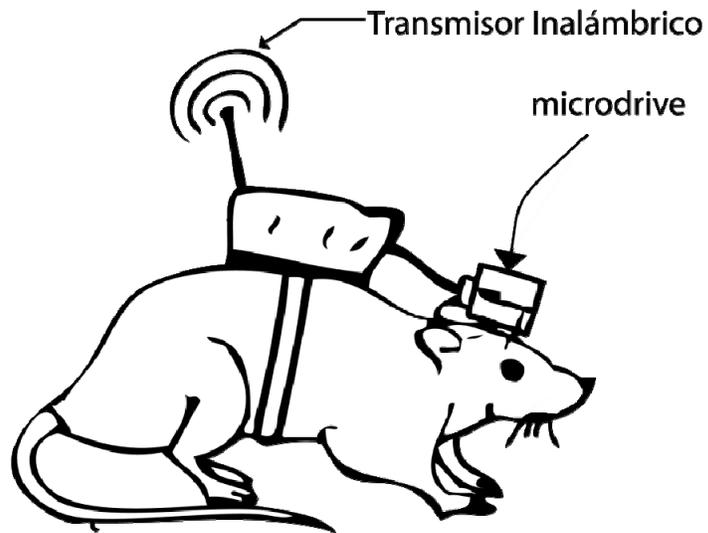


**Figura 1.13:** Pipeta de alta precisión activada por un motor a pasos

Comercialmente no se han encontrado aplicaciones de motores a pasos de fuerza de Lorentz, sin embargo, en el GMM una de las aplicaciones que se implementó recientemente, fue un microdrive para colocar una sonda que captura señales en las neuronas de ratas de laboratorio. Este microdrive (figura 1.14) debía de ser muy pequeño, pues debía de estar montado en el cráneo de las ratas (figura 1.15); la función de este dispositivo es de introducir la sonda en el tejido cerebral en búsqueda de señales neuronales adecuadas. El actuador en éste dispositivo es un motor a pasos de fuerza de Lorentz de apenas 10mm de diámetro manufacturado en el GMM.



**Figura 1.14:** *Microdrive desarrollado en el GMM.*



**Figura 1.15:** *Uso del Microdrive en ratas de laboratorio.* [16]

---

## Capítulo 2: Objetivos, Metodología y Alcances

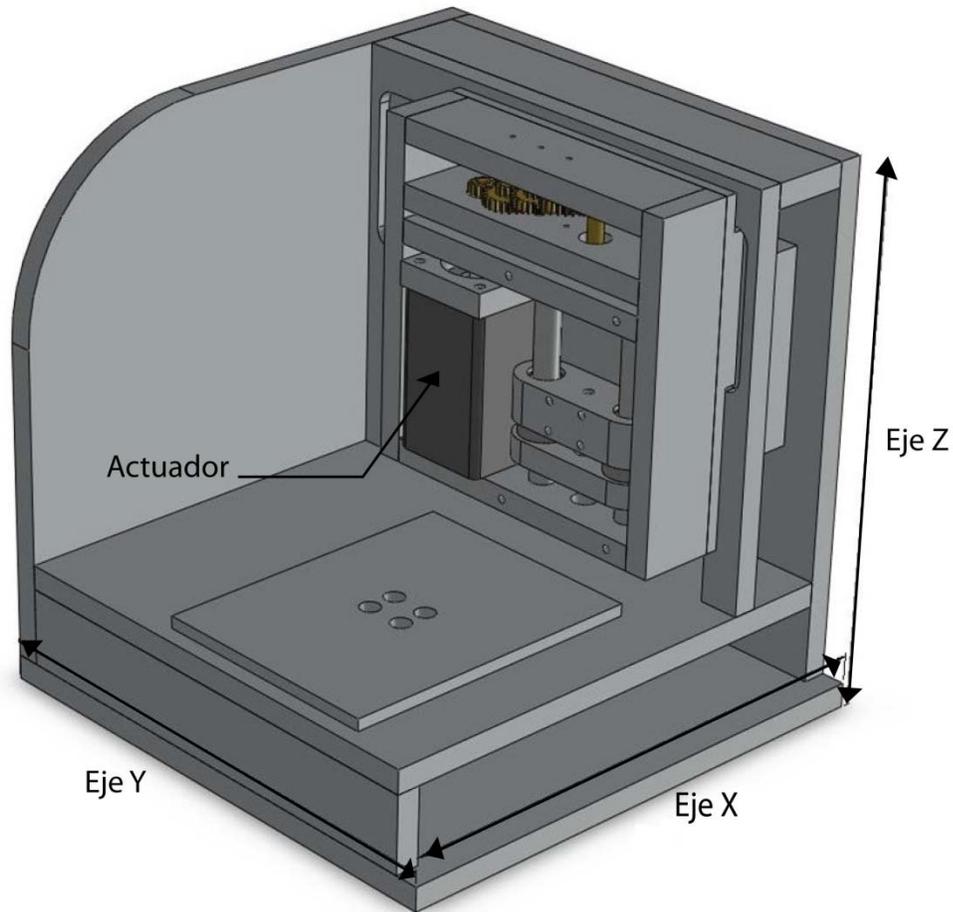
---

Actualmente, en el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), Centro que pertenece a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se encuentran desarrollando micro-máquinas herramientas. Estas micromáquinas siguen el principio de “Máquinas pequeñas para fabricar piezas pequeñas” con el fin de romper con el paradigma de utilizar la misma clase de máquinas para fabricar todo tamaño de piezas.

En esta área, conforme se van escalando las máquinas herramientas, también se van escalando sus componentes. Por lo anterior, surge la necesidad de desarrollar motores de dimensiones reducidas que sean funcionales, controlables y confiables; para poder continuar reduciendo las dimensiones de los nuevos diseños.

Para las micromáquinas herramientas que se están desarrollando en el GMM, existen dos clases de motores pueden cumplir con los requerimientos: los motores a pasos y los servomotores. En el GMM se ha preferido desarrollar motores a pasos puesto que éstos pueden controlar de manera sencilla además de que los errores de posición que presentan no son acumulativos. Antes de este trabajo ya se han desarrollado motores a pasos en el GMM; algunos de estos motores ya se encuentran trabajando en centros de maquinado de dimensiones pequeñas, que logran hacer maquinados de piezas de hasta  $50\mu\text{m}$  de diámetro. En la figura 2.1 se muestra una

imagen del diseño de la generación 2010 del centro de micromaquinado de apenas 10cm x 10cm x 10cm de dimensiones.



**Figura 2.1:** Centro de micro-maquinado desarrollado en el GMM. [23]

Lo que esta tesis propone es hacer un análisis sobre cómo se modifican las propiedades de los motores a pasos de fuerza de Lorentz cuando se modifican sus dimensiones. Esto se hace con el fin de proporcionar bases para la toma de decisiones sobre la

conveniencia del uso de motores a pasos de fuerza de Lorentz, en una aplicación determinada.

## **Objetivo**

Analizar las características estáticas y dinámicas de dos motores a pasos de fuerza de Lorentz de distintas dimensiones.

## **Alcances**

Las características de funcionamiento que son de mayor importancia para aplicaciones donde se utilicen motores a pasos son las siguientes:

- Par de  *Holding*.
- Par de  *Pull-in*.
- Par de  *Pull-out*.

Por lo que éstas son las características que se compararán entre los motores que se han desarrollado para este trabajo. También, se hará una comparación de algunas características con motores a pasos comerciales para conocer el nivel de desarrollo que se ha alcanzado con los motores de este trabajo.

## Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se plantearon las siguientes actividades:

1. Diseñar dos motores a pasos por fuerza de Lorentz, uno de 25 mm y otro de 20mm de diámetro en el rotor.
2. Manufacturar los motores a pasos diseñados.
3. Analizar las características del  *Holding Torque*  según la distancia del rotor al estator.
4. Analizar las características del  *Holding Torque*  cuando utilizan uno o dos estatores.
5. Realizar pruebas de  *Holding Torque* , par de  *pull-in*  y par de  *pull-out*  para ambos motores.
6. Analizar las pruebas desarrolladas.
7. Comparar los resultados de los motores manufacturados con motores comerciales.
8. Concluir el trabajo realizado.

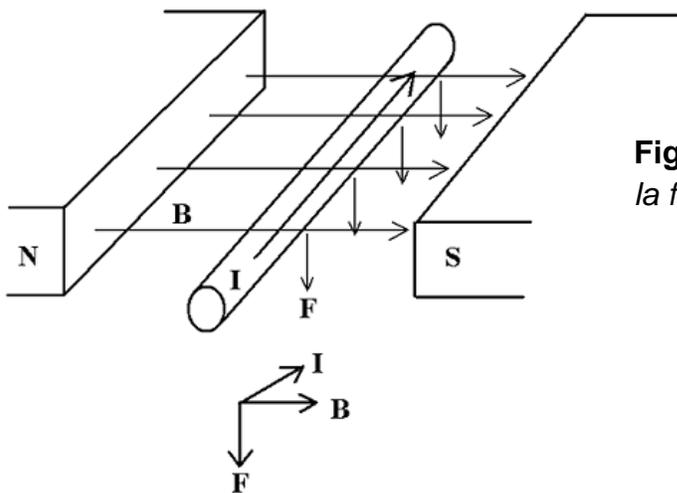
## Capítulo 3: Marco Teórico

### 3.1 Fuerza de Lorentz

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. 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 3.1.



**Figura 3.1:** Representación vectorial de la fuerza Lorentz.

En la figura 3.1 se muestra un conductor dentro de un campo magnético uniforme de densidad de flujo  $\mathbf{B}$  (el cual puede verse que apunta hacia adentro de la página). El conductor mide  $l$  metros y porta una corriente de  $i$  amperes. La fuerza inducida sobre el conductor está dada por:

$$F = i(l \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

Donde:

$i$ =magnitud de la corriente en el alambre.

$l$ = vector longitud del alambre, con la dirección en el mismo sentido que el flujo de corriente  $i$ .

$B$ = vector de densidad de flujo magnético.

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  $l$  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  $F$  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:

$$F = ilB \text{ sen } \theta \quad (2)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo comprendido entre el vector  $l$  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.

### **3.2 Parámetros de desempeño de los Motores a Pasos**

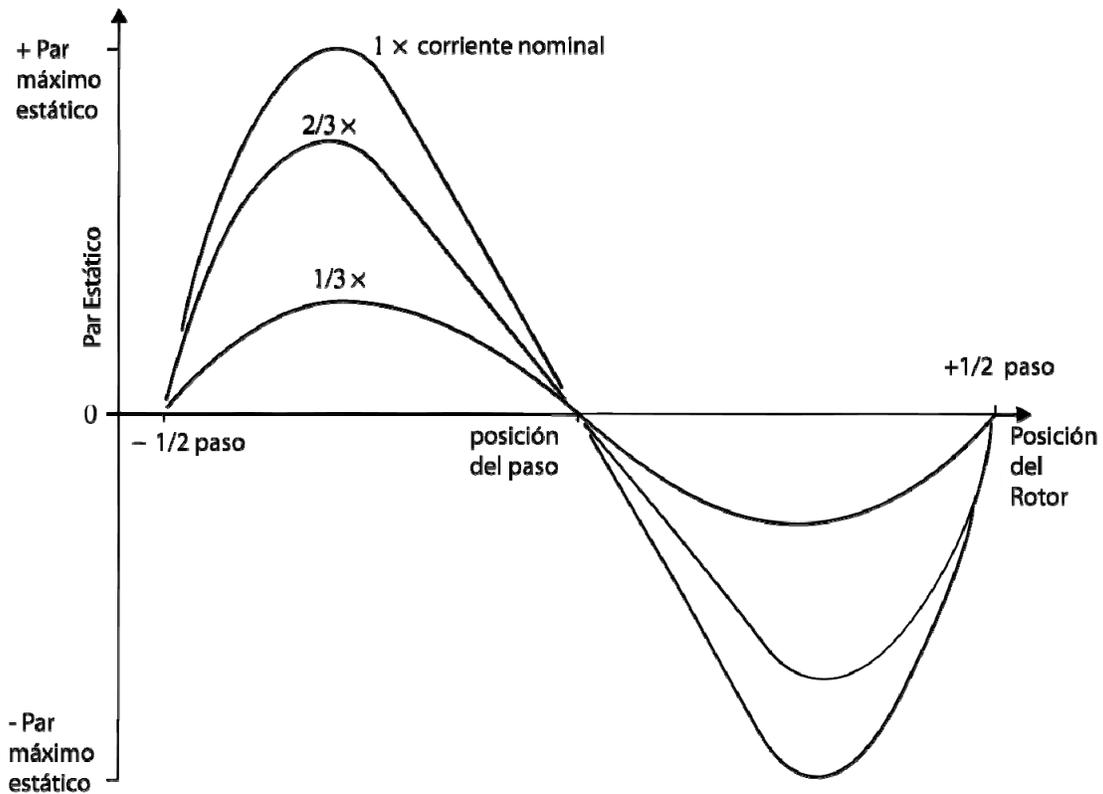
En los motores a pasos, a diferencia de otras clases de motores, no sólo interesan las características dinámicas del motor, pues los motores a pasos se utilizan también situaciones en las que se requiere simplemente mantener la carga en una posición determinada; por esta razón, en un diseño que involucre motores a pasos, además de las características dinámicas, son de interés también las características estáticas.

#### **3.2.1: Características Estáticas**

En la mayoría de las aplicaciones de los motores a pasos se busca colocar una carga mecánica con una alta precisión. Los pares de carga externos al motor, como la fricción por ejemplo, provocan un pequeño error en la posición cuando el motor se encuentra detenido. Esta desviación con respecto a la posición esperada se debe a que el motor debe desviarse un pequeño ángulo para generar el par que equilibre la carga. Este error de posición estático depende de la carga a la que está sometido el motor, pero es independiente del número de pasos que se hayan recorrido anteriormente, por lo que este error no es acumulativo. Este error de posicionamiento en condiciones

estáticas algunas veces puede ser un parámetro para decidir el modelo de motor se va a utilizar en una aplicación determinada.

La información de las características estáticas de un motor a pasos información se brinda generalmente en forma de una gráfica conocida como la *gráfica de par-posición estática*. La cual muestra el par producido por el motor conforme se aleja de su posición esperada a distintos valores de corriente. En la figura 3.2 se muestra una típica gráfica par-posición en condiciones estáticas.



**Figura 3.2:** Gráfica de Par vs. Posición estática.

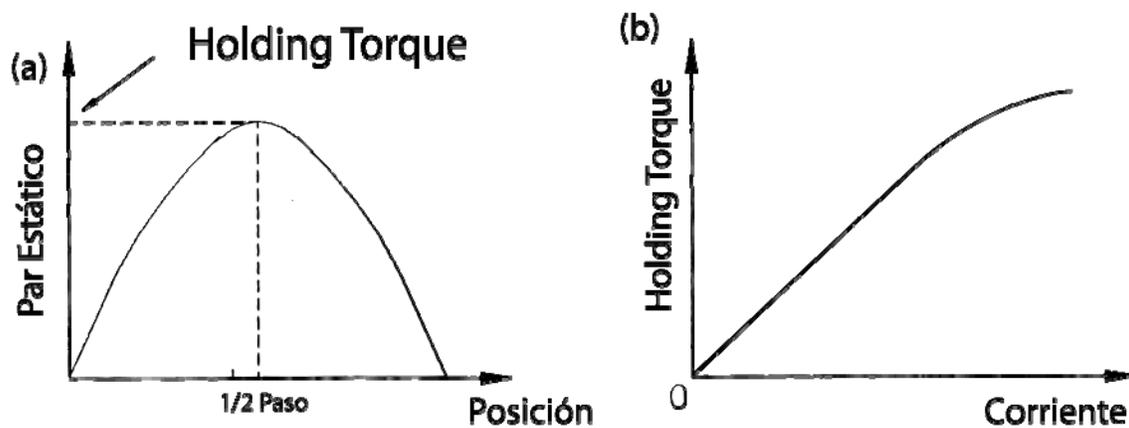
En la figura 3.2 se observa que en el punto donde el rotor se encuentra justo en la posición del paso actual, las fuerzas se encuentran en equilibrio y no se produce ningún par. Si el rotor se desalinea de esta posición, entonces se genera una fuerza en el rotor que producirá un par que tenderá a girar el rotor hacia la posición de equilibrio [10]; de esta misma manera si el rotor se desplaza en la dirección negativa, se produce un par en sentido positivo que tenderá a regresar el motor a su posición de equilibrio. La gráfica de par-posición en condiciones estáticas se repite con una longitud de onda de un paso, por lo que el rotor sólo regresa a su posición original si la desviación no es mayor a la mitad de un paso. Si la desviación es mayor a medio paso, el par que se genera no apuntará a la posición de equilibrio original, si no que apuntará a la posición de equilibrio siguiente. En la gráfica par-posición estática se puede observar que en los motores a pasos el par generado es proporcional a la corriente que esta fluyendo en el estator.

Intentar obtener la gráfica de par-posición en condiciones estáticas mediante cálculos teóricos resulta en la resolución de circuitos magnéticos complicados, por lo que estos valores se obtienen generalmente una vez que el motor ha sido creado mediante pruebas.

Un valor de especial interés en la gráfica de par-posición estática, es el par máximo que puede generar el motor, al cual se le conoce como par de  *Holding (Holding Torque)* y es la carga máxima que puede ser aplicada a la flecha de un motor con excitación sin provocar que éste pierda el equilibrio y, por lo tanto, pierda la posición

del paso correspondiente. En la figura 3.3a se muestra la ubicación del par de holding en una curva de par estático contra posición.

Como se mencionó antes, el par electromagnético generado por un motor a pasos es proporcional a la corriente en el estator. Para observar cómo aumenta dicho torque conforme se incrementa la corriente, se genera la curva par-corriente figura 3.3b, en la cual se grafican los pares de valores del par de retención contra la corriente.



**Figura 3.3:** Gráficas de par de holding típica: a) posición del holding torque en la gráfica par-posición estática; b) Comportamiento del par de holding contra la corriente suministrada

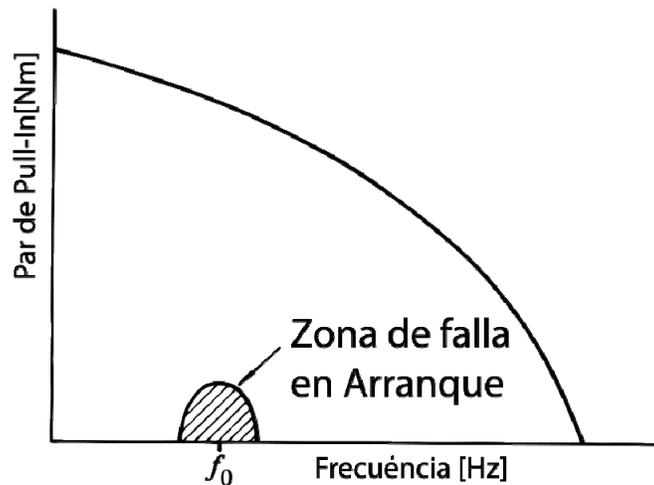
### 3.2.2: Características dinámicas:

Si un motor a pasos se utiliza para cambiar la posición angular en una distancia angular de varios pasos, se requiere conocer el par

que el motor puede producir mientras se está acelerando, decelerando o corriendo a velocidad constante. El motor debe de producir el suficiente par para mover la carga y acelerarla hasta la velocidad máxima. Dicha información se muestra generalmente en gráficas. En los motores a pasos, las gráficas de características dinámicas que más importancia tienen son las gráficas del par de *pull-in* y del par de *pull-out*; dichas gráficas brindan información acerca de cuál es la carga máxima con la cual puede arrancar un motor a pasos y cuál es la carga máxima a la cual puede moverse el motor a determinada velocidad.

### *Par de pull-in*

El par de *pull-in* es el par de carga máximo con el que el motor puede arrancar sin pérdida de pasos en su avance, a una determinada frecuencia; el torque de *pull-in* (del inglés *pulled in synchronism*) recibe ese nombre porque mientras el par de carga se mantenga por debajo de este valor a una determinada frecuencia el motor podrá arrancar sin perder pasos, es decir, sin perder sincronía. La curva que se obtiene al graficar el par de *pull-in* contra frecuencia, define un área conocida como el área de arranque, dicha área contiene todas las combinaciones de frecuencia y par de carga a las cuales el motor se podrá arrancar. En la figura 3.4 se muestra una gráfica típica de par de *pull-in* contra frecuencia.

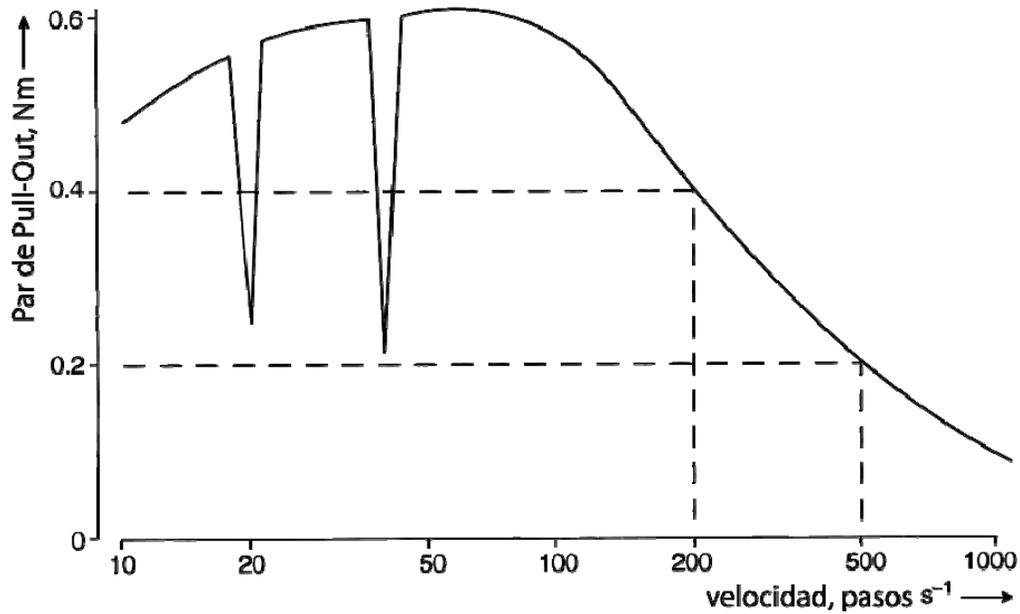


**Figura 3.4:** Gráfica de par de pull-in típica

### *Par de pull-out*

El par de *pull-out* es el par de máximo que puede desarrollar un motor a pasos a una velocidad determinada. A este par se le llama de *pull-out* porque si la carga excede este valor el rotor es sacado de sincronía (del inglés *pulled out of synchronism*) y deja de rotar correctamente. En la figura 3.5 se muestra una gráfica típica del torque de *pull-out*.

La información de la gráfica de la figura 3.5 gráfica sirve para determinar la carga máxima a la que se puede someter el motor a pasos sin perder sincronía. Por ejemplo, si dentro de un diseño se requiere mover una determinada carga, en esta gráfica se busca cual sería la velocidad máxima a la que se podría mover el motor sin perder sincronía.



**Figura 3.5:** Gráfica de par de pull-out típica

En la gráfica típica de torque de *pull-out* se observa que el par disminuye conforme aumenta la frecuencia, este comportamiento es similar al comportamiento de otro tipo de motores, como los de corriente alterna o corriente directa; sin embargo, mientras que en éstos la disminución en el par se debe a inductancias mutuas, en los motores a pasos la disminución en el par se debe a cómo se comporta la respuesta transitoria del motor conforme aumenta la frecuencia de excitación.

Lo que sucede en un motor a pasos es que, conforme va aumentando velocidad, va aumentando la frecuencia a la que se encienden y apagan sus fases. Al excitar cada una de las fases lo que se está excitando es un circuito con una carga inductiva y una carga resistiva. Cuando las cargas inductivas se excitan con una señal de voltaje cuadrada, la corriente tarda en establecerse en el embobinado. De esta manera, a altas frecuencias, el tiempo que se requiere para

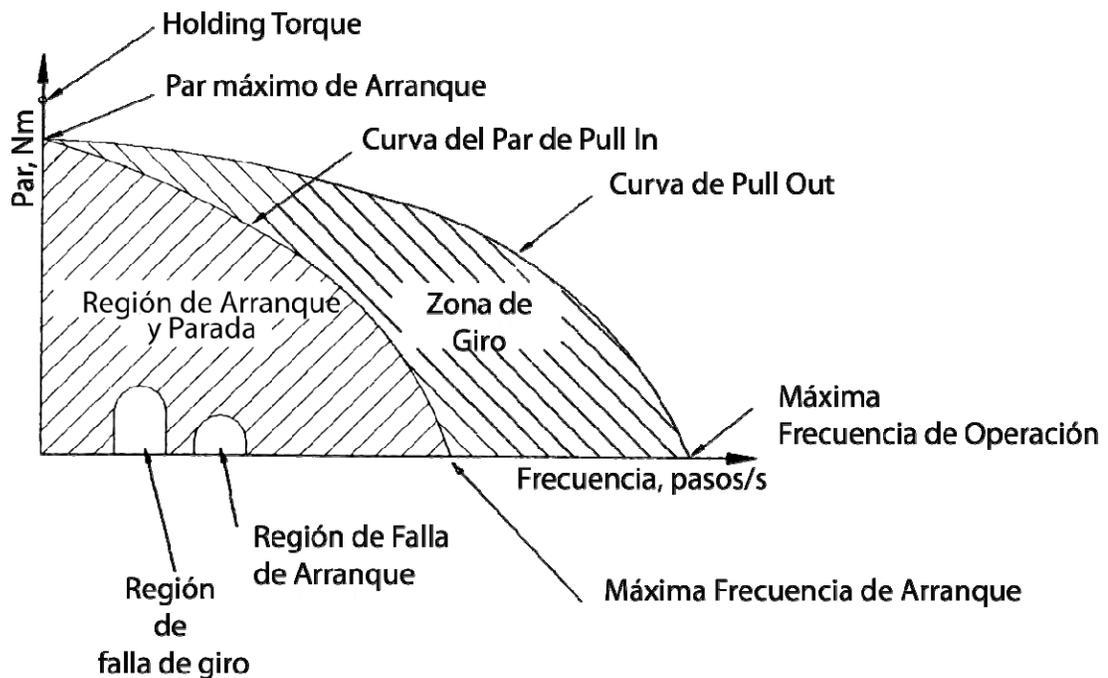
establecerse la corriente en la fase excitada se vuelve más significativo porque abarca más parte del intervalo de tiempo que dura la excitación, por lo que la corriente promedio que fluye en la fase excitada es menor resultando en un par menor. Por lo que si se quiere disminuir la pendiente de la curva de *pull-out*, lo que se debe de hacer es un diseño que disminuya la constante de tiempo de los embobinados, esta constante de tiempo es dependiente de la resistencia del embobinado y de la inductancia del mismo.

Hace falta agregar que, a altas velocidades de operación, el sistema motor-controlador-carga puede volverse inestable, de tal manera que existe un rango de frecuencias en las que el motor no se puede operar continuamente. Los problemas de inestabilidad se disminuyen cuando la carga es grande o cuando se utilizan amortiguadores; la inestabilidad desaparece completamente cuando se utilizan sistemas de control de lazo cerrado [17]. La literatura acerca de la aplicación de motores a pasos sugiere que, para operar mas allá de la zona de inestabilidad, se debe de acelerar bruscamente el sistema cuando se pase por los rangos de frecuencias donde se encuentre la inestabilidad.

### **3.2.3: Gráfica Característica de un motor a pasos**

La información dinámica y estática de un motor a pasos comercial, generalmente se concentra en una sola gráfica conocida como la *gráfica característica* de un motor a pasos. En esta gráfica se

encuentra la información de par de *holding* así como las gráficas del par de *pull-in* y el par de *pull-out*. Estas gráficas proporcionan información suficiente para distinguir cuando un motor que se utilizará tiene las características para operar correctamente en una aplicación determinada. En la figura 3.6 se muestra una gráfica característica típica.



**Figura 3.6:** Gráfica característica típica de un motor a pasos.

En la gráfica de la figura 3.6 se definen algunas zonas de operación, dependiendo de si el punto de operación está por encima o por debajo de la gráfica del par *pull-in* o de la de curva del par de *pull-out*. Las zonas que se encuentran en la gráfica son:

- **Zona de Arranque-Parada:** En esta zona es posible arrancar el motor desde velocidad cero hasta la velocidad determinada con

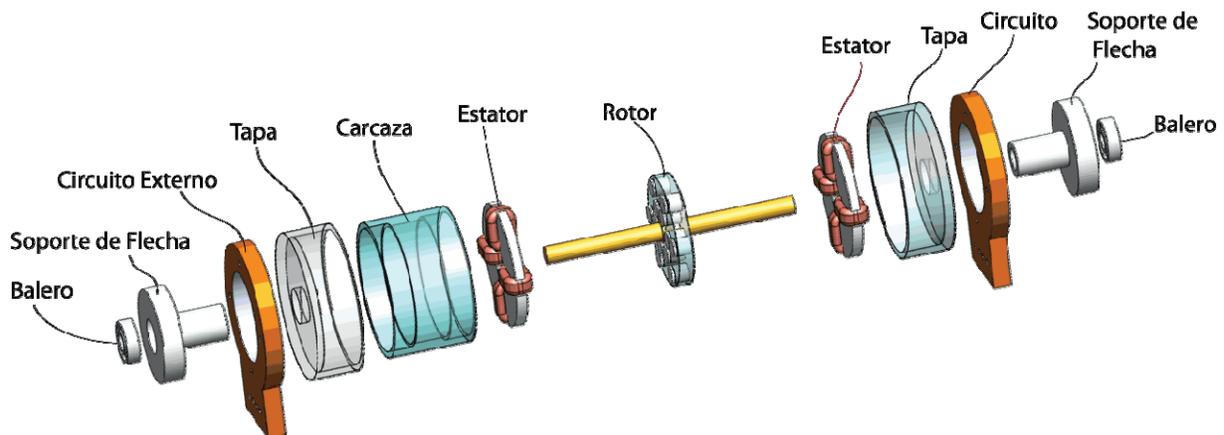
un par de carga determinado, en esta zona no es necesario usar curvas de aceleración, pues al comenzar la secuencia de encendido y apagado de las fases, inmediatamente el motor se sincronizará. De igual manera, para detener el motor, deberá de hacerse dentro de esta zona, pues solo en esta zona se podrá detener el motor a la vez que se tiene control de los pasos.

- *Zona de giro:* Para operar el motor en esta zona es necesario trazar curvas de aceleración que permitan al motor arrancar en la zona de Arranque-Parada y luego de allí llevar poco a poco la velocidad hasta ésta zona. La pendiente de la curva de aceleración depende de la carga que se tenga, en general, mientras más carga se tiene, menor es la pendiente de la curva de aceleración. Existen motores que funcionan en esta zona con hasta 10,000 Hz, sin embargo la operación continua a esta velocidad no es tan común debido al calentamiento que sufren los embobinados, pero si se trata de posicionar una carga a una posición determinada a altas velocidades no se presenta ningún problema.

## Capítulo 4: Desarrollo

### 4.1 Principio de Funcionamiento de los Motores

A diferencia de las otras clases de motores a pasos, el principio de funcionamiento de los motores diseñados para este trabajo no es mediante circuitos magnéticos (reluctancia) sino mediante la aplicación de la fuerza de Lorentz. En este principio, lo que causa el movimiento es la fuerza que aparece cuando una corriente atraviesa un campo magnético.



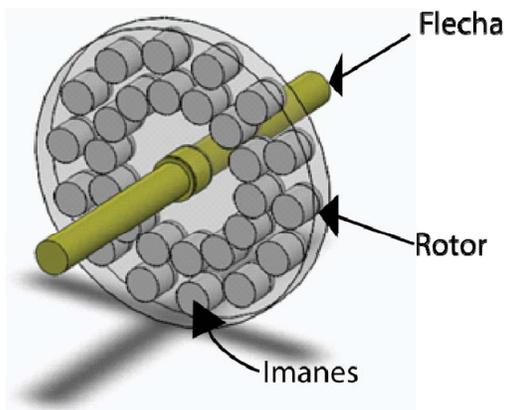
**Figura 4.1:** Explosivo del motor a pasos de fuerza de Lorentz

Sabiendo que el valor de la fuerza de Lorentz depende del valor del campo magnético y de la cantidad de corriente que lo atraviese, para maximizar el par de salida, el diseño de un motor a pasos de esta clase deberá de utilizar elementos que proporcionen un alto campo magnético y hacer fluir la mayor cantidad de corriente posible dentro del mismo.

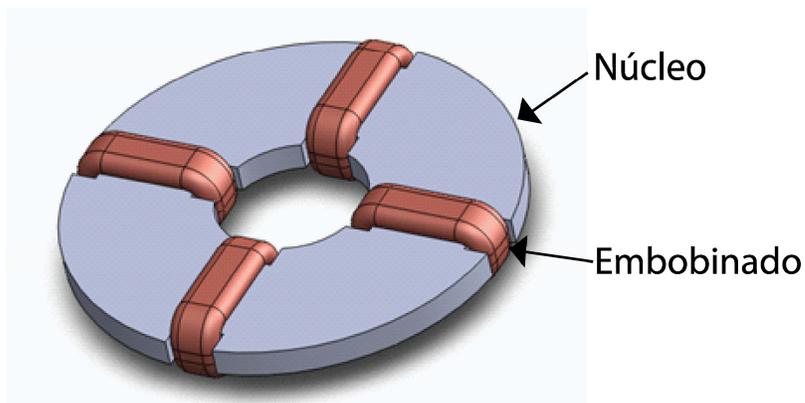
La configuración que se seleccionó para los motores, es la que se propuso en la tesis *Desarrollo de Motores a Pasos para la Automatización de Máquinas Herramientas* [18], en la figura 4.1 se muestra un explosivo de dicha configuración. El motor consiste en una carcasa que da soporte a los estatores, colocándolos a la distancia adecuada del rotor, 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 balero que mantendrá a la flecha en su lugar. El soporte del balero a su vez sirve para mantener al rotor en su posición entre los dos estatores. En el explosivo se observan además un par de circuitos en cada una de las tapas que permiten hacer las conexiones de los embobinados.

En ésta configuración, las únicas partes que interactúan para producir par son el estator y el rotor, sin embargo se manufacturan todas las demás partes con las medidas adecuadas para mantener al estator y al rotor en su posición.

Para generar el par, en este diseño se colocan en el rotor varios imanes permanentes separados un ángulo determinado como se muestra en la figura 4.2. Por su parte, el estator se diseña en forma de toroide, con cuatro embobinados, dos por cada fase. El estator con sus embobinados se muestra en la figura 4.3.



**Figura 4.2:** Rotor de un motor a pasos de fuerza de Lorentz

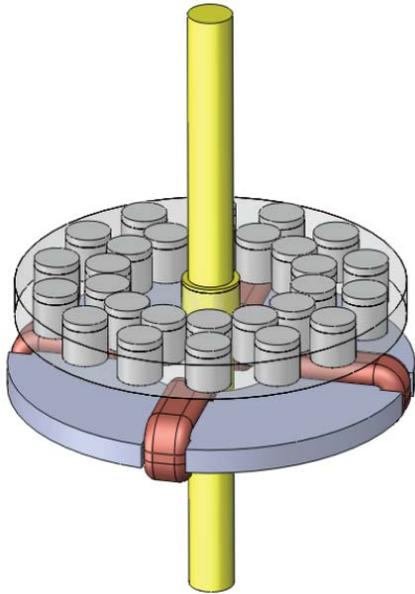


**Figura 4.3:** Estator de un motor a pasos de fuerza de Lorentz.

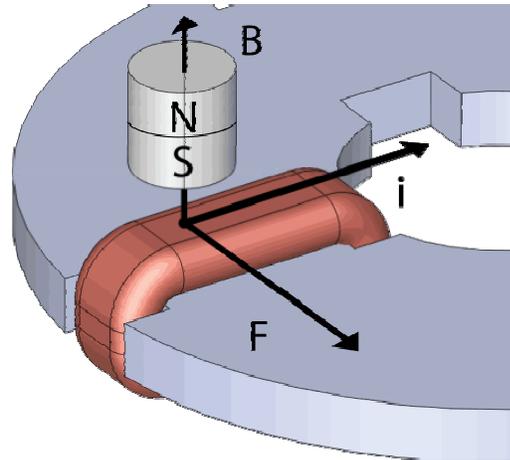
En esta configuración el rotor se coloca de manera perpendicular a los embobinados (ver figura 4.4) de manera que las líneas de flujo de los imanes y las líneas del embobinado queden con un ángulo de  $90^\circ$  entre sí, como se muestra en la figura 4.5.

En esta configuración la fuerza de Lorentz se produce al hacer fluir corriente por los embobinados del rotor. El campo magnético es provisto por los imanes en el rotor y la fuerza resultante apunta en el

sentido del producto cruz del vector de la dirección de la corriente ( $i$ ) y del campo magnético ( $B$ ).

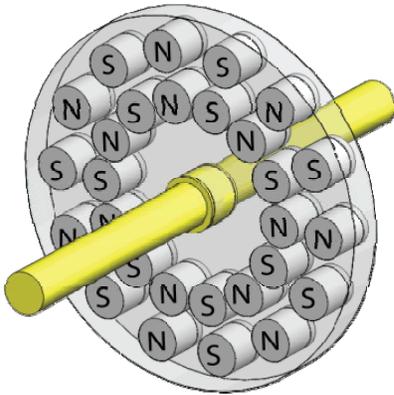


**Figura 4.4:** Posición del rotor respecto al estator.



**Figura 4.5:** Producción de la fuerza de Lorentz en el motor.

Para producir los pasos, en esta configuración los imanes del rotor se colocan alternado su polaridad como se muestra en la figura 4.6. Mientras que en el estator se forman dos fases conectando los embobinados que se encuentran colineales. Dicha conexión se hace 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 producidas generen un par en el rotor con el mismo sentido.



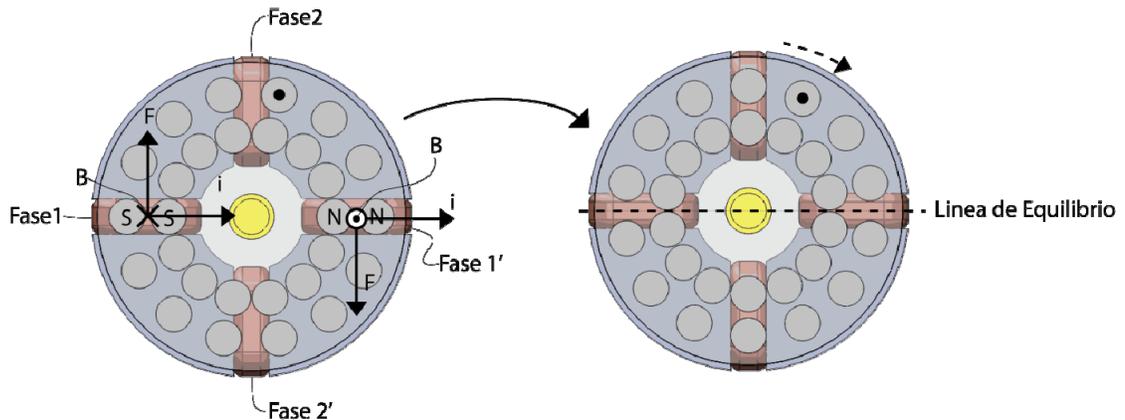
**Figura 4.6:** Colocación de los imanes en el rotor.

En este punto cabe aclarar que la ecuación de la fuerza de Lorentz (1) 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 estuviese fuera de la influencia del campo magnético. En el caso de estos motores, el conductor se encuentra fijo en el estator, mientras que los imanes que generan el campo magnético se encuentran libres debido a que el rotor en el que 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 pero con sentido contrario. De ésta manera se genera el par en el motor.

Para que el motor gire, paso a paso, se deben de energizar las fases en la secuencia correcta. Cada una de las fases se energiza como se describe a continuación:

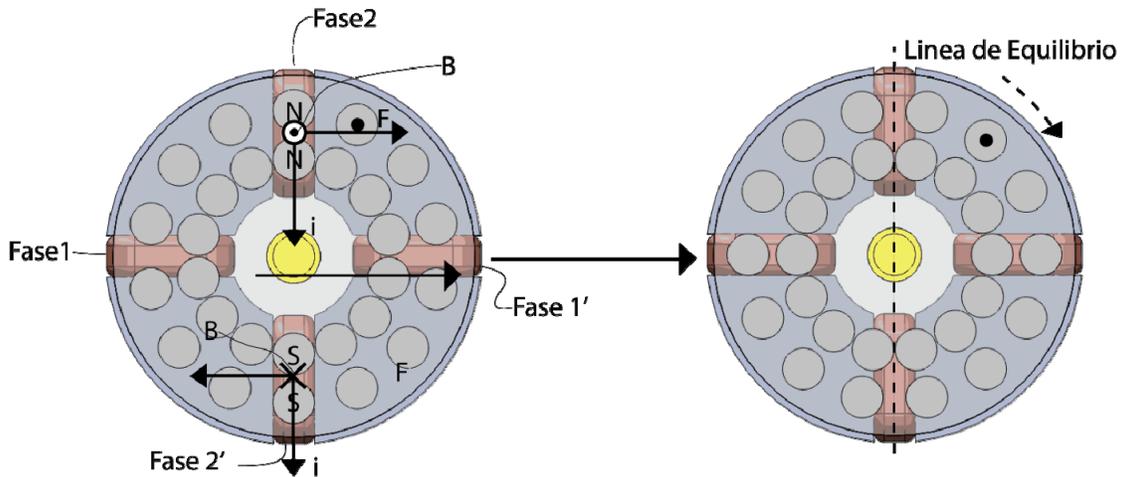
- Etapa 1: Se energiza la fase 1 del motor, al hacerlo el imán más cercano se repele por la fuerza de Lorentz, haciendo girar el

rotor, hasta que otro imán con polaridad contraria comienza a interactuar con la fase energizada; éste otro imán produce un par en sentido contrario, por lo que el rotor se detiene justo en la posición en que la fuerza de Lorentz producida en ambos imanes se equilibra, esto sucede cuando ambos imanes encuentran a la misma distancia de la fase encendida (medio paso). 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 4.7 se ilustra la primera etapa del movimiento.



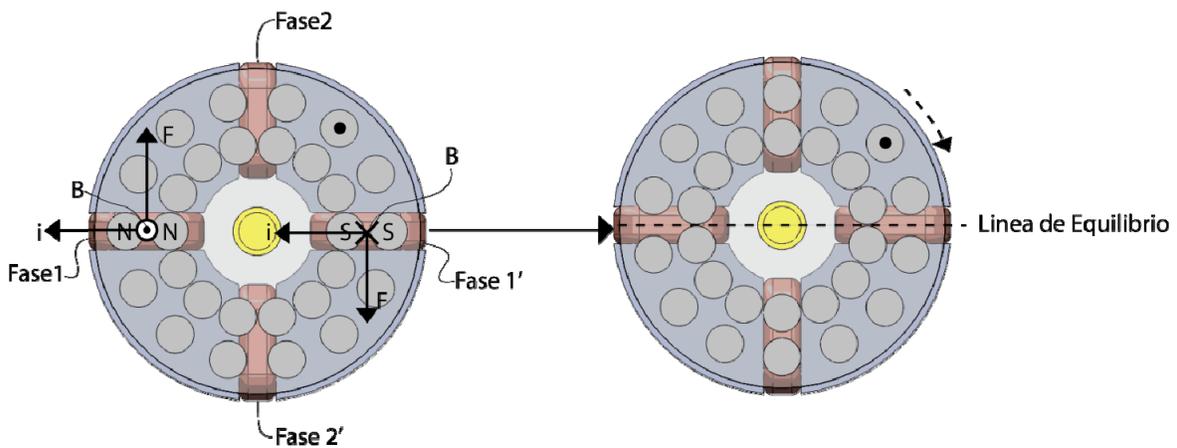
**Figura 4.7:** Generación de pasos etapa 1.

- Etapa 2: Después de la etapa anterior, un imán queda justamente encima de los bobinados de la segunda fase, de tal manera que su flujo magnético se encuentra influyendo directamente sobre sus bobinados. En este punto se energiza la fase 2 y provocando que el rotor gire hasta que, los pares producidos por las fuerzas de Lorentz que aparecen en los dos imanes cercanos a la fase 2 se equilibren. En la figura 4.8 se ilustra esta etapa.



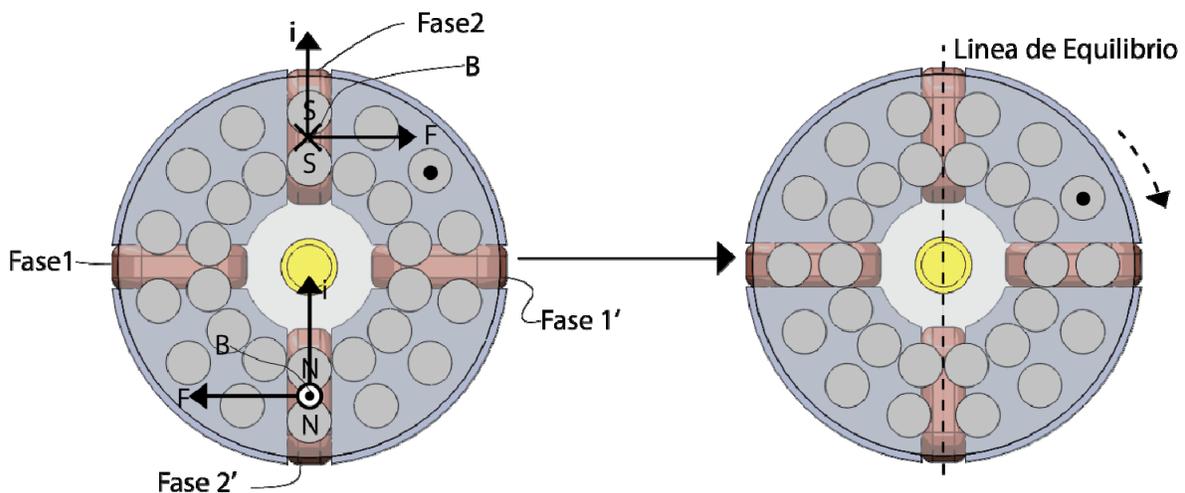
**Figura 4.8:** Generación de pasos etapa 2.

- 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. 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 4.9 se ilustra esta etapa.



**Figura 4.9:** 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 4.10 se ilustra esta etapa.



**Figura 4.10:** 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 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.

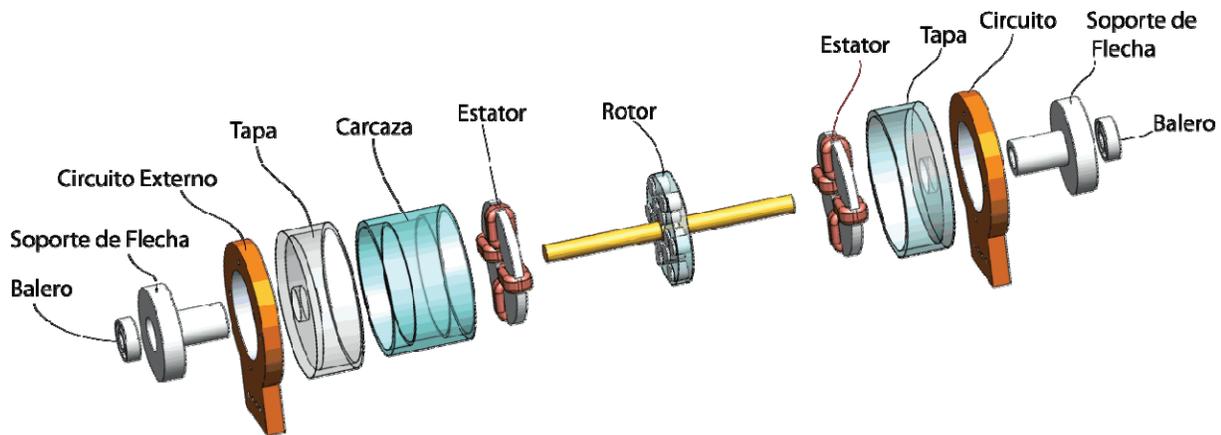
En la descripción de cómo se genera el movimiento, se observa que cada vez que se energiza una de las fases, el rotor avanza la mitad del ángulo que hay entre los imanes del rotor, por lo que el total de pasos de un motor que opera bajo estos principios es del doble del número de imanes que tiene en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

En la configuración seleccionada se utilizan dos estatores con el fin de aumentar el par de salida del motor. Estos estatores se colocan uno a cada lado del rotor. Para que el motor funcione correctamente, las fuerzas de Lorentz producidas por la interacción de las cuatro bobinas de cada fase, dos en cada estator, 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 provocando que el motor no produjera un par.

Para este trabajo, se construyeron dos motores, uno con un rotor de 25mm de diámetro (de ahora en adelante referido como *motor de 25mm*) y otro con un rotor de 20mm de diámetro (de ahora en adelante referido como *motor de 20mm*). Para ambos motores, el diseño es similar, sólo se modifican las dimensiones de todas las piezas para ajustarse a las del rotor.

## 4.2 Manufactura de los motores

En esta sección se describen algunos aspectos de las distintas piezas empleadas en los motores a pasos de este trabajo (figura 4.11)

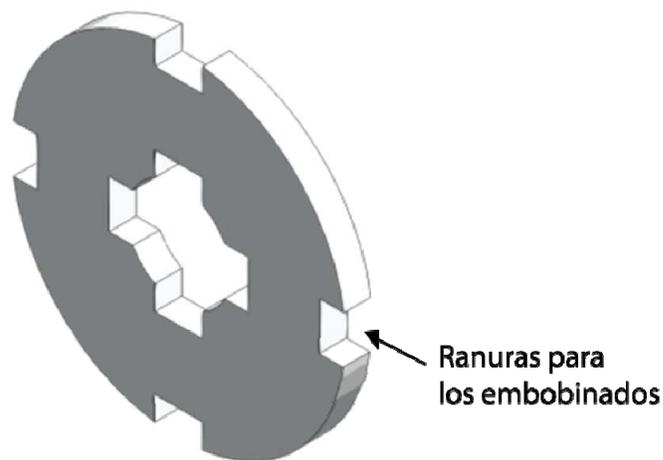


**Figura 4.11:** Explosivo de uno de los motores a pasos construidos para este trabajo.

### *Estator*

El estator, está formado por los embobinados y el núcleo. El núcleo deberá de ser de material paramagnético, pues se requiere que el circuito magnético creado por las bobinas pase a través de él. Por otra parte, el núcleo debe de ser de un material resistente a temperaturas altas, de alrededor de 50°C [18]; y deberá ser buen conductor del calor, ya que al estar en contacto directo con las bobinas funcionará también como radiador de calor. Por estas razones el material que se seleccionó para el núcleo de ambos motores fue el

acero. Las dimensiones del núcleo determinan las dimensiones de la carcasa, por lo que el diámetro del núcleo debe de ser ligeramente mayor que el diámetro del rotor para que al girar 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.



**Figura 4.12:** *Núcleo del estator del motor a pasos.*

El núcleo se maquinó con la ayuda de una máquina de control numérico (CNC). Los programas necesarios para operar dicha máquina se desarrollaron con la ayuda de un sistema CAM (*Computer Aided Manufacture- Manufactura Asistida por Computadora*).

Una vez que se tuvieron maquinados los núcleos de ambos motores, dos por cada motor, 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 directo, puede haber un corto circuito entre las fases, o entre las bobinas de la misma fase, lo cual puede sobrecargar a la fuente, sobrecalentar el embobinado o afectar el desempeño del motor. En la figura 4.12 se muestra una vista isométrica de uno de los núcleos manufacturados.

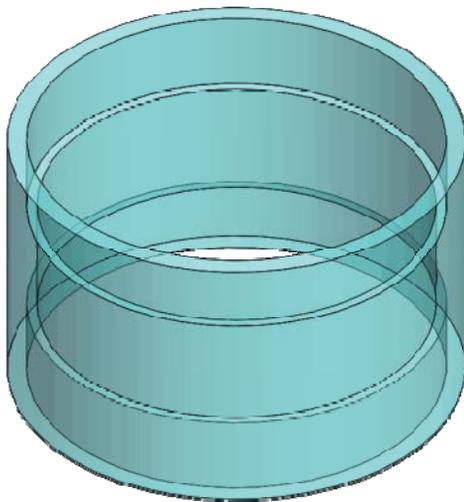
Una vez que se tuvieron barnizados los núcleos, se procedió a enrollar las cuatro bobinas de cada uno de los núcleos. El sentido en que se embobina cada una de ellas debe de ser el correcto según el principio de funcionamiento, de lo contrario el motor no producirá par, ya que la fuerza de Lorentz producida por uno de los embobinados contrarrestaría a la fuerza de Lorentz producida por el otro; el embobinado se hizo a mano. El número de vueltas que tiene cada una de las bobinas del mismo motor debe de ser el igual, para que los pasos del motor sean uniformes. Si las bobinas del motor no tienen el mismo número de vueltas, cada una de ellas producirá una fuerza de Lorentz con una magnitud diferente, lo cual hará que el par no sea constante cuando el motor se encuentre girando y que el avance por cada paso no sea uniforme.

En cada estator bobinas de la misma fase, se sueldan entre sí, para formar un circuito en serie. Los extremos que no se sueldan, deben de ser lo suficientemente largos para que puedan pasar a través de la tapa y hasta circuito externo.

Finalmente, para evitar cualquier riesgo de corto circuito, a las bobinas se les agrega un barniz especial para embobinados y conductores que además de aislar las bobinas les proporciona un escudo contra el roce del motor. Durante este paso es importante no hacer gruesa la capa de barniz pues de lo contrario ésta rozará con el rotor.

### *Carcasa*

Las medidas de esta pieza están determinadas por el diámetro del estator, dado que debe 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 que está en medio 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.



**Figura 4.13:** *Carcasa del motor a pasos*

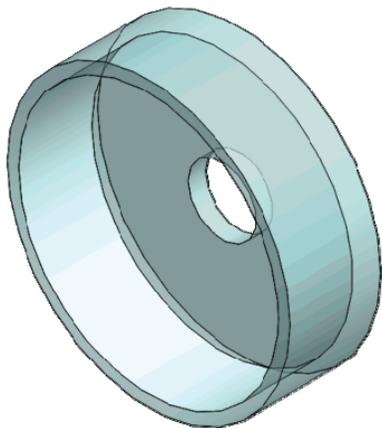
Por la forma que tiene esta pieza (figura 4.13), lo más conveniente es manufacturarla en un torno. La principal dificultad que

tiene esta pieza es que para maquinarla hay que desmontarla, darle la vuelta y volverla a colocar en las mandíbulas. Si no se tiene cuidado, el eje que une a los centros de los distintos maquinados puede quedar muy desalineado, provocando que los estatores queden desalineados y que rocen con el rotor.

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.

#### *Tapas del Motor*

Las dimensiones de esta pieza están determinadas por las dimensiones externas de la carcasa y por el diámetro de los soportes de las flechas. Esta pieza se fija en la carcasa por ajuste.



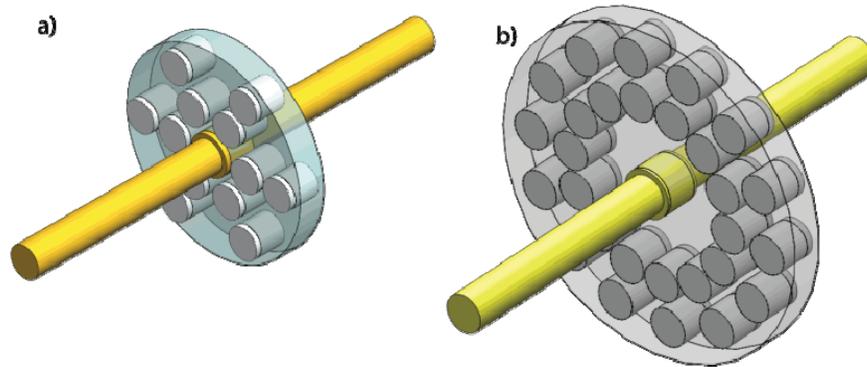
**Figura 4.14:** *Tapa del motor a pasos.*

Por su forma (figura 4.14), estas piezas pueden ser fabricadas en una fresadora o en un torno. En el caso de este proyecto, estas piezas fueron manufacturadas en una fresa CNC, con la ayuda de un software CAM.

A estas piezas, se les pega el circuito externo, por lo que se les hacen 4 pequeños barrenos para pasar por allí los cables con los que se conectan a las fases. Estos barrenos deben de estar alineados con los barrenos en la placa del circuito para evitar que el cable sea trozado durante el ensamble del motor.

### *Rotor*

Para aumentar la resolución de los motores de éste trabajo, lo más conveniente sería aumentar el número de imanes que se tienen en el rotor, sin embargo, el número máximo de imanes está determinado por las dimensiones del rotor y de los imanes mismos. Para mantener la misma cantidad de campo magnético se utilizaron imanes de las mismas dimensiones en ambos motores. En el rotor del motor de 20mm se colocaron 6 pares de imanes (figura 4.15a) mientras que en el rotor del motor de 25mm (figura 4.15b) se colocaron 14 pares de imanes. Los imanes se colocan en pares para poder aumentar la longitud de los embobinados que estarán bajo la influencia del campo de los imanes e incrementar la fuerza de Lorentz producida.



**Figura 4.15:** *Rotores manufacturados para los motores de este trabajo: a)Rotor para el motor de 20[mm]; b)Rotor para el motor de 25[mm]*

Las dimensiones de la flecha del rotor están determinadas por la longitud del motor que se diseña, en este caso, el par producido por el motor es independiente de la longitud total del motor, por lo que se procuró que ésta fuera sólo la necesaria, de tal manera que la flecha solo mide lo suficiente para pasar a través de todo lo largo del motor y para poder montar poleas para las pruebas. La manufactura de la flecha del rotor se realizó en un torno, es importante cuidar sus dimensiones, pues debe de entrar con buen ajuste en los baleros y en el centro el centro del rotor

La parte de plástico del rotor se maquinó en una fresadora CNC con ayuda de un software de CAM. En los barrenos se insertan los imanes de tierras raras, estos imanes se sujetan por un ajuste que no debe ser muy apretado, para evitar que el rotor se quiebre. Estos imanes deben de estar bien colocados, hasta el fondo del barreno, para evitar que haya rozamientos con las bobinas del estator. En la

figura 4.14 se muestran las ilustraciones de el rotor del motor de 20mm (figura 4.15a) y del rotor de 25mm (figura 4.15b).

Una vez que se tienen la flecha y el rotor con los imanes en su lugar, se introduce la flecha en el centro del rotor, de tal manera que el rotor quede perpendicular a la flecha. Si el rotor quedase desalineado, este provocará vibraciones al girar, y puede terminar rosando las bobinas del estator o destruyéndose.

### *Soportes de la Flecha*

Las dimensiones de esta pieza están determinadas por el espacio que queda entre los embobinados de los estatores y el rotor. En estas piezas, lo más importante es que la cara que va a estar en contacto con el rotor se mantenga totalmente lisa, para que no lo frene demasiado mientras esté girando. Estas piezas entran por ajuste en las tapas y se refuerzan con adhesivo para evitar que se mueva por las vibraciones.

### *Circuito Externo.*

El propósito de este circuito es facilitar la conexión del motor con el controlador, con este circuito se puede alimentar al motor con un cable común y no directamente a los alambres bobinas. Esto hace más estable la conexión eléctrica del motor. En la figura 4.16 se muestra una fotografía externa del circuito manufacturado para los motores de este trabajo.



**Figura 4.16:** *Circuito externo del motor a pasos.*

### *Ensamble del motor*

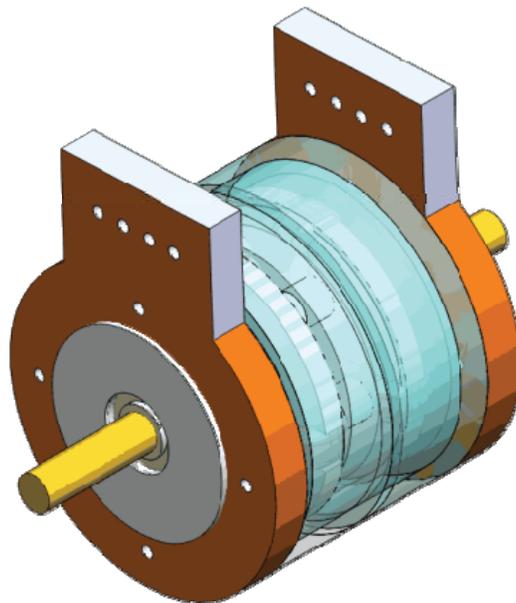
El ensamble de estos motores se realiza tomando como pieza central al rotor. El rotor se inserta dentro de la carcasa y luego se colocan ambos estatores en la misma. Hay que cuidar que las bobinas de la misma fase del estator queden bien alineadas con las bobinas del otro estator, de lo contrario el motor nos entregará menor par del que se espera o incluso puede dejar de 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 fija en la carcasa con ayuda de un adhesivo.

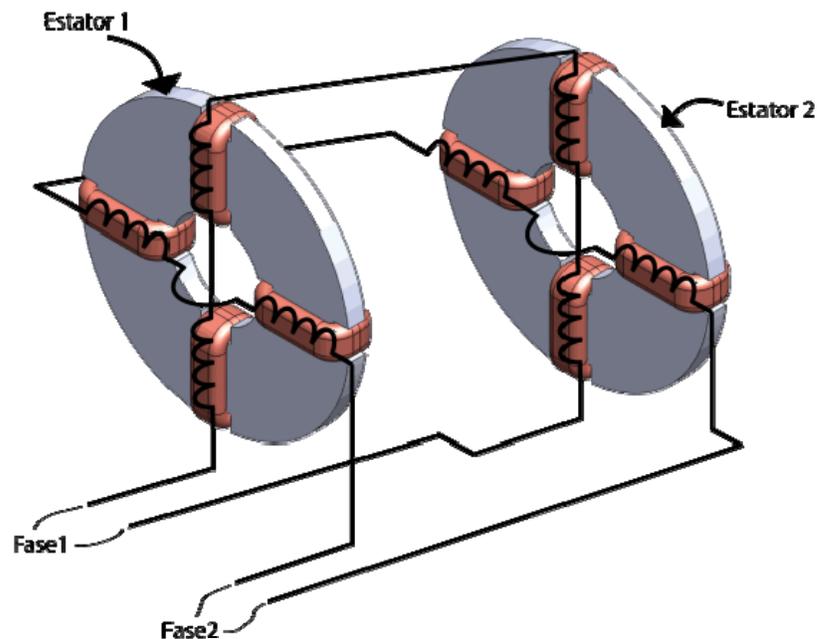
Una vez que se ensamblaron la carcasa, con el rotor y con los estatores en su lugar. Se deben de ajustar los soportes de la flecha, disminuyendo poco a poco su longitud, hasta que el rotor tenga un poco de juego pero que no choque con los embobinados al girar. Si el

motor se deja sin la tolerancia necesaria, la fricción entre el rotor y los soportes será muy alta resultando en una reducción importante de eficiencia.

Una vez que se ajustan los soportes, se fijan en las tapas y éstas se colocan en la carcasa. Finalmente, se coloca el circuito en su lugar, con un adhesivo, para después se soldar los cables de las bobinas al circuito externo. En la figura 4.17 se muestra el ensamble general del motor.



**Figura 4.17:** *Ensamble general de los motores a pasos.*



**Figura 4.18:** Esquema de las conexiones de los motores a pasos.

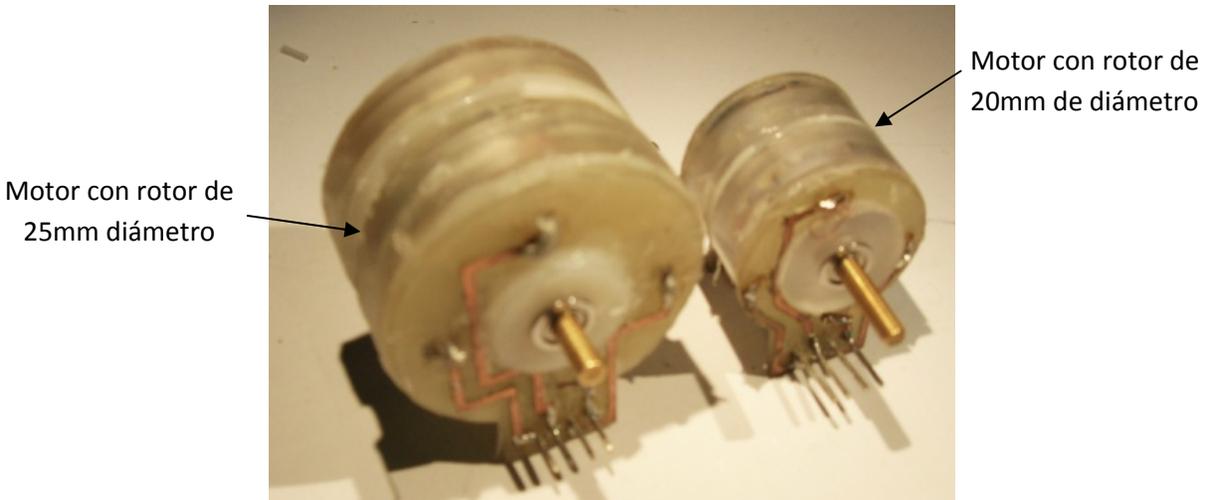
Como se puede observar, el motor no tiene conexión interna alguna por lo que las conexiones entre las fases de los dos estatores se hacen mediante un cable externo, el cable externo cierra el circuito que se describe en la figura 4.18.

Cabe mencionar, que los embobinados de cada fase se conectan en serie para tener un mejor control y lectura de la corriente que fluye en los ellos; ya que, con este tipo de conexión la corriente que entra en una fase es la misma que pasará por cada uno de los embobinados. En cambio, si la conexión de los embobinados fuera en paralelo, cada embobinado tendría la corriente determinada por su resistencia, y la corriente en cada embobinado sería diferente.

	Motor de 25[mm]	Motor de 20[mm]	Unidades
Diámetro del Rotor	25	20	[mm]
Diámetro Externo	31	25	[mm]
Largo del Motor	24	24	[mm]
Pasos por revolución	26	12	
Angulo por paso	12.86°	30°	[°]
Resistencia por fase	24	12	[Ω]
Longitud del embobinado.	14	7.5	[mm]
Enrollados por bobina	150	100	vueltas
Calibre del embobinado	34	35	(AWG)

**Tabla 4.1:** Características de los motores manufacturados.

Finalmente, tras haber manufacturado los dos motores de este trabajo, se generó la tabla 4.1, enumerando sus principales características. En la figura 4.19 se muestra una fotografía de los motores construidos; del lado derecho se encuentra el motor de 20mm y del lado izquierdo se encuentra el motor de 25mm.

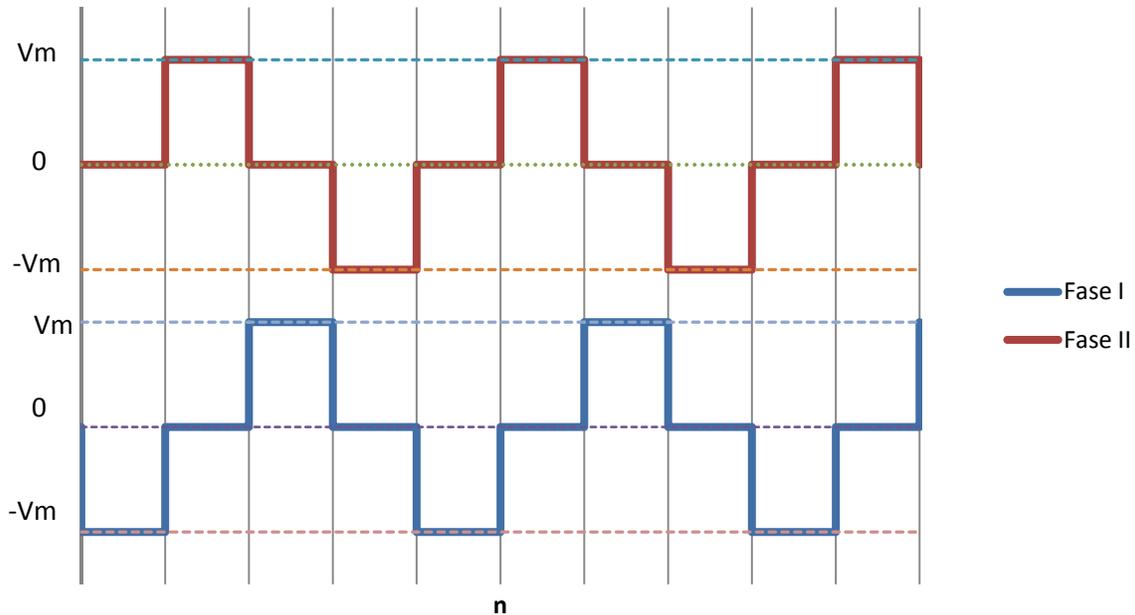


**Figura 4.19:** Fotografía de los motores a pasos construidos para este trabajo

### **4.3 Control de los motores**

Para controlar el motor a pasos se requiere de un circuito que excite las fases en la secuencia descrita anteriormente. Generalmente, los motores a pasos convencionales requieren que se exciten dos de sus fases al mismo tiempo, en el caso de los motores a pasos de fuerza de Lorentz diseñados para este trabajo se debe de excitar sólo una fase a la vez, por lo que mientras una de las fases se encuentre excitada, la otra fase debe de estar con excitación nula. Debido a esta diferencia con los motores a pasos convencionales es que no se puede utilizar un controlador común para motores a pasos.

En la figura 4.20 se observa la secuencia con que deben ser excitadas las fases para generar los pasos.



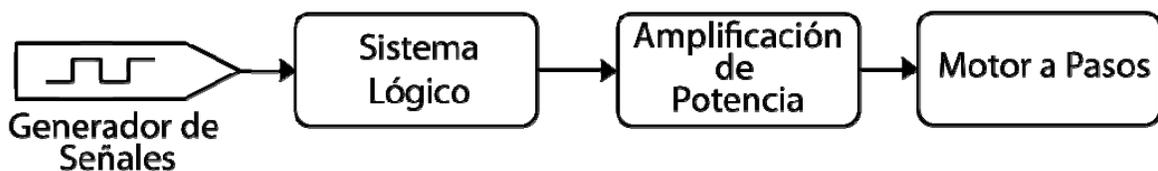
**Figura 4.20:** Secuencia de excitación de las fases de los motores a pasos.

Para implementar la secuencia se requiere de un circuito que genere voltajes en un sentido y en otro en la misma salida ( $V_s$  y  $-V_s$ ). Esto se podría lograr con el arreglo de transistores conocido como puente H, sin embargo el puente H convencional sólo tiene dos estados, excitación positiva y excitación negativa, pero no cuenta con un estado de de excitación nula, por lo que con dicho circuito, no podríamos generar la secuencia necesaria.

Aunque la secuencia para el motor se puede lograr armando un circuito con transistores convencionales, es preferible buscar algún circuito integrado que pueda adaptarse a nuestros requerimientos, ya que dichos circuitos presentan mayor estabilidad, menos ruido y disminuyen la cantidad de componentes en el circuito; además de que

en caso de alguna falla es más fácil identificar y reemplazar un circuito integrado que localizar cuál de todos los componentes está fallando.

Después de una búsqueda, se seleccionó el circuito integrado modelo L293D [19], que básicamente es un puente H de cuatro canales. Dentro de las características de este circuito están la alta tolerancia al ruido, capacidad de proporcionar corrientes de hasta 1[A] por canal y compatibilidad con señales lógicas TTL (*Transistor-Transistor Logic*). La propiedad más importante de este circuito para nuestro diseño es que cuenta con dos puentes H integrados, por lo que con este mismo circuito integrado se puede controlar las dos fases; otra característica importante es que cada uno de los puentes H cuenta con la función de *enable*, mediante la cual se puede hacer que los puentes H se encuentren apagados en algún momento. Para poder utilizar éste circuito integrado, se implementó además un circuito lógico que alimentara con la secuencia correcta las entradas del circuito L293D.



**Figura 4.21:** Diagrama de bloques del control de los motores a pasos.

En la figura 4.21 se muestra un esquema de las partes del controlador que se utilizó para hacer funcionar a los motores. En las

pruebas que se realizaron para este trabajo, la señal de reloj que se utilizó provenía de una fuente generadora de pulsos.

Una vez que se implementó el controlador, se analizaron las salidas de voltaje con que se excitaba el motor y se encontró que al encender y apagar ambas fases, se generaba ruido. Este ruido causaba que los componentes lógicos cambiaran de estado rápidamente provocando la pérdida de la secuencia de excitación del motor. Este fenómeno se produjo porque la carga conectada al controlador es inductiva, por ser bobinas con núcleo de acero, así que analizando la ecuación de voltaje en una carga inductiva, ecuación siguiente:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Se observa que la ecuación describe que, si se hace un cambio brusco en la corriente, el voltaje aumenta también bruscamente. Esto es precisamente lo que sucedía en el controlador, ya que al apagarse cualquiera de las fases, se hace en forma de una señal cuadrada, lo cual provoca que haya un cambio brusco en la corriente que circula por el embobinado, esto causa que se cree un voltaje alto que provoca una corriente que oscila dentro de los embobinados hasta que se disipa a través de la resistencia de la misma. Esta oscilación de voltaje y corriente es la que provoca el ruido en los circuitos lógicos.

Para solucionar este problema, se colocaron diodos entre la salida del controlador y las fases del motor, de tal manera que dichos diodos dirigen los picos de corriente que se generan en las bobinas, al

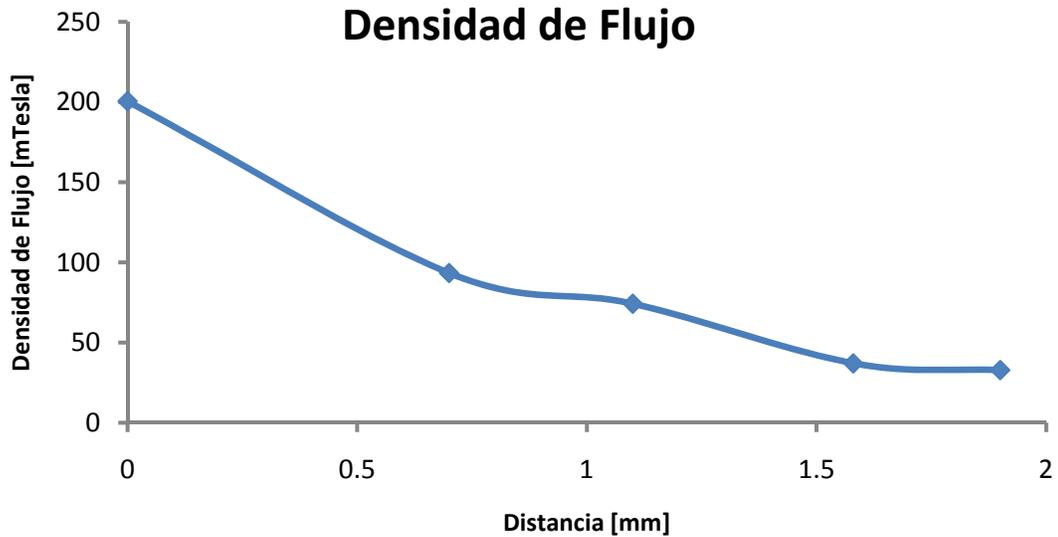
encenderse y apagarse, hacia tierra o hacia la fuente de voltaje, evitando así el ruido.

## **4.4 Caracterización de los motores a pasos**

### **4.4.1 Medición de la caída del campo magnético**

Para determinar la distancia conveniente para colocar los imanes del rotor con respecto de los embobinados del estator, se hizo una medición de cómo caía la densidad de flujo magnético de los imanes conforme a la distancia.

Para llevar a cabo esta medición se fijó el rotor en un soporte, con los imanes ya montados, mientras que se colocó la sonda de un teslametro en otro. De esta manera se tenían fijos ambos elementos y se podía tomar una lectura confiable. Con este arreglo, se fue variando la distancia entre la sonda y los imanes para obtener las lecturas del campo magnético a distintas distancias. Este proceso se repitió con los distintos pares de imanes del rotor, para tener una lectura promedio, pues aunque el proveedor reporta un valor determinado de la densidad de flujo magnético de sus imanes, existen variaciones en cada uno de ellos. Los datos obtenidos en esta prueba se muestran en la gráfica de la figura 4.22 donde se muestra cómo se comporta la densidad de flujo magnético conforme se va a alejando del imán.



**Figura 4.22:** *Densidad de Flujo vs. Distancia.*

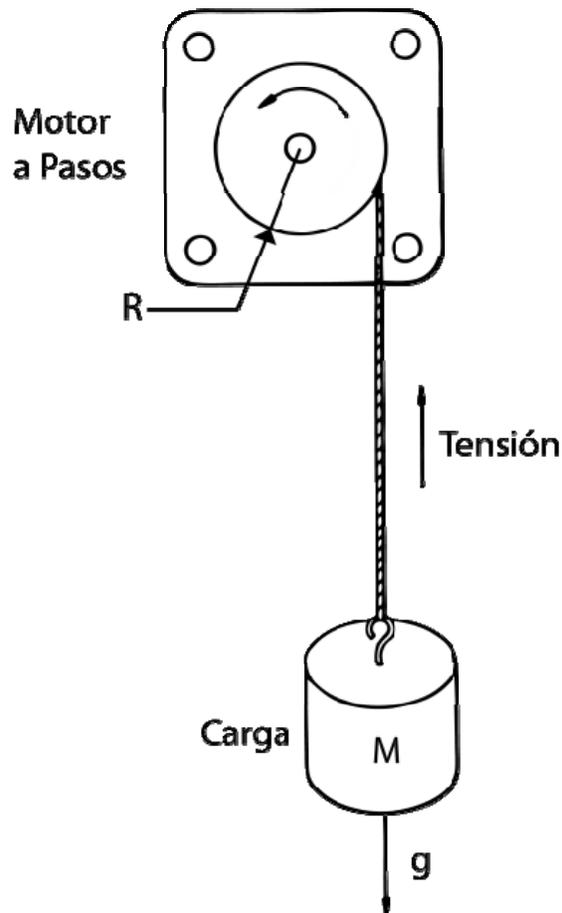
La información de esta gráfica ayudó al diseño de la carcasa de los motores construidos para este trabajo, pues confirmó que lo más conveniente era reducir al mínimo la distancia entre los embobinados y los imanes.

#### 4.4.2: Pruebas de par de *holding*

Como se mencionó anteriormente, el par de *holding* 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 una de sus fases se encuentra energizada.

Para llevar a cabo esta prueba, se construyó una polea con diámetro un conocido; a dicha polea se enredó un hilo y en el otro

extremo del se colocó un recipiente de 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 encendida, 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 y la polea comience a girar. De esta manera, conociendo la masa total que está colgando de la polea en ese momento, se puede obtener el par de *holding*. En la figura 4.23 se muestra un diagrama de cómo se realizó la prueba.



**Figura 4.23:** Diagrama de la prueba de holding torque. [22]

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

$$\tau_{holding} = M g R \quad (4)$$

donde:

$\tau_{holdin}$  = par de *holding*

$M$ =Masa de la carga.

$g$ =aceleración de la gravedad (9.78m/s<sup>2</sup>)

$R$ = Radio de la polea.

Si bien el par de *holding* de un motor a pasos comercial sólo es el que se mide a voltaje o corriente nominal, en las pruebas realizadas a los motores de este trabajo se hizo un barrido a distintas corrientes hasta llegar a la corriente nominal para observar su comportamiento.

Además de las mediciones del par de *holding*, también se realizó un cálculo del para obtener el par de *holding* teórico, dicho cálculo se hizo partiendo de la fuerza de Lorentz que se produce en una de las bobinas:

$$F_L = N * B * i * l \quad (5)$$

donde:

$F_L$ =Fuerza de Lorentz

$N$ = Número de vueltas en el embobinado.

$B$ =Densidad de flujo magnético.

$i$ =corriente eléctrica.

$l$ =longitud del conductor.

Aplicando la tercera ley de Newton, se tiene que la fuerza que ejercen los imanes del rotor sobre el embobinado es la misma que la que ejerce el embobinado sobre los imanes del rotor, por lo que el par que ejerce la fuerza de Lorentz en el rotor está determinado por la siguiente ecuación:

$$\tau_L = F_L * R_r \quad (6)$$

donde:

$\tau_L$ =Par generado por la fuerza de Lorentz.

$F_L$ =Fuerza de Lorentz.

$R_r$ =radio del rotor.

El radio del rotor que se considera para la ecuación anterior no es el radio externo del ensamble del rotor, sino la distancia media a la que se encuentran del centro los imanes en el rotor. La ecuación (6) sólo considera a una de las bobinas de la fase, por lo que habrá que multiplicarla por dos para obtener el par de *holding* generado por las bobinas de una de las fases ( $\tau_H$ ):

$$\tau_H = 2\tau_L \quad (7)$$

donde:

$\tau_H$ =Par de *holding*.

Concentrando las ecuaciones (6) y (7) en una sola queda, que la ecuación del par de *holding* es la siguiente:

$$\tau_H = 2N * B * i * l * R_r \quad (8)$$

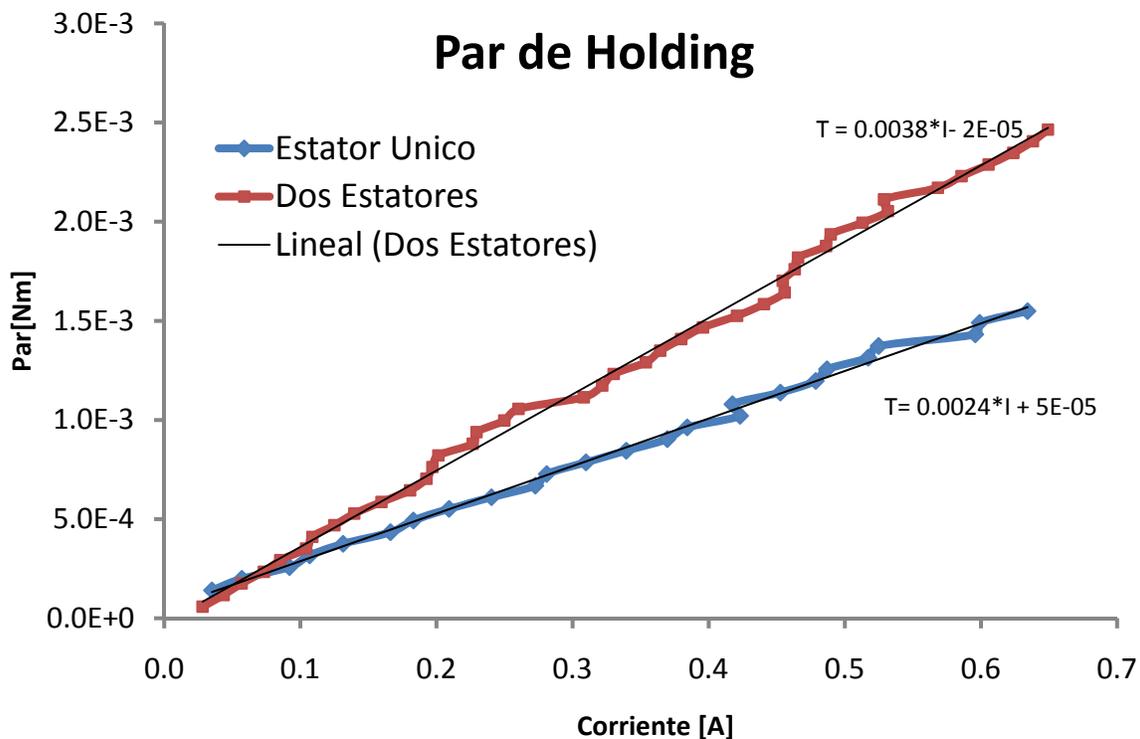
La ecuación (8) describe el par de *holding* para cuando se encuentra encendida una de las fases en uno de los estatores. Sin embargo, para cuando se tienen dos estatores, como en el caso de los motores de este trabajo, el par producido es el doble.

$$\tau_H = 4N * B * i * l * R_r \quad (9)$$

La primera prueba de par de *holding* que se realizó, fue para observar cómo cambia el éste par cuando los motores funcionan con uno o dos estatores. En teoría, como se mencionó anteriormente, el par de *holding* generado por un motor con dos estatores debería de ser el doble que el par de *holding* generado por un motor con un solo estator.

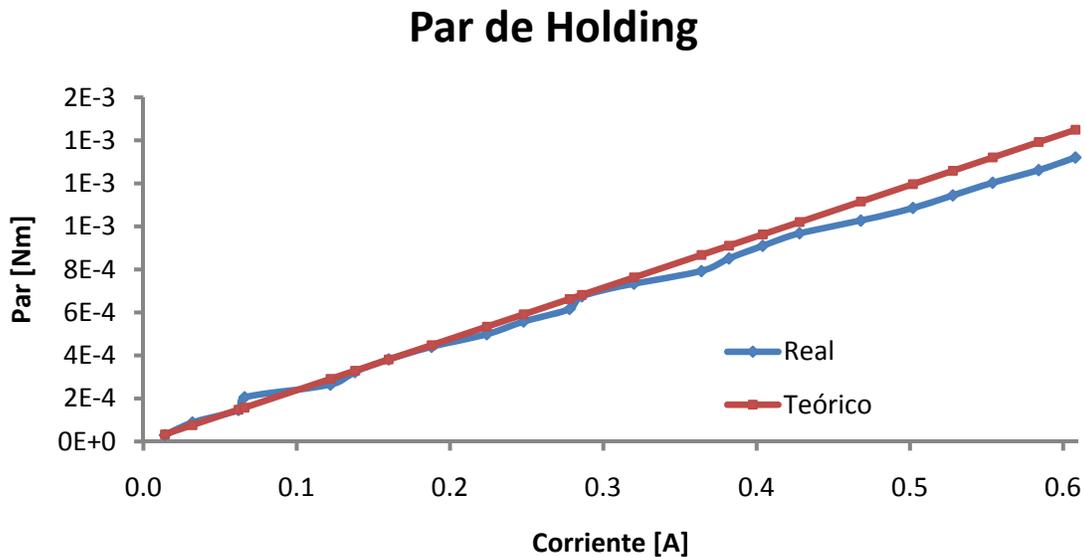
En la gráfica de la figura 4.24, donde se reporta lo anterior, se hicieron dos aproximaciones al modelo de la línea recta de los valores obtenidos. Se esperaba que el valor de la pendiente del motor con dos rotores fuera del doble de la pendiente del motor con un estator, sin embargo sólo se midió un incremento del 58% *holding* torque. Este aumento disminuido se debe a dos razones: la primera es que al sólo haber un estator, y por ser éste de material ferromagnético, los imanes se atraen con él, provocando una presión mayor sobre el soporte de la

flecha que se encuentra en ese lado del motor y por lo consiguiente una mayor fuerza de fricción que frena al rotor, aparentando tener mayor *holding* torque; la segunda razón por la cual el par no incrementó como se esperaba es que el rotor no se encuentra perfectamente centrado, se encuentra cercano mas a uno de sus estatores que al otro, por lo que al agregar el segundo estator, el par que se produce no es exactamente el doble. Esta información deberá utilizarse para diseños futuros de éste tipo de motores.



**Figura 4.24:** Gráfica de par de Holding vs Corriente, para uno y dos estatores.

Además de la prueba anterior, se hicieron pruebas del par de *holding* a ambos motores. En la figura 4.25 se muestra la gráfica creada con los datos arrojados de la medición de par de *holding* para el motor de 20mm de diámetro.

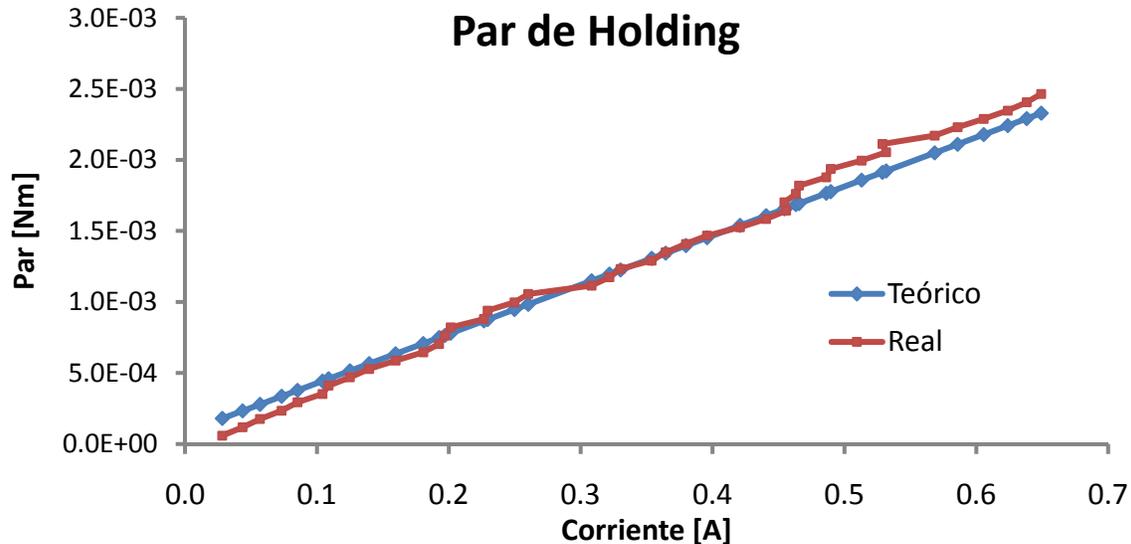


**Figura 4.25:** Gráfica de Par de Holding vs Corriente – Motor de 20mm.

En la gráfica de la figura 4.25 se observa que el comportamiento del par de *holding* es lineal en el motor de 20mm. Además a corriente nominal de 0.6[A] el par de *holding* es de 1.320E-3 [Nm].

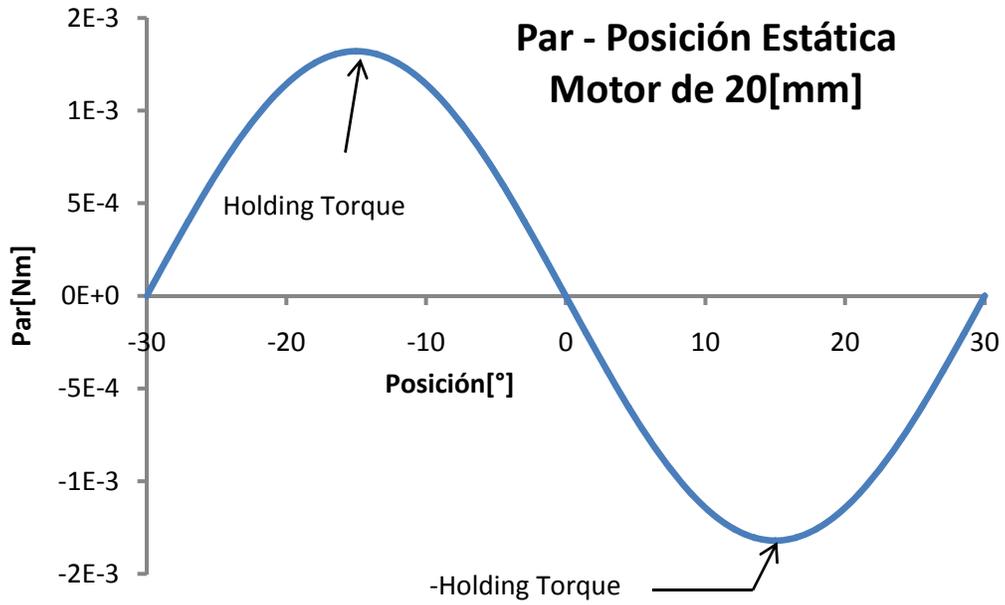
Para el motor de 25 mm los datos de par de *holding* se observan en la gráfica de la figura 4.26. Los resultados de esta prueba arrojaron que a corriente nominal de 0.6[A] el par de *holding* es de 2.288E-3[Nm] y que, al igual que en el otro motor, el comportamiento es lineal

En las gráficas de par de *holding* de ambos motores (figura 4.25 y 4.26) se observa que el cálculo teórico con la ecuación (9) es bastante cercano a la lectura registrada en la prueba, esto valida el cálculo teórico del par de *holding* y confirma que el motor está produciendo el par esperado.

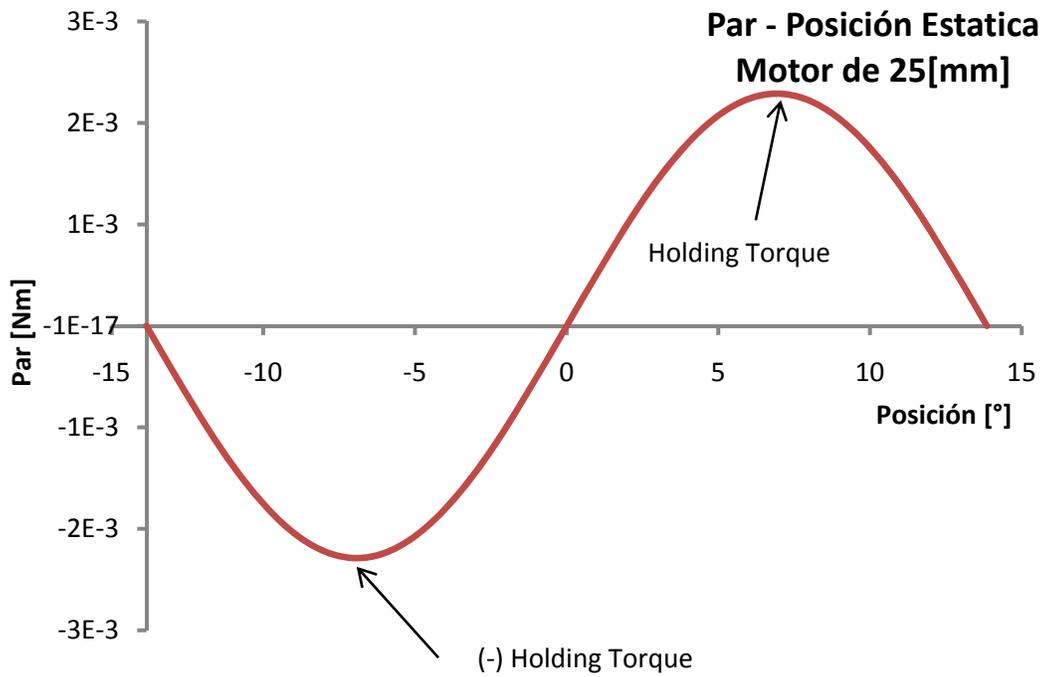


**Figura 4.26:** Gráfica de par de Holding vs Corriente – Motor de 25mm

Para aplicaciones donde es muy importante la precisión en la posición, la información del *holding* torque a corriente nominal nos permite hacer las gráficas de par-posición estática, que son una aproximación sinusoidal del par de *holding* conforme el rotor se aleja de la posición de equilibrio. En la figura 4.27 se encuentra la gráfica para el motor de 20mm y en la figura 4.28 se muestra la gráfica para el motor de 25mm. Ambas gráficas permiten conocer la desviación que tendrá el rotor de su posición esperada cuando está sometido a una determinada carga.



**Figura 4.27:** Gráfica de Par vs. Posición Estática – motor de 20mm



**Figura 4.28:** Gráfica de Par vs. Posición Estática – motor de 25mm

#### 4.4.3: Pruebas de par de *pull-in*

El par de *pull-in* es la máxima carga con la que el motor se puede sincronizar a determinada frecuencia. Para realizar esta prueba se utilizaron un método similar al utilizado para el par de *holding*. En este caso primero se coloca una carga en el recipiente, y se enciende el motor, pero con la señal de reloj apagada, por lo que el motor estará estático 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 de *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*.

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

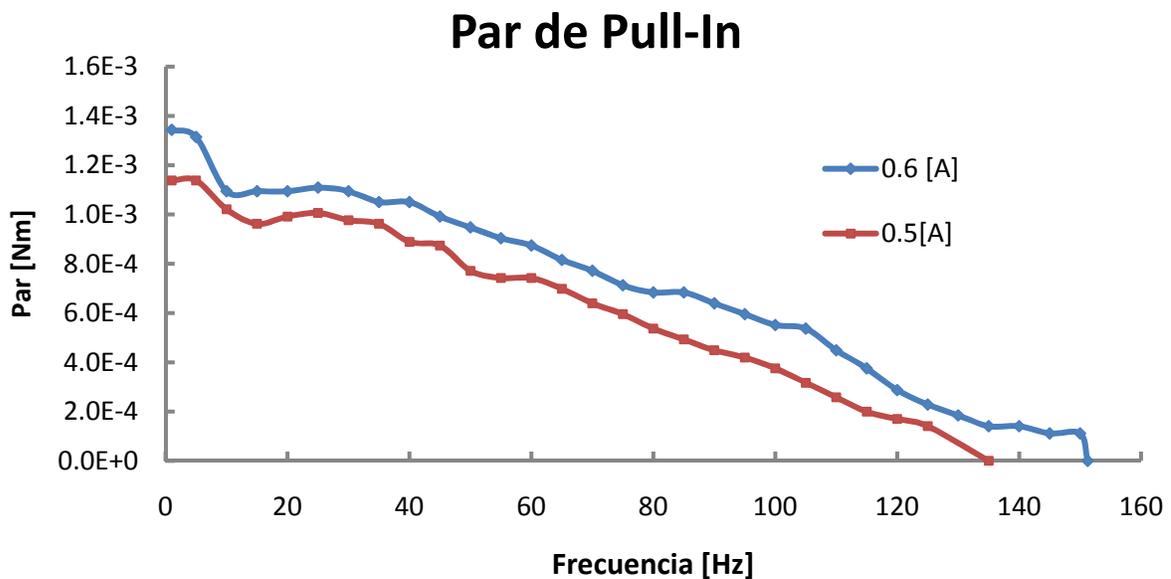
$$\tau_{pull-in} = M g r \quad (10)$$

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 los dos motores que se construyeron. Normalmente la prueba se hace sólo con la corriente nominal, sin embargo, en este caso se hicieron dos pruebas para cada motor, una a 0.5[A] y otra a 0.6[A], con la finalidad de

observar cómo se comporta este parámetro a distintas corrientes en cada motor.

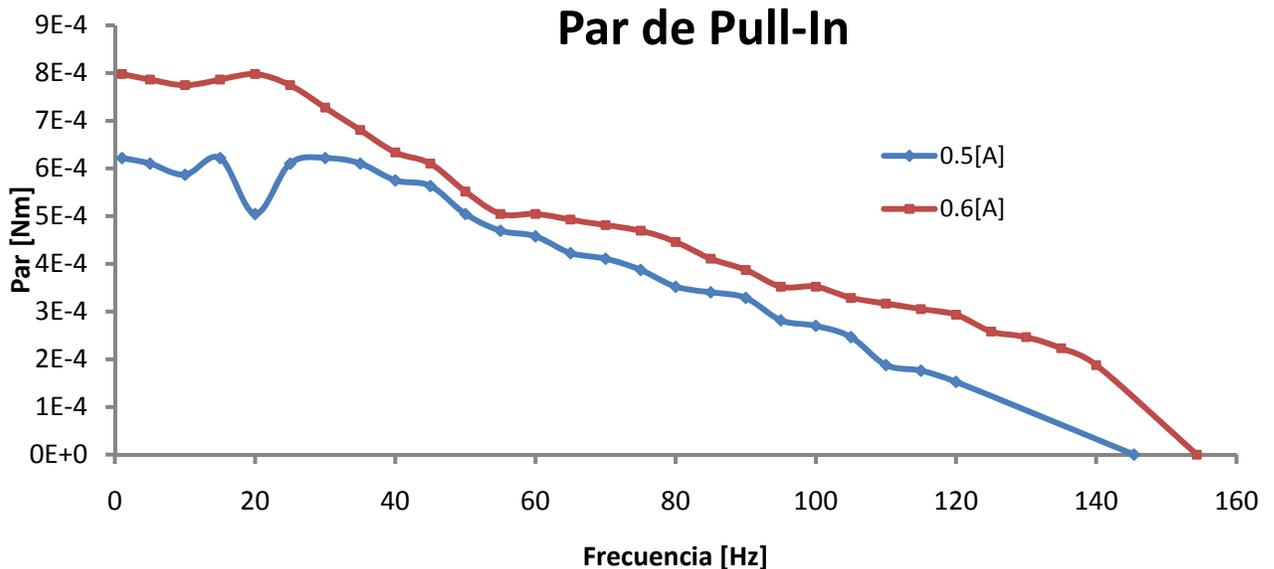
En la gráfica de la figura 4.29 se muestran los resultados para el motor de 25mm mientras que, en la grafica de la figura 4.30 se muestran los resultados para el motor de 20mm



**Figura 4.29:** Gráfica de Par de pull-in vs Frecuencia – Motor de 25mm

En ambas gráficas de los resultados de esta prueba se puede observar, que al aumentar la corriente, aumentamos el par de *pull-in*, por lo que si necesitamos un motor que pueda arrancar con grandes cargas, lo que se debe de hacer es diseñar un motor capaz de conducir la suficiente cantidad de corriente para generar el par necesario. Sin embargo, hay que recordar que la limitante en la cantidad de corriente con que funciona un motor está determinada por

la capacidad de éste para irradiar el calor generado en los elementos resistivos.



**Figura 4.30:** Gráfica de Par de pull-in vs Frecuencia – Motor de 20mm

La información en las gráficas de las figuras 4.29 y 4.30 determina dos puntos importantes: la frecuencia máxima de sincronización y el par máximo de sincronización. La frecuencia máxima de sincronización es la frecuencia a la que el motor ya no puede sincronizarse incluso sin carga. Mas 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 este valor, el motor no podrá girar ni un paso incluso si se utilizan curvas de aceleración y, por lo tanto, mucho menos podrá girar a altas velocidades; este punto se

encuentra como la primer lectura de par de *pull-in* en cada una de las gráficas.

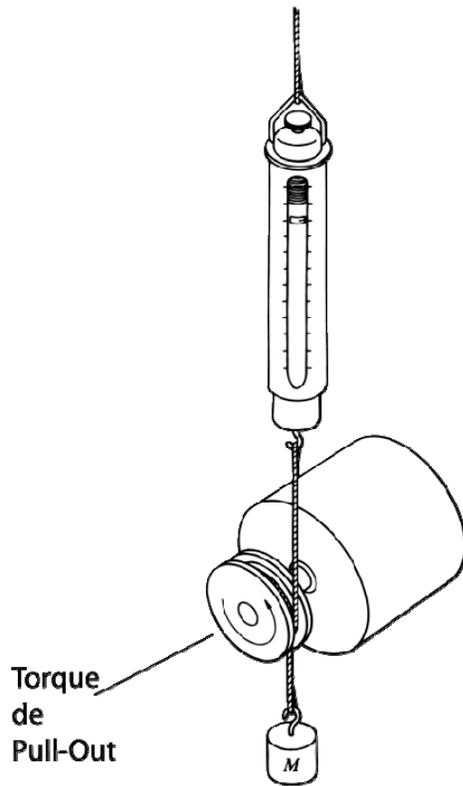
Los valores de de par máximo de sincronización de los motores de este trabajo, a corriente nominal de 0.6[A], son de 1.340[mNm] y 0.798[mNm] para el motor de 25mm y el de 20mm respectivamente. Mientras que las frecuencias máximas de sincronización son de 154.36[Hz] y 151.00[Hz], para el motor de 25mm y el de 20mm respectivamente.

#### **4.4.4: Pruebas de par de *pull-out***

El par de *pull-out* se midió mediante un arreglo como el que se muestra en la figura 4.31. 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. Al hacer girar al 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 *holding*, 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 el valor del par de *pull-out*.

Para obtener una lectura, mediante este método, primero se lleva el motor a la frecuencia requerida y luego se comienza a

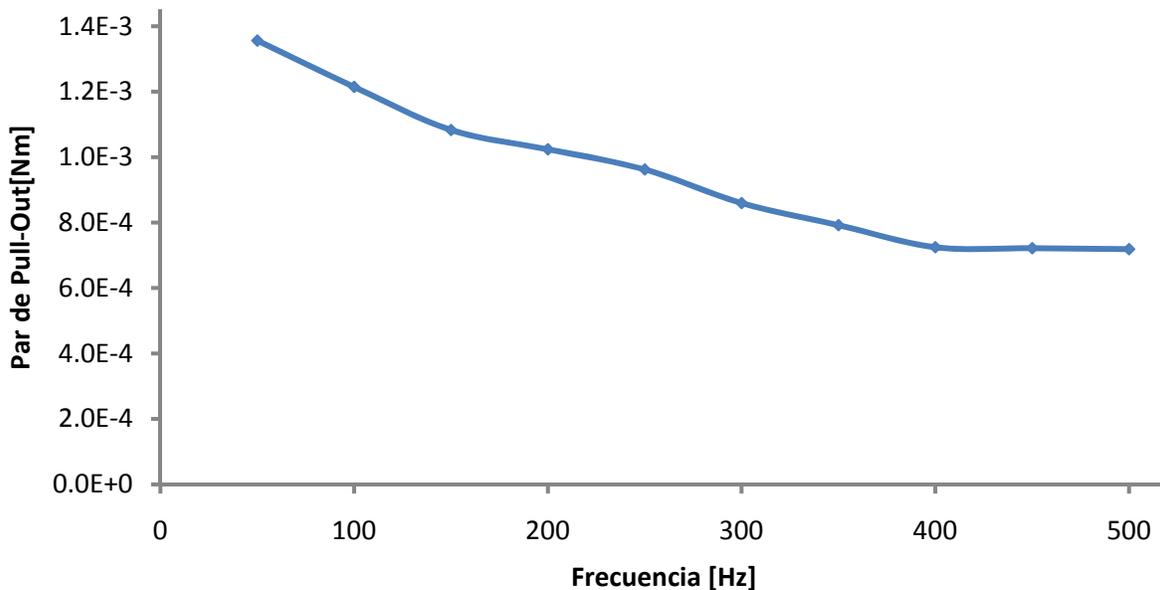
aumentar la masa hasta que el motor pierda sincronía. El par de *pull-out* es el último valor del par de fricción que se tome antes de que el motor pierda la sincronía.



**Figura 4.31:** Esquema de la prueba de *pull-out* [22]

La obtención del par de *pull-out* presenta ciertas dificultades debido a las zonas de inestabilidad que la mayoría de los motores a pasos presentan; es por esta razón que en la mayoría de las gráficas de *pull-out* no se toman lecturas más allá de los rangos normales de operación (0-3kHz).

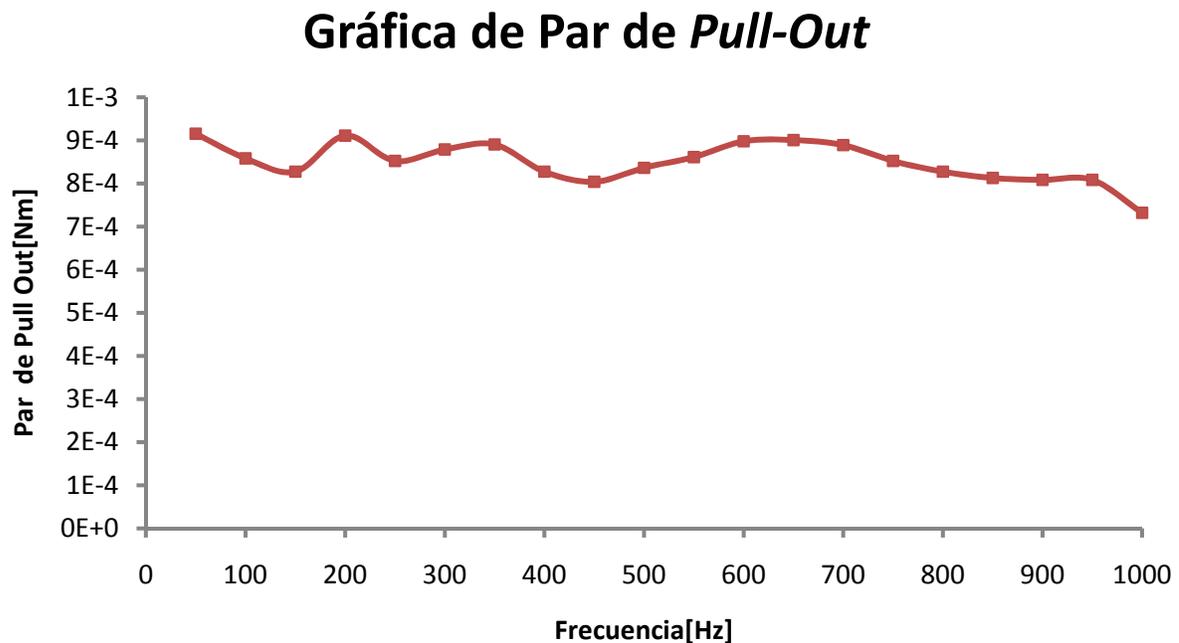
## Gráfica de Par de *Pull-Out*



**Figura 4.32:** Gráfica de Par de pull-out vs Frecuencia – motor de 25mm

En la figura 4.32 se muestra la gráfica de los resultados de la prueba de *pull-out* para el motor de 25mm. En ésta gráfica se observa que a diferencia de otro tipo de motores, alrededor de los 400[Hz], el par deja de decaer; esto se debe a que a estas frecuencias el momento de inercia, comparado con el par generado por las fuerzas de Lorentz, es mayor. Por lo que, aunque el par generado por medio de las fuerzas de Lorentz disminuya, es suficiente para mantener este momento de inercia, y por lo tanto el par generado por el motor no decae. Para éste motor no se tienen lecturas arriba de los 500[Hz] debido a que el motor presentaba una zona de inestabilidad que no pudo ser superada con el controlador diseñado en este trabajo. Si se requiriera operar éste motor en las zonas de inestabilidad se requeriría implementar un control de lazo cerrado.

Para el motor de 20mm, los resultados se muestran en la gráfica de la figura 4.33. Para éste motor las lecturas se pudieron tomar a mayores frecuencias que en el motor de 25mm, pues este motor no presentó zonas de inestabilidad en la región donde se tomaron las lecturas. Además la prueba del par de *pull-out* reveló que el par decayó muy poco cuando se aumentó la frecuencia, ya que en el punto de la lectura para 1kHz se tenía un par apenas 25% más pequeño que la lectura tomada a 50Hz.



**Figura 4.33:** Gráfica de Par de *pull-out* vs Frecuencia – motor de 20mm

## Capítulo 5: Análisis de Resultados

### 5.1 Gráficas Características

Al igual que en los motores a pasos comerciales, las características dinámicas y estáticas para cada uno de los motores construidos para este trabajo se presentan resumidas en una sola gráfica. En la figura 5.1 se muestra la gráfica característica del motor de 20mm y en la figura 5.2 se muestra la gráfica característica del motor del motor de 25mm. En estas gráficas aparecen las graficas del par de *pull-in*, del par de *pull-out* y el valor de par de *holding* a corriente nominal de 0.6[A].

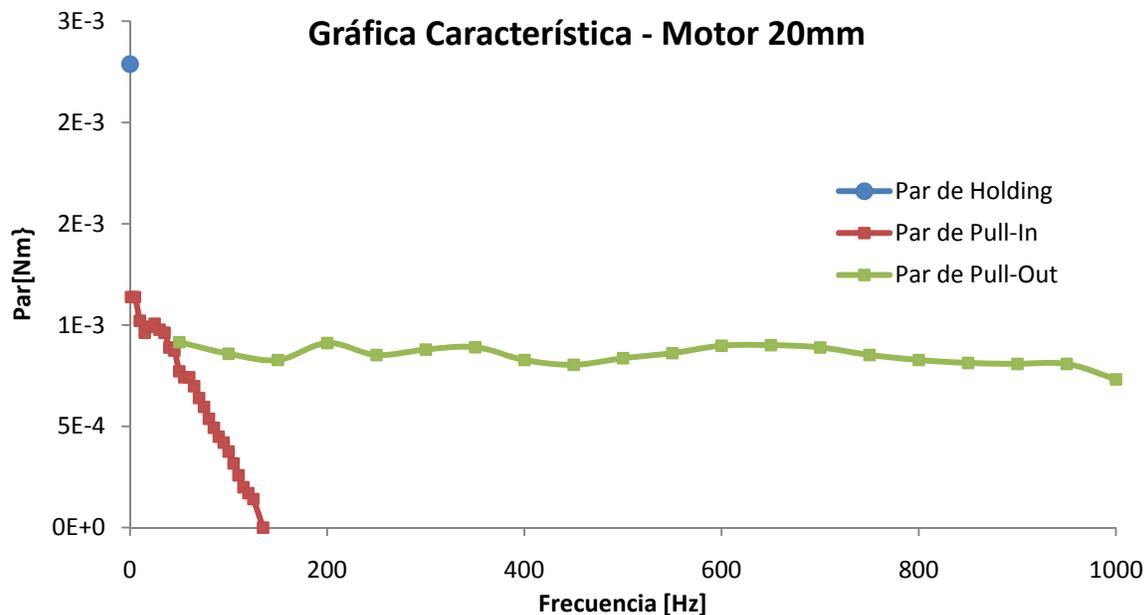
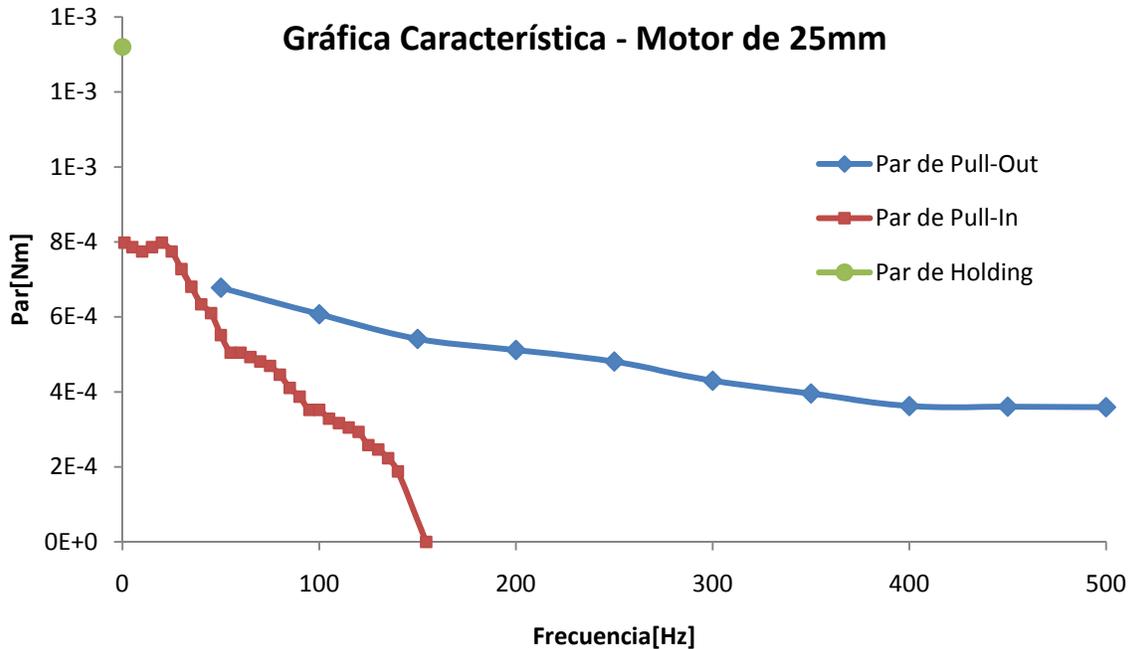


Figura 5.1: Gráfica característica – motor de 20mm.



**Figura 5.2:** Gráfica característica – motor de 25mm.

Las gráficas características para los motores a pasos construidos para este trabajo resultaron similares a las gráficas para los motores a pasos convencionales (*ver figura 3.6*). En éstas gráficas se muestra la información suficiente para determinar si los motores construidos en este trabajo se pueden utilizar en una aplicación determinada.

Los datos de la figura 5.1 y de la figura 5.2 se condensan en la tabla 5.1.

En las gráficas características de los motores a pasos desarrollados en este trabajo (figura 5.1 y figura 5.2) se observa que el par de *holding* es, en ambos casos, casi del doble que el par de *pull-in* máximo (par máximo de sincronización). Esto indica que la fuerza de Lorentz, que es la que produce el par en los motores de este trabajo,

pierde su capacidad para generar par cuando empieza a girar el motor.

Propiedad	Motor de 25[mm]	Motor de 20[mm]	Unidades
<i> Holding Torque</i>	2.2885	1.3203	[mNm]
Par Máximo de Arranque	1.1384	0.7980	[mNm]
Frecuencia Máxima de Arranque	151.25	154	[Hz]

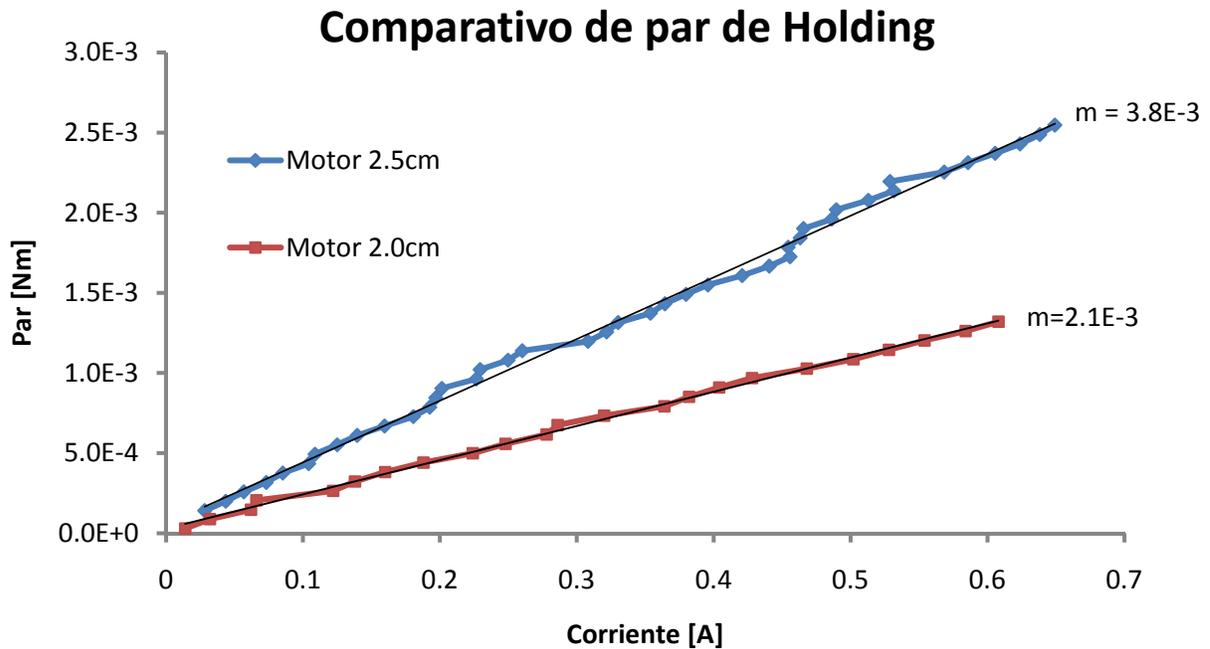
**Tabla 5.1:** Resumen de las propiedades estáticas y dinámicas medidas.

Para hacer un análisis de cómo se alteran las características dinámicas y estáticas de los motores a pasos de fuerza de Lorentz cuando las dimensiones varían, se hizo un comparativo de cada una de las características de los motores de este trabajo.

## 5.2: Análisis del par de *Holding*

Para comparar el  *holding* torque, se trazaron en la figura 5.3 las gráficas de par de  *holding* de ambos motores en una sola. Como se mencionó anteriormente el  *holding* está directamente relacionado con la fuerza de Lorentz que se produce entre los imanes del rotor y las espiras de los embobinados en el estator. Entre las magnitudes que cambiaron que alteran el valor de dicha fuerza y que cambiaron de valor de un motor a otro se encuentran: el número de enrollamientos en el estator y el diámetro del rotor; el número de enrollamientos por

bobina pasó de 150 a 100 vueltas y de 25mm a 20mm respectivamente. De esta manera se tiene que las dimensiones del rotor disminuyeron de un motor a otro en un 20% (de 25mm a 20mm), mientras que el número de enrollados por bobina en el estator se redujo en un 33% (de 150 a 100 enrollados).



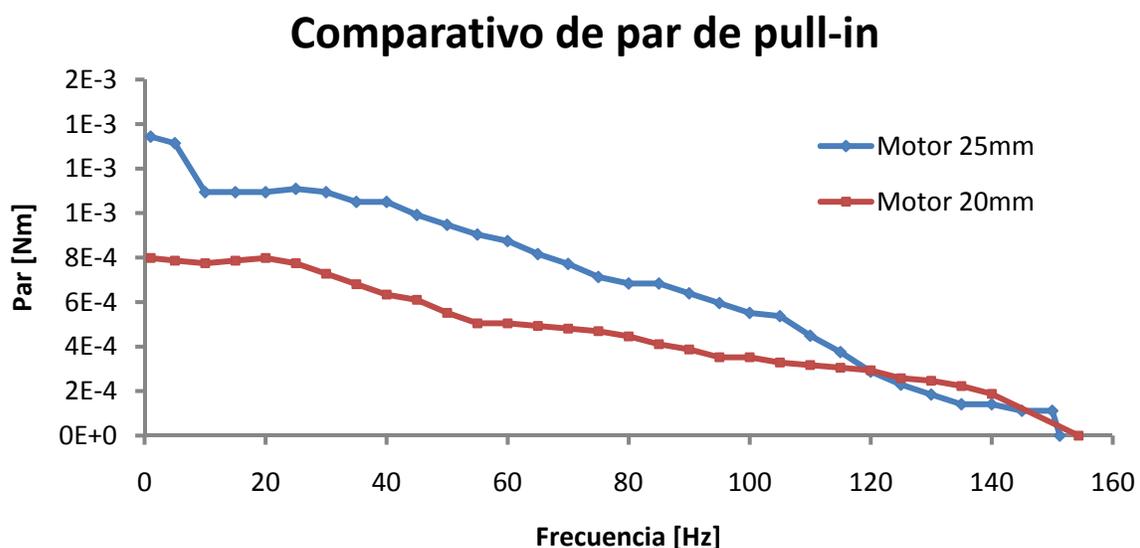
**Figura 5.3:** Gráfica comparativa de par de holding.

Si se introducen estos porcentajes en la ecuación que describe al par de *holding* teórico, se obtiene que la reducción esperada del par de *holding* es de un 47%. Para comparar la disminución del par de *holding* teórica con la disminución real, se compararon las pendientes del modelo lineal que se aproxima a los puntos de las lecturas de par de *holding* para cada uno de los motores. En la gráfica de la figura 5.3 se muestran los valores de dichas pendientes. Comparándolas se

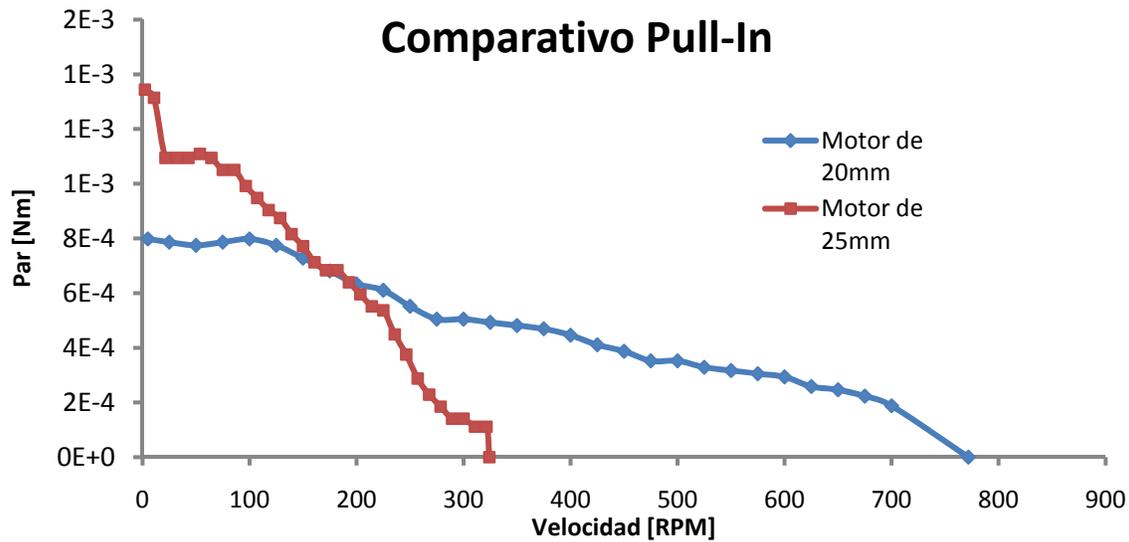
tiene que la pendiente disminuyo en 45% (pasando de  $3.8E-3$  a  $2.1E-3$ ). Se puede establecer entonces que efectivamente el valor del par de *holding* disminuye en la misma proporción que determina su modelo teórico. De esta manera, si lo que se busca es un *holding* torque determinado, se pueden hacer cálculos buscando la combinación de número de enrollamientos y de dimensiones del rotor que satisfagan las necesidades de par y de espacio de una aplicación determinada.

### 5.3 Análisis del par de *Pull-in*

Para analizar cómo cambió el par de *pull-in*, con la disminución de dimensiones, se hizo una gráfica donde se colocó el par de *pull-in* de ambos motores (figura 5.4). En este caso sólo se comparará la gráfica para la corriente nominal de 0.6 [A].



**Figura 5.4:** Gráfica comparativa de par de *pull-in*.



**Figura 5.5:** Gráfica comparativa de pull-in vs. velocidad

En la gráfica de la figura 5.4 se puede observar que la frecuencia máxima a la que se sincronizan ambos motores es de alrededor de 150Hz, sin embargo, debido a la diferencia en el número de pasos por revolución en cada uno de los motores, esta frecuencia representa diferentes velocidades en cada uno de ellos (ver figura 5.5). En el motor de 20mm, con 12 pasos por revolución, se tiene que la frecuencia máxima a la que se sincroniza es de 154 Hz lo que equivale a 772RPM; mientras que en el motor de 25mm, con 26 pasos por revolución, la frecuencia máxima a la que sincroniza es de 151.25 Hz equivalentes a 349 RPM. Como la frecuencias máximas a la que se sincronizan los motores no cambiaron de un motor a otro, podemos aseverar que la frecuencia máxima de sincronización no depende del tamaño del motor ni de sus embobinados, sino que son más bien un

valor inherente al principio de funcionamiento, a la corriente nominal y a la densidad de flujo de los imanes que se utilizaron.

Por otro lado, el par máximo de sincronización, que determina la carga máxima a la que podrá estar cargado el motor para arrancar, pasó de un valor de 1.34[mNm] y 0.798[mNm] en el motor de 25mm y en el de 20mm, respectivamente. El cambio representa una disminución del 40%; éste cambio se encuentra cercano al porcentaje de cambio que se tuvo en el *holding* torque, por lo que se puede concluir que el par máximo de sincronización disminuye casi en la misma proporción que lo hace el par de *holding*.

También en la gráfica de la figura 5.4 se puede observar que el decaimiento del par de *pull-in* es mayor en el motor de 25mm, pues éste disminuye de un par de *pull-in* más alto en la primera lectura y decae a cero en la misma frecuencia que el motor de 20mm. Esto se debe precisamente a la diferencia en las dimensiones del rotor, puesto que mientras más grande sea el rotor, más momento de inercia debe vencerse para empezar a girar. Además, para este diseño, mientras más pasos por revolución se tengan, más imanes hay que colocar en el rotor, lo que también provoca un aumento en el momento de inercia mayor.

Considerando los puntos anteriores acerca del comportamiento del par de *pull-in*, si lo que se requiere construir en un futuro es un motor a pasos de fuerza de Lorentz que pueda sincronizarse con una mayor carga, lo que se debe hacer es construir un motor que tenga un mayor número de enrollamientos en sus embobinados, aumentar la

corriente que pasa por ellos, mientras que, por otro lado, se disminuyan su número de pasos y las dimensiones del rotor.

#### 5.4 Análisis del par de *pull-out*

Para comparar los valores de par de *pull-out* de los motores se trazó la grafica de la figura 5.6. En ésta gráfica sólo aparece el rango de frecuencia donde se puede comparar el valor del par de *pull-out* de ambos motores, recordando que debido a una zona de inestabilidad, en el motor de 20mm no se pudieron establecer lecturas más allá de 500[Hz]. También, se observa que a todas las frecuencias el par de *pull-out* tienen una magnitud mayor para el motor de 25mm. Esto indica que definitivamente el par de *pull-out* es proporcional con la fuerza de Lorentz generada por los embobinados del motor. Además, si bien en ambos motores el decrecimiento del par de *pull-out* no es muy brusco, en el caso del motor de 20mm el decrecimiento es mayor, esto se debe a que el motor de 25mm tiene un mayor momento de inercia en su rotor que no permite que el motor pierda sincronía cuando se somete a un par de carga mayor.

En la figura 5.7 se muestra la gráfica donde se compara el par de *pull-out* pero en esta ocasión contra velocidad. En esta grafica se observa que la operación del motor de 20mm no se ve afectada por su inestabilidad pues puede girar a las mismas velocidades del motor de 25mm.

### Comparativo del par de Pull-Out

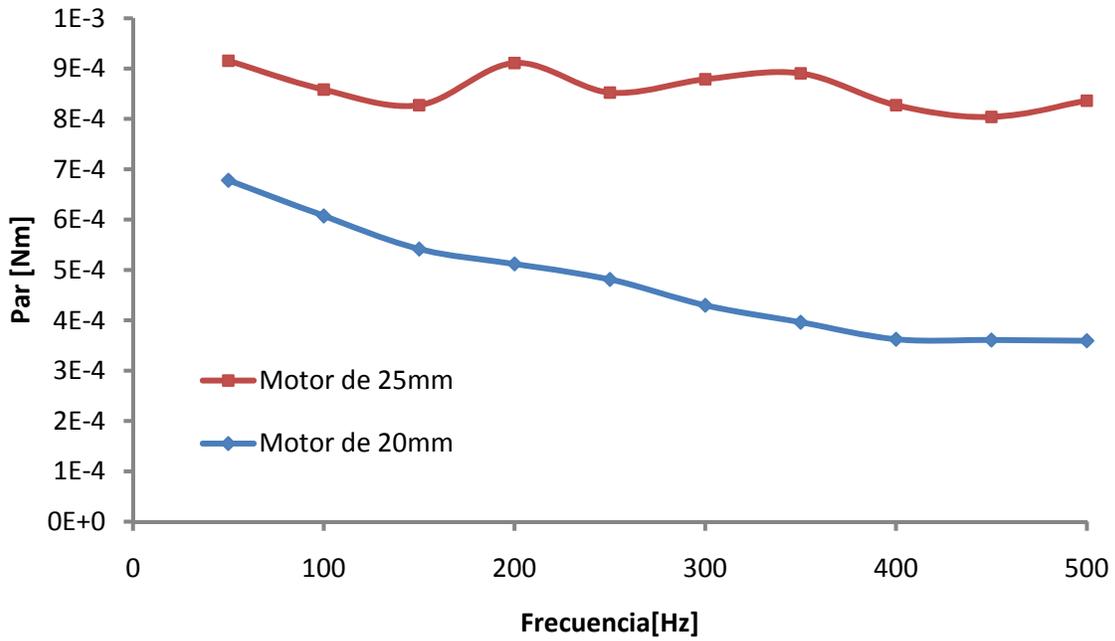


Figura 5.6: Gráfica comparativa del par de pull-out.

### Comparativo de Pull-Out

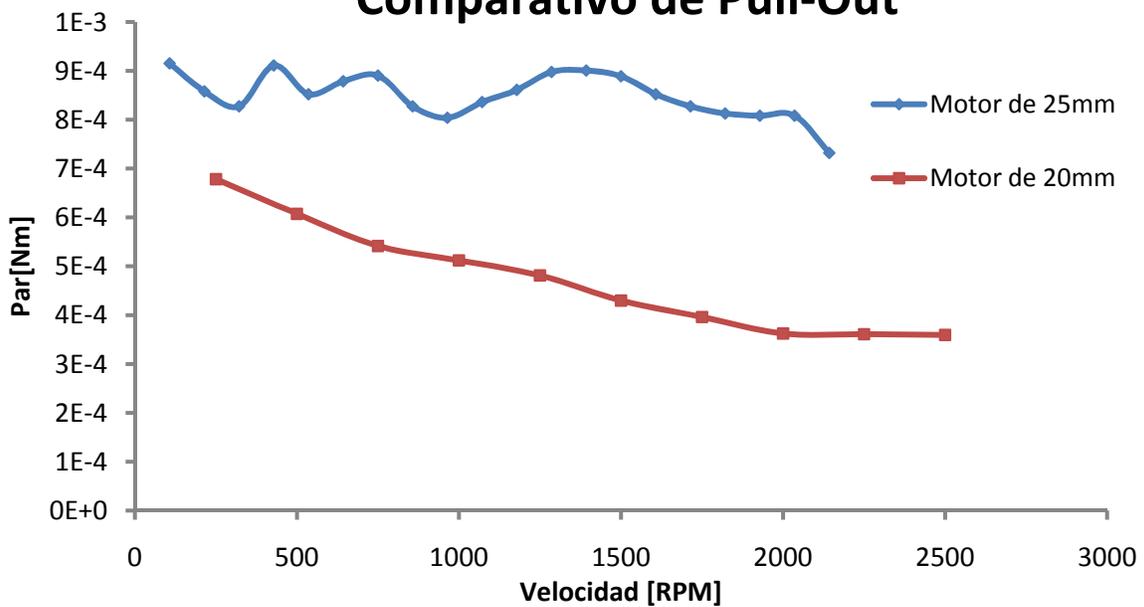


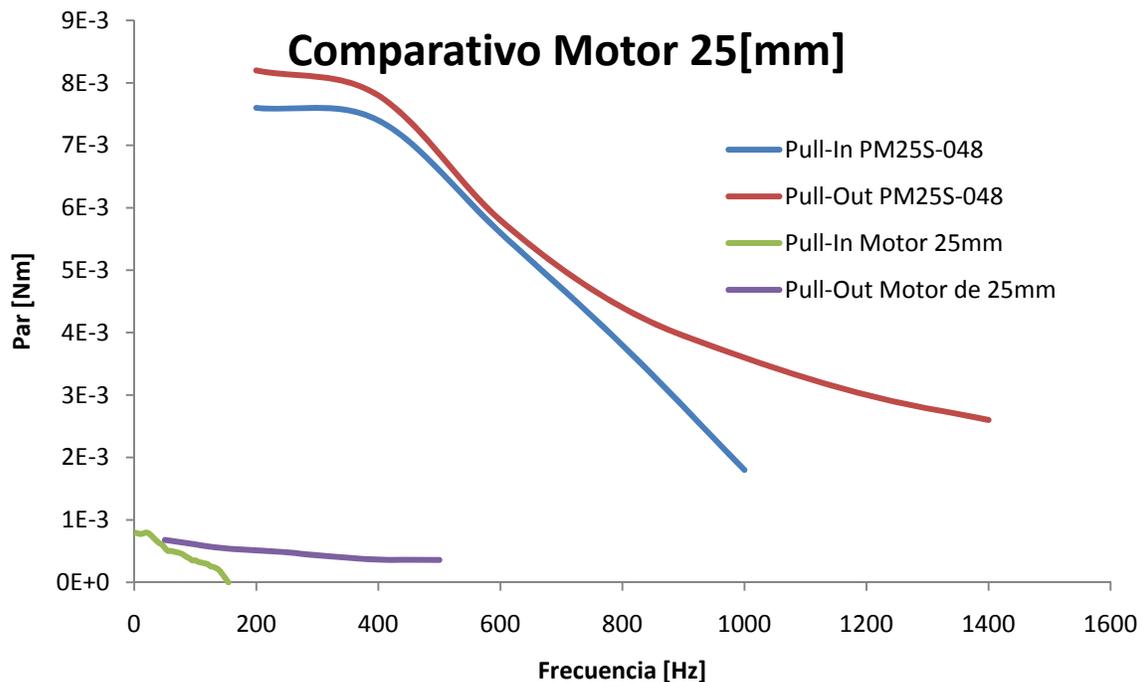
Figura 5.7: Gráfica comparativa de par de pull-out vs velocidad

Es evidente que la mayor diferencia entre ambos motores es que el motor de 25mm no presenta la zona de inestabilidad que el motor de 20mm presentó para la prueba de *pull-out*. Esta zona de inestabilidad se debe principalmente a que el desplazamiento por paso es mayor en el motor de 20mm que en el de 25mm; pues el primero se mueve  $30^\circ$  por paso, mientras que el segundo se mueve solo  $12.86^\circ$  por paso. Por lo tanto al recorrer una mayor cantidad de distancia angular, el rotor alcanza una velocidad mayor, y por lo tanto un momento de inercia también mayor antes de llegar a su posición deseada. Esta inercia provoca que el sistema tenga un sobrepaso mayor que en el motor de 20mm que en el motor de 25mm. Este sobrepaso aumenta también el tiempo de asentamiento de la posición del rotor, lo cual provoca que por resonancia el motor tienda a ser inestable en la zona cercana a los 550[Hz]. Por el mismo fenómeno es muy probable que el motor de 25mm también tenga una zona de inestabilidad en algún rango de frecuencia aunque este no fue alcanzado en la realización de esta prueba.

Considerando los puntos anteriores sobre el comportamiento del par de *pull-out*, si se requiere construir un motor a pasos de fuerza de Lorentz que tenga un par de *pull-out* mayor, se debe construir con un rotor con un momento de inercia mayor. Al igual que en las otras características, también se puede aumentar el par de *pull-out* aumentando la fuerza de Lorentz que produce el motor, es decir, aumentando el número de enrollamientos y la cantidad de corriente que pasa por ellos.

## 5.5 Comparación con motores comerciales

Para tener una referencia del desempeño de los motores de este trabajo, se hace una comparación con motores comerciales de las mismas dimensiones. El motor con el cual se comparará el motor de 25mm es un motor a pasos de imán permanente marca *Minebea* modelo *PM25S-048*. En la figura 5.8 se muestra una gráfica en la que se comparan las curvas de *pull-in* y de *pull-out* del motor con los del motor de 25mm [20], las características del motor comercial se muestran en la tabla 5.2.



**Figura 5.8:** Gráfica característica para un motor comercial de 25mm [20].

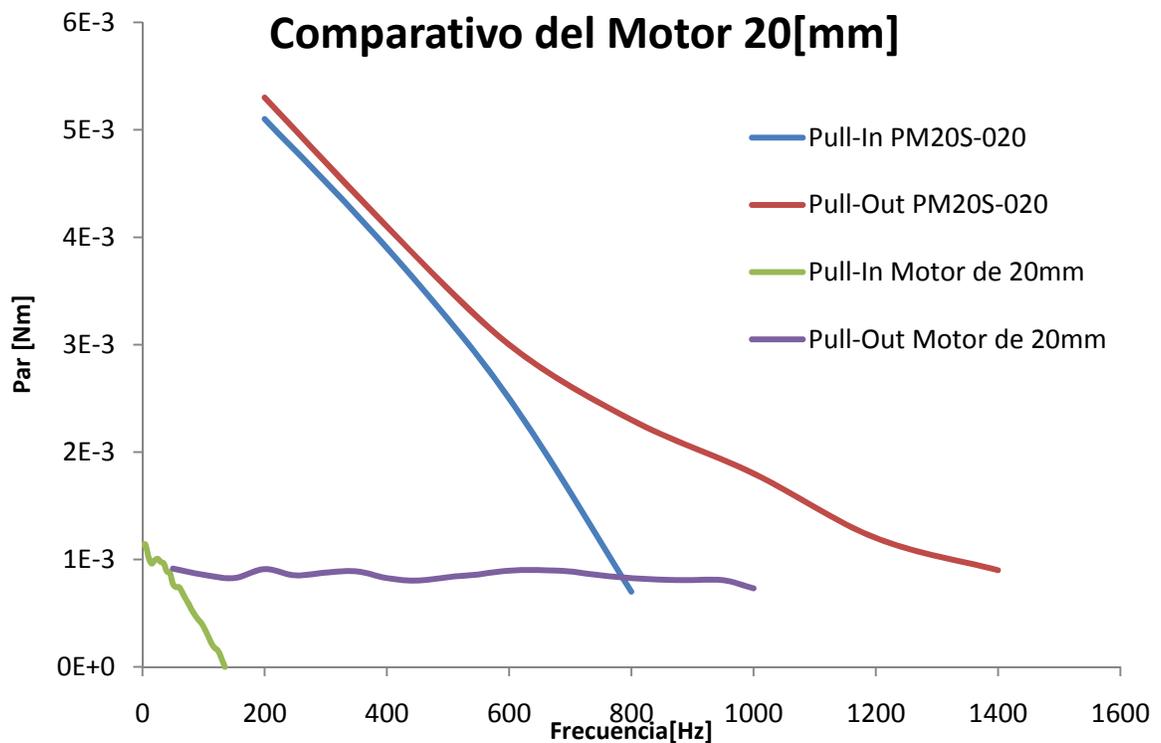
<i>Parámetros del motor PM25S-048 marca Minebea</i>	
<i> Holding Torque</i>	8.829 [mNm]
Voltaje Nominal	12 [V]
Corriente Nominal	0.25[A]
Frecuencia Máxima de Sincronización.	1200[Hz]
Frecuencia Máxima de Operación.	2000[Hz]
Par de <i>Pull-in</i> Máximo	8.500[mNm]
Pasos por revolución	48
Ángulo de Paso	7.5°

**Tabla 5.2:** Tabla de los parámetros de un motor comercial de 25[mm] de diámetro.

Si comparamos los valores de par de *holding*, vemos que el motor de fuerza de Lorentz produce mucho menos par que el motor comercial, 2.2885[mNm] y 8.829[mNm] respectivamente. Si comparamos la potencia que consumen ambos motores para producir este par de *holding*, encontramos que el motor comercial consume 3[W], mientras que el motor de 25mm consume 8.64 [W]. Esto señala que la conversión de corriente a par de nuestro motor es deficiente a comparación con los motores a pasos comerciales.

Por otra parte comparando los valores del par máximo de arranque, de 1.1384[mNm] para el motor de 25mm y de 8.5[mNm] para el motor comercial; se tiene que el motor a pasos de fuerza de

Lorentz también queda muy por debajo de su contraparte de imán permanente. Como se mencionó anteriormente, esto es una señal de que el motor de Fuerza de Lorentz tiene dificultades para sincronizarse. Además, el motor comercial puede sincronizarse a mas alta frecuencia, y con mayor carga, que el motor de 25mm, pues la frecuencia máxima de sincronización para el motor de 25mm es de 135Hz, mientras que para el motor comercial es de 1200[Hz].



**Figura 5.9:** Gráfica característica para un motor comercial de 20mm.

Comparando el comportamiento de la curva del par *pull-out* del motor a pasos comercial y el motor de 25mm de este trabajo (figura 5.8), se obtiene que la caída del par de *pull-out* conforme va aumentando la frecuencia es mayor en el motor comercial que en el

motor de 25mm, ya que, por mencionar un punto en la curva, a una frecuencia de 800[Hz], el par del motor comercial ya decayó en un 51%, pasando de 8.5[mNm] a 4.2[mNm]; mientras que para ese mismo punto el par de *pull-out* en el motor de 25mm ha decaído tan solo en un 9.6%, pasando de 0.9154[mNm] a 0.8278[mNm]. Esta podría ser una ventaja competitiva de este tipo de motores.

El motor de 20mm de este trabajo se comparó con un motor marca *Minebea* modelo *PM20S-020* de 20mm de diámetro cuya gráfica característica se encuentra en la figura 5.9 y sus principales parámetros se encuentran en la tabla 5.3. De la comparación se encontró que el motor desarrollado en este trabajo presenta las mismas deficiencias que las que presenta el motor de 25mm frente a su contraparte comercial. Pues presenta, de igual manera que el motor de 25mm, una deficiencia al transformar la corriente en par pues mientras el motor comercial consume 2.5[W] produciendo un *holding* torque de 5.886[mNm]; el motor de 20mm consume 7.2[W] y produce un *holding* torque de 1.3203[mNm]. Así mismo, el par máximo de arranque del motor de 20mm también fue inferior al del motor comercial, pues para el motor de 20mm tiene un valor de 0.7980[mNm] mientras que para el motor comercial tiene un valor de 5.500 [mNm].

<i>Parámetros del motor PM20S-020 marca Minebea</i>	
<i> Holding Torque</i>	5.886 [mNm]
Voltaje Nominal	5[V]
Corriente Nominal	0.5[A]
Frecuencia Máxima de Sincronización.	820[Hz]
Frecuencia Máxima de Operación.	1600[Hz]
Par de <i>Pull-in</i> Máximo	5.500[mNm]
Pasos por revolución	20
Ángulo de Paso	18°

**Tabla 5.3:** Tabla de los parámetros de un motor comercial de 20[mm] de diámetro.

Finalmente, a diferencia del motor de 25mm se tiene que el decaimiento en el par de *pull-out*, en el motor de 20mm, es mayor que en el motor comercial, pues a una frecuencia de 400[Hz] el motor comercial redujo su par en solo 25%, pasando de 5.500[mNm] a 4.100[mNm]; mientras que el motor de 20mm de este trabajo a esa frecuencia redujo su par en 47% pasando de 0.678[mNm] a 0.360[mNm]. Sin embargo, la comparación del par de *pull-out* no es del todo válida pues este motor se va acercando a su zona de inestabilidad en dicha frecuencia.

Con el análisis anterior se establece que, en general, los motores a pasos de fuerza de Lorentz de este trabajo tienen un menor desempeño que sus contrapartes comerciales. Esto se debe

principalmente a que los motores comerciales a través de la larga experiencia que se tiene en su diseño y construcción han logrado arreglos que permiten una mayor eficiencia. Por lo tanto, para mejorar las características de los motores a pasos de fuerza de Lorentz se deben de buscar nuevos arreglos que aumenten el par de salida como, por ejemplo: aumentar el número de polos por fase, aumentar el número de rotores o construir rotores que tengan componentes activos.

## Conclusiones

---

En esta tesis se diseñaron y manufacturaron dos motores a pasos por fuerza de Lorentz, de diámetros de 25mm y 20mm respectivamente. El motor de 25mm de 26 pasos por revolución, operando con una corriente nominal de 0.6 [A] presentó un par de *holding* de 2.288[mNm], un par máximo de sincronización de 1.340[mNm], un par máximo de arranque de 1.138[mNm], una frecuencia máxima de sincronización de 151.25 [Hz] equivalente a 349 [RPM] y un par de *pull-out* de 0.836[mNm] a una frecuencia de 500 [Hz]. Por su parte el motor de 20mm, de 12 pasos por revolución operando a la misma corriente nominal presentó un par de *holding* de 1.320[mNm], un par máximo de arranque de 7.980[mNm], una frecuencia máxima de sincronización de 154 [Hz] equivalente a 772 [RPM] y un par de *pull-out* de 0.35941[mNm] a una frecuencia de 500[Hz].

En general se encontró que los motores a pasos construidos en este trabajo presentaron curvas características similares a los motores a pasos convencionales, además presentaron también un modo de operación similar a éstos.

Las gráficas de holding torque obtenidas muestran que los valores teóricos son bastante cercanos a los valores reales, con una desviación promedio de 7%, por lo que los cálculos del par de holding quedan asentados como una base para el diseño de futuros motores a pasos de fuerza de Lorentz.

Por su parte, en cuanto al par de pull-in, se observó que el par máximo de sincronización disminuyó de un motor a otro en la misma proporción que disminuyó el par de *holding*. Además, se encontró que el valor de frecuencia máxima de sincronización de ambos motores es similar, por lo que se concluye que el valor de esta frecuencia es dependiente del diseño del motor y no de las dimensiones del mismo.

En cuanto al par de *pull-out* se encontró que éste disminuye a una tasa menor que en los motores comerciales, por lo que los motores a pasos de fuerza de Lorentz se convierten en buenos candidatos para aplicaciones en las que se requiere un par constante cuando se va aumentando la frecuencia.

Comparando los valores de par de *holding*, par de *pull-in* y par de *pull-out* se encontró que los motores a pasos de este trabajo presentan valores equivalentes al 10% de los valores que presentan los motores comerciales de dimensiones similares. De esta manera, si bien los motores desarrollados para este trabajo resultaron con un desempeño inferior a los motores comerciales, aún pueden considerarse en aplicaciones donde las dimensiones requeridas sean inferiores a las que el mercado puede ofrecer. En este punto, la facilidad de manufactura y los bajos costos de los materiales compensan la baja eficiencia y los bajos pares de salida del motor.

## Trabajo a Futuro

---

Si bien los motores construidos para este trabajo tuvieron una mejor calidad en sus ensambles y componentes que los motores construidos anteriormente. La temperatura que alcanzaban durante su operación no mejoró. Por lo tanto, debe de buscarse un diseño que busque una mejor disipación de calor que permita que el motor funcione por largos periodos sin alcanzar su temperatura crítica. Otro aspecto dentro del diseño que se requiere mejorar es la dificultad que presenta este motor para su ensamble, se modificar el diseño de tal manera que al momento en que se ensamblan las piezas éstas queden condicionadas a su posición logrando que los componentes queden alineados y en su posición; sin la necesidad de hacer algún otro ajuste o alineación posterior.

Otro punto que se debe retomar, es la medición del desempeño de estos motores en una aplicación donde se exploten al máximo sus características, con estas mediciones se puede concluir que tan alto es el desempeño de este tipo de motores cuando se tienen cargas variables, cambio de sentido, rampas de aceleración y deceleración; operación por largos periodos, desalineamientos con la carga; y otras situaciones que se presentan cuando un motor de pasos es utilizado en aplicaciones industriales.

Finalmente se presenta la propuesta de desarrollar un banco de pruebas para estos motores. Las pruebas realizadas a estos motores, son repetitivas y requieren de mucho tiempo para realizarlas

correctamente. Al tratarse de tareas repetitivas, las pruebas realizadas para este trabajo son buenas candidatas para ser automatizadas. Aunque estos bancos de prueba existen en el mercado, no existen bancos de pruebas para los tamaños de motores que se planean construir en el GMM además de que son muy costosos. De esta manera, será posible construir el motor y obtener rápidamente sus características, lo cual permitirá reducir el tiempo de construcción de los prototipos de las máquinas que se desarrollen.s

## Referencias

---

- [1]. MotionKing (China). *MotionKing China corporate website* [En-linea].  
Dirección URL: <http://www.motionking.com>.
- [2]. **Oppenheim, Alan V. y Willsky, Alan S.** *Señales y Sistemas*. Ciudad de México : Pearson Educación, 1997. 970170116X.
- [3]. **Ogata, Katsuhiko.** *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España : Pearson Educación, 2003.
- [4]. **Beatty, H. Wayne y Kirtley, James L.** *Manual del Motor Eléctrico*. Ciudad de México : McGraw-Hill, 2000. 9701027345.
- [5]. *The Application of electricity in warships.* **McClelland, W.** 65, 1927, JIEE, págs. 829-71.
- [6]. *The step motor: The next advance in control systems.* **Kiebertz, R. B.** 1964, IEEE Transactions on Automatic Control, págs. 98-104.
- [7]. *Characteristics of saturated stepper and reluctance motors.* **Byrne, J. V. y C., Lacy J.** 136, IEE Conference Publications, págs. 93-6.
- [8]. *The power of stepping motor: A new digital Actuator.* **Thomas, A. G. y Fleischauer, F. J.** 1957, Control Engineering, Vol. 4, págs. 74-81.
- [9]. **Gieras, Jacek F. y Wing, Mitchel.** *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*. New York : Marcel Dekker, 1997. 0824797949.
- [10]. *Unifying approach to the static torque of stepping motor structures.* **Harris, M. R., y otros.** 1977, IEE Proceedings, Vol. 124, págs. 1215-1224.
- [11]. *Considerations on improving the ratio of torque to inertia.* **Bakhuizen, A. J. C.** University of Leeds : s.n., 1976, Proceedings of the International Conference on Stepping Motors and Systems.

- [12]. **Arefeen, Mohamed S. y Childrens, Jim D.** *Method of Stall Detection for Stepper Motor System.* US 7224140B2 Estados Unidos, 29 de Mayo de 2007.
- [13]. **Kuo, Ping-Hung.** *Stepper Motor Accelerating System and Method.* US 7116074 Estados Unidos, 3 de octubre de 2006.
- [14]. **Gad-el-Hak, Mohamed.** *The MEMS Handbook.* s.l. : CRC Press, 2001. 0-8493-0077-0.
- [15]. **Leica Microsystems.** *Lifeoptics.*[En-línea]. Dirección URL:  
<http://www.leica-microsystems.com/>.
- [16]. **Caballero-Ruiz, L. Ruiz-Huerta, H. Silva López, G. Herrera-Granados.** *Sistema de Microposicionamiento para el Estudio de Actividad Neuronal en Ratas.* Reporte del 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.Las Palmas de Gran Canaria, 2009.
- [17]. **Aarnley, Paul.** *Stepping Motors: A guide to theory and Practice.* Londres : The Institution of Electrical Engineers, 2002. 0852960298.
- [18]. **Pérez Reyes, Oscar.** *Desarrollo de Motores a Pasos para la Automatización de Máquinas Herramientas.* Ciudad de México : UNAM, 2008.
- [19]. **ST Microelectronics.***L293D Datasheet.* [En-línea]. Dirección URL:  
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/1328/l293b.pdf>
- [20].**NMB-MAT.** *SteppingMotors Characteristics.*[En-línea] Dirección URL:  
<http://www.eMINEBEA.COM>
- [21]. **Chapman, Stephen J.** *Máquinas Eléctricas.* México : McGrawHill, 2005. 9701049470.
- [22]. **Kenjo, Takashi y Sugawara, Akira.** *Stepping Motors and their Microprocessor Controls.* s.l. : Oxford University Press, 1994.

[23]. **Herrera Granados, German.** *Investigación y evaluación de mecanismos para el desarrollo de micromáquinas herramientas.* UNAM : Tesis de Maestría, 2009.